

กระบวนการโลหะสำหรับเทคโนโลยีวงจรรวมระดับ 5 ไมโครเมตร  
ที่ สจล.

METALLIZATION FOR 5  $\mu$ m INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY  
AT KMITL



ทรงพล รอดทอง  
SONGPOL RODTHONG

สพ.  
ท/ค  
2548

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 60853  
วัน,เดือน,ปี - 6 ก.ค. 2549

b. 11590889  
i. ....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่ง ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2548  
ISBN 974-15-1590-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

METALLIZATION FOR 5  $\mu\text{m}$  INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY  
AT KMITL



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN MICROELECTRONICS ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2005  
ISBN 974-15-1590-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2005

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	กระบวนการโลหะสำหรับเทคโนโลยีวงจรรวม ระดับ 5 ไมโครเมตรที่สจล.
นักศึกษา	นายทรงพล รอดทอง
รหัสประจำตัว	45060807
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2548
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล

### บทคัดย่อ

ปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตวงจรรวม ได้ถูกพัฒนาไปอย่างรวดเร็วและมีขนาดลดลงทำให้รอยต่อของชั้นพีเอ็นมีความลึกลงน้อยกว่า 1 ไมครอน พิล์มโลหะที่ได้ อาจเกิดการทะลุผ่านรอยต่อพีเอ็น ซึ่งทำให้เกิดความเสียหายกับวงจรรวม พื้นที่สัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำที่เชื่อมต่อภายนอกมีขนาดเล็กลงซึ่งจะเกิดผลของความต้านทานรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้คุณสมบัติของวงจรรวมลดลง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอ กระบวนการเคลือบฟิล์มโลหะ เพื่อที่จะใช้ทำเป็นขั้วโลหะ และการเชื่อมต่อภายใน สำหรับเทคโนโลยีวงจรรวม 5 ไมโครเมตรที่พัฒนาขึ้นในประเทศไทย ในกระบวนการเคลือบฟิล์มโลหะ เทคนิคที่ใช้ในการพัฒนาการเคลือบฟิล์มโลหะคือวิธีการสปีดเตอร์ โดยใช้วัสดุอลูมิเนียมที่มีซิลิกอนผสมอยู่ 2% (Al-Si(2wt%)) โดยนำหนัก เงื่อนไขในการสปีดเตอร์ทำที่ความดัน  $2-5 \times 10^{-3}$  บาร์ ลักษณะของฟิล์มโลหะ ที่ได้มีความมันวาว เหมือนกระจก มีความต้านทานแผ่น  $0.2-0.3 \Omega/\square$  อัตราการปลูกฟิล์ม 60-100 Å/วินาที ความเรียบของฟิล์มที่วัดจากค่าการสะท้อน(reflectance) มีค่า 100% เมื่อเทียบกับฟิล์มมาตรฐานวิธีการสปีดเตอร์สามารถควบคุมความหนาของฟิล์มโลหะและความเรียบของฟิล์มโลหะได้ดี นำฟิล์มโลหะที่ได้มาวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางไฟฟ้าของฟิล์มโลหะ สร้างลวดลายโลหะอลูมิเนียมเพื่อทดสอบการนำไฟฟ้าและการเชื่อมต่อภายในของฟิล์มโลหะโดยทำเป็นรอยสัมผัสโหม้มิก (ออกแบบเป็น contact chain) เพื่อหาความต้านทานภายในรอยสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำกับโลหะอลูมิเนียม และทำการสร้างโลหะอลูมิเนียม แบบ 2 ชั้น ระหว่างฟิล์มโลหะชั้นที่ 1 กับฟิล์มโลหะชั้นที่ 2 จะถูกชั้นด้วย ซิลิกอนไดออกไซด์ แล้วทำการออกแบบ contact chain หาความต้านทานของ via hole ระหว่างโลหะชั้นที่ 1 กับโลหะชั้นที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title Metallization for 5  $\mu\text{m}$  Integrated circuit technology at KMITL  
Student Mr. Songpol Rodthong  
Student ID. 45060807  
Degree Master of Engineering  
Programme Microelectronics Engineering  
Year 2005  
Thesis Advisor Assoc.Prof.Dr. Toempong Phetchakul

### ABSTRACT

At present, integrated circuit manufacture technology rapidly develops and decreases the pattern size, which makes deep of pn junction less than 1  $\mu\text{m}$ . It may cause metal film diffuses through pn junction (spike). This effect can damage the integrated circuit. If integrated circuit has small size, also the contact area between metal and semiconductor has small size which increases contact resistance between metal and semiconductor. If integrated circuit has many internal connections it makes increase total resistance properties of metal film for decrease many problems. This thesis presents the metallization process for making the metal contact and interconnection of 5  $\mu\text{m}$  integrated circuit technology in Thailand, using the sputtering technique. The target material in work is aluminum mixed silicon 2% by weight. The sputtering condition is operated at  $2-5 \times 10^{-3}$  bar. The surface of metal film looks like polished mirror surface. The uniformity can be shown by the reflectance value, 100% compare to standard film. The films have resistivity 0.2-0.3  $\Omega/\square$  and the growth rate is 60-100  $\text{\AA}/\text{sec}$ . The films were characterized both physical and electrical characteristics by patterning to test the current conducting and interconnecting. Ohmic contact is fabricated (design as contact chain) to evaluate the contact resistance between semiconductor and metal film layer. Two-layer metallization process is studied for multilayer connecting contact, via hole resistance of the first and second metal layer.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

นับตั้งแต่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เริ่มทำขึ้นและสำเร็จลงเป็นรูปเล่มโดยสมบูรณ์ผู้วิจัยขอขอบคุณ รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล ผู้ให้คำปรึกษา วางแนวทาง ตลอดจนชี้แนะให้งานวิจัยนี้บรรลุเป้าหมาย

ขอขอบคุณ รศ.ดร. สมเกียรติ ศุภเดช และ รศ.ดร. วิสุทธิ จูติรุ่งเรือง กรรมการพิจารณาหัวข้อที่ให้คำชี้แนะที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ ผศ.ดร. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คุณ รัชสวรรค์ เมืองเหลือ คุณ นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง และคุณ โยธิน วงศ์ประเสริฐ เจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ที่ให้คำแนะนำที่มีประโยชน์และช่วยเหลือในการปฏิบัติงาน

ขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ และศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ซึ่งเป็นผู้ให้การสนับสนุนด้านงบประมาณของ โครงการ “การพัฒนาเทคโนโลยีกระบวนการสร้างวงจรรวมแบบซีมอส ระดับ 5 ไมครอน”

ขอขอบคุณ คุณ อนุชา เรืองพานิช นักวิจัยจากศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ และคุณ เสกสรร ธิมากุล ที่ช่วยออกแบบลวดลายทดสอบและสนับสนุนเครื่องมือ สำหรับใช้ในงานวิจัย สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ผู้ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจทางด้านการเรียนมาโดยตลอด

ทรงพล รอดทอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT .....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป .....	VIII
ศัพท์เทคนิค .....	XIII
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย .....	3
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	4
บทที่ 2 เทคโนโลยีวงจรรวม.....	6
2.1 เทคโนโลยีวงจรรวมระดับ 5 ไมโครเมตรในประเทศไทย.....	6
2.2 กระบวนการโลหะด้วยวิธีการสปัตเตอร์.....	11
2.2.1 การสปัตเตอร์.....	11
2.2.2 หลักการพลาสมา.....	12
2.2.3 หลักการพื้นฐานการสปัตเตอร์.....	14
2.2.4 ดีซีไดโอด สปัตเตอร์.....	17
2.2.5 อาร์เอฟไดโอด .....	18
2.2.6 แมกนีตรอนสปัตเตอร์.....	19
2.3 กระบวนการโลหะด้วยวิธีการระเหยในสุญญากาศ.....	21
2.3.1 โครงสร้างของกระบวนการโลหะด้วยวิธีการระเหยในสุญญากาศ.....	22
2.3.2 เทคนิคการเคลือบฟิล์มโลหะในระบบสุญญากาศ .....	23
2.4 กระบวนการขึ้นเตอรของโลหะ.....	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4.1 กระบวนการซินเตอร์.....	24
2.4.2 กระบวนการซินเตอร์ของโลหะในเทคโนโลยีวงจรรวม 5 ไมโครเมตร .....	26
2.5 กระบวนการสร้างลวดลายโลหะแบบ 2 ชั้น .....	27
2.6 ความต้านทานภายในรอยสัมผัสและการวัด.....	30
2.6.1 รอยสัมผัสอินทรีย์ระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ .....	30
2.6.2 ความต้านทานรอยสัมผัส.....	33
2.6.3 ความต้านทานภายในรอยสัมผัสแบบ 2 รอยต่อ.....	35
บทที่ 3 กระบวนการโลหะในเทคโนโลยีวงจรรวมระดับ 5 ไมโครเมตร .....	37
3.1 กระบวนการสร้างลวดลายโลหะด้วยวิธีการสปีดเตอร์บนฐานรองซิลิคอนและ ซิลิคอนไดออกไซด์ขั้นตอนการอบครั้งแรก.....	37
3.1.1 กระบวนการโลหะด้วยวิธีการสปีดเตอร์บนฐานรองซิลิคอน.....	37
3.1.2 ผลการดำเนินการศึกษาเงื่อนไขของการเคลือบฟิล์มอลูมิเนียมซิลิคอนลงแผ่น ซิลิคอนไดออกไซด์.....	44
3.2 กระบวนการสร้างฟิล์มโลหะด้วยวิธีการระเหยในสุญญากาศบนฐานรองซิลิคอนและ ซิลิคอนไดออกไซด์ .....	45
3.2.1 กระบวนการโลหะด้วยวิธีการระเหยในสุญญากาศบนฐานรองซิลิคอน .....	45
3.2.2 ผลการดำเนินการศึกษาเงื่อนไขของการเคลือบฟิล์มอลูมิเนียมบริสุทธิ์ลงแผ่น ซิลิคอนไดออกไซด์.....	47
3.3 การออกแบบลวดลายโลหะแบบ 1 ชั้นในเทคโนโลยีวงจรรวมระดับ 5 ไมโครเมตร.....	48
3.4 กระบวนการสร้างลวดลายโลหะแบบ 2 ชั้น .....	56
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง .....	62
4.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายและทางไฟฟ้าของฟิล์มโลหะ .....	62
4.1.1 อัตราการเกิดฟิล์มโลหะด้วยวิธีการสปีดเตอร์.....	63
4.1.2 ความเรียบของฟิล์มโลหะ.....	67
4.1.3 สภาพความต้านทานของฟิล์มโลหะอลูมิเนียมซิลิคอน .....	70
4.1.4 การทำให้เกิดลวดลายฟิล์มโลหะอลูมิเนียมซิลิคอน.....	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในวงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

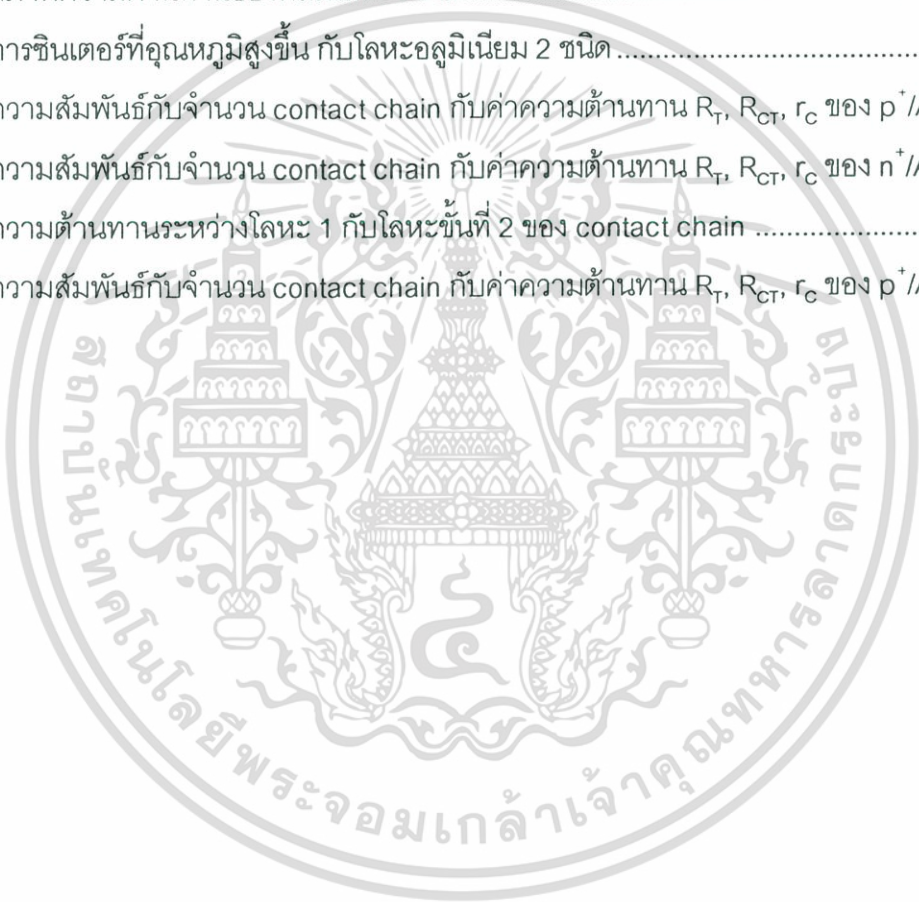
## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2 การเชื่อมต่อทางไฟฟ้าของรอยต่อระหว่างโลหะกับซิลิคอนแบบ 1 ชั้น .....	73
4.2.1 ค่าความถี่ระหว่างรอยต่อกับสารกึ่งตัวนำ $p^+$ กับฐานรองชนิด $n$ .....	75
4.2.2 ผลของการซินเตอร์กับรอยสัมผัสโอห์มมิก.....	76
4.2.3 ความต้านทานภายในรอยสัมผัสของ contact chain .....	80
4.2.3 ค่าความจุไฟฟ้ากับความสัมพันธ์ของซิลิคอนไดออกไซด์ระหว่างโลหะ อลูมิเนียมกับสารกึ่งตัวนำ.....	86
4.3 การเชื่อมต่อทางไฟฟ้าของโลหะแบบ 2 ชั้น.....	88
4.3.1 ความต้านทานภายในที่ via hole ระหว่างโลหะชั้นที่ 1กับโลหะชั้นที่ 2 .....	90
4.2.3 ค่าความจุไฟฟ้ากับความสัมพันธ์ของซิลิคอนไดออกไซด์ระหว่างโลหะชั้นที่ 1 กับโลหะชั้นที่ 2 .....	93
4.4 ผลของกระบวนการสร้างฟิล์มโลหะด้วยวิธีการระเหยในสุญญากาศ .....	95
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	99
เอกสารอ้างอิง .....	102
ภาคผนวก ก.....	104
ภาคผนวก ข.....	111
ภาคผนวก ค.....	121
ประวัติผู้เขียน.....	127

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 จุดหลอมเหลว (melting point) และสภาพความต้านทาน (resistivity) .....	22
3.1 เงื่อนไขการสับเตอร์ Al-Si ในการทดลอง.....	40
3.2 เงื่อนไขของวิธีการระเหยในสุญญากาศของฟิล์ม Al ในการทดลอง .....	46
4.1 เงื่อนไขการสับเตอร์ ฟิล์ม Al-Si และค่า Reflectance (%) .....	68
4.2 สภาพความต้านทานของฟิล์มโลหะ Al-Si .....	71
4.3 การขึ้นเตอรที่อุณหภูมิสูงขึ้น กับโลหะอลูมิเนียม 2 ชนิด .....	79
4.4 ความสัมพันธ์กับจำนวน contact chain กับค่าความต้านทาน $R_T$ , $R_{CT}$ , $r_C$ ของ $p^+/Al$ .....	84
4.5 ความสัมพันธ์กับจำนวน contact chain กับค่าความต้านทาน $R_T$ , $R_{CT}$ , $r_C$ ของ $n^+/Al$ .....	85
4.6 ความต้านทานระหว่างโลหะ 1 กับโลหะชั้นที่ 2 ของ contact chain .....	92
4.7 ความสัมพันธ์กับจำนวน contact chain กับค่าความต้านทาน $R_T$ , $R_{CT}$ , $r_C$ ของ $p^+/Al$ .....	98



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผ่นเวเฟอร์ชนิดเอ็นทำความสะอาดแล้ว .....	6
2.2 สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO <sub>2</sub> )หนา 50nm .....	6
2.3 แพร่สารเจือโบรอน และทำการขบลิ๊กเพื่อสร้างบ่อแยกชนิดพี(P-well).....	7
2.4 การกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อเปิดช่อง.....	7
2.5 แพร่สารเจือโบรอนสร้าง Nch stop .....	7
2.6 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีครั้งที่ 3(mask 3: Pch locos กับ Pch stop ) .....	8
2.7 แพร่สารเจือฟอสฟอรัส(P <sup>+</sup> )สร้าง Pch stop .....	8
2.8 สร้างชั้น Locos ที่ความหนาซิลิคอนไดออกไซด์ 850nm.....	8
2.9 การสร้างโพลีซิลิคอนด้วยกระบวนการ LPCVD .....	9
2.10 กระบวนการ ion implantion เพื่อสร้าง NSD .....	9
2.11 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีครั้งที่ 6 (mask : PSD mask ).....	9
2.12 กระบวนการ ion implantation เพื่อสร้างชั้น PSD.....	10
2.13 การสร้างชั้นฟอสฟอรัสซิลิเกตกลาส(PSG)ด้วยกระบวนการ LP-CVD.....	10
2.14 การสร้างชั้นอลูมิเนียม(AI) ด้วยกระบวนการสปีดเตอร์ .....	10
2.15 วงจรรวมแบบซีมอสระดับ 5 ไมโครเมตรที่สมบูรณ์.....	11
2.16 ขั้นตอนทางฟิสิกส์ของการสปีดเตอร์ริงของอนุภาค .....	12
2.17 การเกิดโกลด์ดีดิสซาร์ทชนิดต่างๆที่เปลี่ยนแปลงกับค่ากระแสดีดิสซาร์ท .....	13
2.18 บริเวณการเกิดแถบมืดและแถบสว่างของ abnormal glow discharge .....	14
2.19 ระบบสปีดเตอร์ A คือข้าวนาโน Tคือ เป้าเคลื่อนสวาร(target) .....	15
2.20 โครงสร้างทางฟิสิกส์ของระบบสปีดเตอร์ .....	16
2.21 ลักษณะการเกิด dark space ที่สภาวะต่างๆ .....	16
2.22 แบบจำลองการเกิด D.C. diode sputtering .....	17
2.23 ระบบสปีดเตอร์แบบความถี่วิทยุ .....	18
2.24 ภาคตัดขวางของ planar magnetron sputtering source .....	20
2.25 อัตราการตกผลึกที่สัมพันธ์กับกำลังงานที่ใช้ในการสปีดเตอร์สำหรับ ระบบ planar magnetron sputtering .....	21
2.26 หลักการเคลือบฟิล์มโลหะฟิล์มโลหะด้วยวิธีการระเหยในสุญญากาศ .....	21
2.27 โครงสร้างของเครื่อง filament evaporator .....	23

เอกสารนี้ 2.27 โครงสร้างของเครื่อง filament evaporator ที่เขาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วย  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.28 ลักษณะของไส้ที่ใช้ในการระเหยต่างๆ .....	24
2.29 รอยต่อไอหิมิกก่อนการซินเตอร์.....	24
2.30 รอยต่อไอหิมิกเมื่อได้รับการซินเตอร์.....	25
2.31 การเกิดอลูมิเนียมสไปค์และทำให้รอยต่อ พี-เอ็นแบบตันเกิดลัดวงจร.....	25
2.32 กระบวนการซินเตอร์ของโลหะโดยใช้ความร้อน.....	26
2.33 วงจรรวมแบบซีมอสในระดับ 5 ไมโครเมตรแบบ 1 ชั้น.....	27
2.34 การสร้าง ซิลิคอนไดออกไซด์ ด้วยกระบวนการ PECVD.....	27
2.35 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี เคลือบน้ำยาไวแสง.....	27
2.36 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี และการถ่ายมาร์ค( mask: via hole).....	28
2.37 การกัด ซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยวิธี wet etching.....	28
2.38 การสร้างฟิล์มโลหะชั้นที่ 2 ด้วยวิธีการสปัตเตอร์.....	28
2.39 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี การเคลือบน้ำยาไวแสง.....	29
2.40 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี เป็นการถ่ายมาร์ค(mask: metal 2).....	29
2.41 วงจรรวมแบบซีมอส ระดับ 5 ไมโครเมตรแบบ 2 ชั้น.....	29
2.42 ไดอะแกรมแถบพลังงานในอุดมคติของรอยต่อโลหะ-สารกึ่งตัวนำเมื่อ $\phi_m < \phi_s$ .....	31
2.43 ไดอะแกรมแถบพลังงานในอุดมคติของรอยสัมผัสไอหิมิกของโลหะสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น .	32
2.44 ไดอะแกรมแถบพลังงานของรอยต่อสารกึ่งตัวนำเข้มข้นชนิดเอ็นกับโลหะ.....	32
2.45 รอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ.....	33
2.46 ความต้านทานรอยสัมผัสจากทางทฤษฎีและการทดลองเป็นความสัมพันธ์กับการได้ป.....	34
2.47 ความต้านทานภายในแบบ 2 รอยต่อ.....	35
3.1 Sputtering system diagram ของเครื่อง SPE-210 diode sputtering system.....	37
3.2 ระบบการสปัตเตอร์แบบ อาร์เอฟไดโอด .....	38
3.3 แผนภาพภายใน chamber ของเครื่องสปัตเตอร์.....	39
3.4 Panel of RF Generator .....	41
3.5 Panel of Pump Switch, Ionizing Gauge and Heater .....	41
3.6 ภาพถ่ายฟิล์มอลูมิเนียมซิลิคอนที่เคลือบ .....	44
3.7 โครงสร้างของเครื่อง filament evaporation .....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 3.8 เครื่องเคลือบฟิล์มโลหะแบบระเหยในสุญญากาศ..... 47  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.9 ภาพถ่ายฟิล์มอลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่เคลือบ.....	48
3.10 มิติของขนาดของ contact chain .....	49
3.11 กระบวนการสร้างลวดลายโลหะ contact chain ในแมสก์แรก	
(ก) การเตรียมแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ (ข) สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ .....	49
(ค) เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวกในกระบวนการ โฟโตลิโทกราฟี	
(ง) ฉายแสงเปิดช่องน้ำยาไวแสงชนิดบวกในแมสก์ที่ 1 .....	50
3.12 กระบวนการสร้าง contact chain ที่ถูกได้ปด้วยสารเจือโบรอน	
(ก) Develop สร้างลวดลายบนน้ำยาไวแสง	
(ข) กัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เปิดรูเพื่อจะแพร่สารเจือ	
(ค) แพร่สารเจือโบรอน สร้างชั้นสารกึ่งตัวนำ p <sup>+</sup>	
(ง) สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เคลือบบนแผ่นเวเฟอร์.....	51
3.13 กระบวนการสร้าง contact chain ที่ในแมสก์ที่ 2	
(ก) กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก	
(ข) ฉายแสงเปิดช่องน้ำยาไวแสงชนิดบวก ในแมสก์ที่ 2.....	52
(ค) Develop สร้างลวดลายบนน้ำยาไวแสง	
(ง) Develop สร้างลวดลายบนน้ำยาไวแสง .....	53
3.14 กระบวนการสร้าง contact chain ที่ในแมสก์ที่ 3	
(ก) สร้างชั้นฟิล์มโลหะอลูมิเนียม.....	53
(ข) กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก	
(ค) ฉายแสงเปิดช่องน้ำยาไวแสงชนิดบวก ในแมสก์ที่ 3	
(ง) Develop สร้างลวดลายบนน้ำยาไวแสง .....	54
3.15 ภาพตัดขวาง contact chain ที่สมบูรณ์ .....	55
3.16 ภาพถ่ายด้านบนของ contact chain จากกล้องไมโครสโคป.....	55
3.17 กระบวนการสร้างลวดลายโลหะแบบ 2 ชั้น ในแมสก์ที่ 1	
(ก) แผ่นเวเฟอร์ ชนิดเอ็นทำความสะอาดแล้ว	
(ข) สร้างชั้น ซิลิคอนไดออกไซด์ หนา 500 nm.....	56
(ค) สร้างชั้น อลูมิเนียม ด้วยวิธีการสปัตเตอร์	
(ง) กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี ด้วย แมสก์ 1 .....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ก่อนหน้านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านกาว  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.18 กระบวนการสร้างลวดลายโลหะแบบ 2 ชั้น ในแมสก์ที่ 2	
(ก) Develop สร้างลวดลายขึ้นบนน้ำยาไวแสง	
(ข) กัดชั้น metal 1 สร้างลวดลายโลหะ.....	57
(ค) สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ลงบนโลหะด้วยวิธีการสปัตเตอร์	
(ง) กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี ด้วย แมสก์ 2 .....	58
3.19 กระบวนการสร้างลวดลายโลหะแบบ 2 ชั้น ในแมสก์ที่ 3	
(ก) Develop สร้างลวดลายขึ้นบนน้ำยาไวแสง	
(ข) กัดชั้น ซิลิคอนไดออกไซด์ เปิดรู via hole.....	59
(ค) สร้างชั้นโลหะอลูมิเนียมชั้นที่ 2 ด้วยวิธีการสปัตเตอร์	
(ง) กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี แมสก์ 3.....	60
3.20 ภาพตัดขวางลวดลายโลหะแบบ 2 ชั้นในแบบ contact chain ที่สมบูรณ์ .....	60
3.21 ภาพถ่ายด้านบนของ ลวดลายโลหะแบบ 2 ชั้น จากกล้องไมโครสโคป .....	61
4.1 फिल्मโลหะอลูมิเนียมที่ได้จากการสปัตเตอร์.....	63
4.2 ภาพตัดขวางชั้นฟิล์มโลหะตามเงื่อนไขสปัตเตอร์ที่ กำลังงานไฟฟ้า 100 W เวลา30นาที.....	64
4.3 ภาพตัดขวางชั้นฟิล์มโลหะตามเงื่อนไขสปัตเตอร์ที่ กำลังงานไฟฟ้า 150 W เวลา30นาที.....	64
4.4 ภาพตัดขวางชั้นฟิล์มโลหะตามเงื่อนไขสปัตเตอร์ที่ กำลังงานไฟฟ้า 200 W เวลา30นาที.....	65
4.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของศูนย์เครื่องมือคณะวิทยาศาสตร์.....	65
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงาน RF และอัตราการสปัตเตอร์.....	66
4.7 ภาพถ่ายเครื่องมือวัดความเรียบของฟิล์มโลหะ TFM-120 .....	67
4.8 รูปถ่ายภายในห้องสปัตเตอร์ ที่แก้ปัญหาอุณหภูมิของแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์เย็นตัว .....	69
4.9 फिल्मโลหะอลูมิเนียมที่ทำการถ่ายจากเครื่องด้วย SEM อัตราขยาย 20000 เท่า .....	69
4.10 फिल्मโลหะอลูมิเนียม ที่สร้างที่ความดัน $2 \times 10^{-3}$ บาร์ ถ่ายด้วย SEM อัตราขยาย 20000 เท่า ที่ชั่วอาโนดมีอุณหภูมิสูง $50^{\circ}\text{C}$ .....	70
4.11 ภาพถ่ายเครื่องวัดสภาพความต้านทาน.....	71
4.12 ลวดลายฟิล์มโลหะ Al-Si หลังการกัดสองด้วยกล้อง จุลทรรศน์ อัตราขยาย 400 เท่า.....	72
4.13 การเปิด ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เพื่อทำการแพร่สารเจือ .....	73
4.14 เปิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อทำเป็นรู contact.....	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 Contact chain ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์ ถ่ายจากกล้องไมโครสโคป .....	74
4.16 ความลึกของรอยต่อของสารเจือ $p^+$ .....	75
4.17 ภาพถ่ายเครื่องมือการวัดการกระจายความต้านทาน.....	76
4.18 กราฟแสดงคุณลักษณะกระแสและแรงดัน ที่อุณหภูมิซินเตอร์ 320 °C.....	77
4.19 กราฟแสดงคุณลักษณะกระแสและแรงดัน ที่อุณหภูมิซินเตอร์ 350 °C.....	77
4.20 กราฟแสดงคุณลักษณะกระแสและแรงดัน ที่อุณหภูมิซินเตอร์ 380 °C.....	78
4.21 กราฟแสดงคุณลักษณะกระแสและแรงดัน ที่อุณหภูมิซินเตอร์ 400 °C.....	78
4.22 ภาพตัดขวาง ของ contact chain .....	80
4.23 กราฟคุณลักษณะกระแสและแรงดัน 2 รอยต่อ.....	80
(ก) จำนวน contact chain ที่ 1 chain กับ 2 contact ของ $n^+/Al$ .....	81
(ข) จำนวน contact chain ที่ 1 chain กับ 2 contact ของ $p^+/Al$ .....	81
4.24 กราฟคุณลักษณะกระแสและแรงดัน 280 รอยต่อ.....	82
(ก) จำนวน contact chain ที่ 140 chain กับ 280 contact ของ $n^+/Al$ .....	82
(ข) จำนวน contact chain ที่ 140 chain กับ 280 contact ของ $p^+/Al$ .....	83
4.25 กราฟคุณลักษณะกระแสและแรงดัน 480 รอยต่อ.....	83
(ก),(ข) จำนวน contact chain ที่ 240 chain กับ 480 contact ของ $n^+/Al, p^+/Al$ .....	83
4.26 ภาพถ่ายด้านบนของ pad แบบ contact ขนานเพื่อลดความต้านทานในรอยสัมผัส.....	84
4.27 ภาพการวัดตัวเก็บประจุเพื่อหาค่าความจุไฟฟ้า.....	86
4.28 กราฟแสดงคุณลักษณะของค่าความจุไฟฟ้าต่อแรงดันของตัวเก็บประจุระหว่าง $p^+/Al$ .....	87
4.29 กราฟแสดงคุณลักษณะของค่าความจุไฟฟ้าต่อแรงดันของตัวเก็บประจุระหว่าง $n^+/Al$ .....	87
4.30 ภาพตัดขวางของลวดลายโลหะแบบ 2 ชั้นในแบบ contact chain ที่สมบูรณ์.....	88
4.31 การกัดลวดลายโลหะโดยใช้สารละลาย $H_3PO_4:HNO_3:CH_3COOH:H_2O$ .....	89
4.32 เปิดร่อง contact hole .....	89
4.33 Contact chain แบบ 2 ชั้นที่สมบูรณ์.....	90
4.34 กราฟแสดงคุณลักษณะของกระแสและแรงดัน ของ 1 chain 2 contact.....	91
4.35 กราฟแสดงคุณลักษณะของกระแสและแรงดัน ของ 140 chain 280 contact.....	91
4.36 กราฟแสดงคุณลักษณะของกระแสและแรงดัน ของ 240 chain 480 contact.....	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.37 ภาพการวัดตัวเก็บประจุเพื่อหาค่าความจุไฟฟ้า.....	93
4.38 กราฟแสดงคุณลักษณะของความจุไฟฟ้าต่อแรงดันของตัวเก็บประจุระหว่าง AI 1/AI 2 .....	94
4.39 फिल्मโลหะอลูมิเนียมบริสุทธิ์ ด้วยวิธีการระเหยในสุญญากาศ.....	95
4.40 ภาพตัดขวางของฟิล์มอลูมิเนียมบริสุทธิ์ ถ่ายด้วยเครื่อง SEM .....	96
4.41 กราฟคุณลักษณะกระแสและแรงดัน 2 รอยต่อ ของ $n^+/AI$ .....	97
4.42 กราฟคุณลักษณะกระแสและแรงดัน 480 รอยต่อ ของ $n^+/AI$ .....	97
ข. ภาพตัดขวางของกระบวนการสร้างวงจรรวม CMOS .....	112
ค.1 ภาพด้านบนของแมสก์ทั้งหมดที่ใช้ทำตัวเก็บประจุ $n^+$ และ $p^+$ กับโลหะชั้นที่ 1 .....	122
ค.2 ภาพของแมสก์ใช้สร้างตัวเก็บประจุทั้งหมด 3 แมสก์ .....	122
ค.3 ภาพด้านบนของแมสก์ทั้งหมดที่ใช้ทำตัวเก็บประจุระหว่างโลหะชั้นที่ 1 กับโลหะชั้นที่ 2 .....	123
ค.4 ภาพของแมสก์ใช้สร้างตัวเก็บประจุทั้งหมด 3 แมสก์ .....	123
ค.5 ภาพรวมด้านบนของแมสก์ contact chain ทั้งหมดระหว่างชั้น $p^+/AI$ .....	124
ค.6 แมสก์ที่ 1(แมสก์ได้ป)ของ contact chain มีขนาดพื้นที่ต่อช่อง $15 \times 35 \mu m$ .....	124
ค.7 แมสก์ที่ 2(แมสก์ contact)ของ contact chain มีขนาดพื้นที่ต่อช่อง $5 \times 5 \mu m$ .....	125
ค.8 แมสก์ที่ 3(แมสก์ metal)ของ contact chain มีขนาดพื้นที่ต่อช่อง $15 \times 35 \mu m$ .....	125
ค.9 ภาพรวมด้านบนของแมสก์ contact chain ทั้งหมดระหว่างชั้น $m1/m2$ .....	126
ค.10 แมสก์ที่ 1(แมสก์ metal 1)ของ contact chain มีขนาดพื้นที่ต่อช่อง $15 \times 35 \mu m$ .....	126
ค.11 แมสก์ที่ 2(แมสก์ via)ของ contact chain มีขนาดพื้นที่ต่อช่อง $5 \times 5 \mu m$ .....	127
ค.12 แมสก์ที่ 3(แมสก์ metal 2)ของ contact chain มีขนาดพื้นที่ต่อช่อง $15 \times 35 \mu m$ .....	127

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ศัพท์เทคนิค

ภาษาไทย	ภาษาอังกฤษ
กระบวนการโลหะ	metallization
กระบวนการระเหยในสุญญากาศ	evaporation
กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี	photolithography
กระบวนการสปัตเตอร์	sputtering
กล้องจุลทรรศน์	microscope
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด	scanning electron microscope
การฝังประจุแบบไอออน	ion implantation
การให้ความร้อนกับรอยสัมผัส	sintering
การทะลุผ่านรอยสัมผัสของโลหะ	spiking
การแพร่สารเจือ	diffusion
การออกซิเดชันด้วยความร้อน	thermal oxidation
การออกแบบลวดลาย	layout design
การสกัดแบบเปียก	wet etching
การสกัดแบบแห้ง	dry etching
การกัดโลหะ	metal etching
การขึ้นลวดลาย	developer
การเคลือบด้วยสปินเนอร์	spinner coating
การฉายแสง	exposure
การเตรียมผิวหน้า	surface preparation
กำลังงานของขดลวด	power filament
การปรับชั้นมาสก์	mask alignment
กำลังงาน อาร์ เอฟ	power RF
ก๊าซอาร์กอน	Ar
ขั้วคาโทด	cathode
ขั้วแอโนด	anode
เครื่องมือวัดการกระจายความต้านทาน	spreading resistance measurement
ความจุไฟฟ้า	capacitance

เอกสารคำให้การสะท้อนของฟิล์มสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา reflectance อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ศัพท์เทคนิค

ภาษาไทย	ภาษาอังกฤษ
ค่าความต้านทาน	resistance
ครอบแก้วทรงระฆังคว่ำ	Bell jar
ความต้านทานในรอยสัมผัส	contact resistance
ไดโอดสปัตเตอร์	diode sputtering
ตัววัดความดันต่ำ	ionization gauge
ตัวเก็บประจุ	capacitor
พรี-สปัตเตอร์	pre-sputter
ฟิล์มโลหะ	metal film
ปั๊มดูดอากาศ	rotary pump
ปั๊มสุญญากาศ	diffusion pump
ความดันต่ำ	low vacuum
ความดันฐาน	base pressure
ความดันในการทำงาน	operating pressure
รอยสัมผัสลูกโซ่	contact chain
ระบบหล่อเย็น	water cooling
รอยสัมผัส	contact
ลวดลายแบบ 2 ชั้น	two layer
เวลาในการหล่อเย็น	cool down time
สภาพความต้านทาน	resistivity
แหล่งจ่ายก๊าซ	gas supply
ห้องสปัตเตอร์	sputtering chamber
อัตราการกัด	etching rate
อัตราการเกิดฟิล์ม	deposition rate
อัลตราโซนิค	ultra sonics
ออกซิเดชัน	oxidation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตวงจรรวมได้ถูกพัฒนาไปอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะขนาดของวงจรรวมซึ่งมีขนาดเล็กลงอย่างมาก และรอยต่อของชั้นพีและเอ็นมีความลึกน้อยกว่า 1 ไมครอน ในส่วนของเทคโนโลยีโลหะนั้นจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อวงจรรวมได้ถูกสร้างขึ้นเรียบร้อยแล้วจำเป็นต้องมีเส้นลวดโลหะหรือขาลโลหะต่อ ออกไปสู่วงจรรายนอกเพื่อเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสร้างรอยสัมผัส(contact)ระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำที่เป็นส่วนต่างๆของวงจรรวม ซึ่งรอยสัมผัสของสารกึ่งตัวนำกับโลหะในลักษณะนี้ปกติจะมีคุณสมบัติเป็น"รอยสัมผัสโอห์มิก"กล่าวคือจะไม่มีผลเกี่ยวข้องกับทิศทางการไหลของกระแสโดยกระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้ทั้งสองทิศทาง

สำหรับกระบวนการโลหะในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้เทคโนโลยีวงจรรวมระดับ 5 ไมครเมตร เทคโนโลยีวงจรรวมระดับ 5 ไมครเมตร หมายถึง ระยะที่เล็กที่สุดจะมีค่า 5 ไมครเมตร ซึ่ง บริเวณรอยสัมผัสเชื่อมต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำจึงมีขนาดเล็กที่สุดคือ 5x5 ตารางไมครเมตร เมื่อพื้นที่บริเวณรอยสัมผัสมีขนาดเล็กเป็นผลให้ความต้านทานภายในรอยสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้เกิดปัญหาการนำไฟฟ้าบริเวณรอยสัมผัสของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำไม่ดีเท่าที่ควร จากปัญหาดังกล่าวเราได้ทำการสร้างฟิล์มโลหะที่มีคุณสมบัติทางกายภาพและทางไฟฟ้าที่ดีเพื่อนำมาออกแบบเป็นความต้านทาน 2 รอยต่อในโครงสร้างของ contact chain เพื่อใช้หาความต้านทานภายในรอยสัมผัสที่เหมาะสมกับเทคโนโลยีโลหะของวงจรรวมระดับ 5 ไมครเมตร ซึ่งจะได้จุดเชื่อมต่อที่เป็นรอยสัมผัสโอห์มิกที่ดี

นอกจากนี้แล้วรอยสัมผัสโอห์มิกที่ดีจะต้องมีความต้านทานต่ำแต่เนื่องมาจากผิวของสารกึ่งตัวนำมักจะมีชั้นของออกไซด์บางๆปกคลุมอยู่ระหว่างชั้นของโลหะและชั้นสารกึ่งตัวนำจึงถูกแยกจากชั้นฉนวนออกไซด์ในกรณีเช่นนี้จะทำให้รอยสัมผัสมีค่าความต้านทานสูงจึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งานเพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว หลังจากสร้างชั้นโลหะบนผิวซิลิคอนที่มีความหนาแน่นอะตอมสารเจือเกิดเป็นรอยสัมผัส จากนั้นจึงนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงค่าหนึ่งเพื่อให้อะตอมของโลหะสามารถแพร่ผ่านออกไซด์บางและเข้าไปในชั้นสารกึ่งตัวนำได้ จะทำให้รอยสัมผัส โอห์มิกที่ดีมีค่าความต้านทานต่ำ วิธีการเช่นนี้ถูกเรียกว่า"การแอนนีย์ล" (Annealing)

แต่เนื่องจากในปัจจุบันความลึกของชั้นพีเอ็นมีความลึกน้อยกว่า 1 ไมครอนเมื่อมีการแอนนีย์ลเข้าไปอะตอมของอูมิเนียมที่แพร่ลึกเข้าไปในส่วนp+ และn+มักไม่สม่ำเสมอทำให้เกิดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านนี้ ไม่นับญาติให้นำไปเผยแพร่ในวงวิชาการใดๆ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีส่วนเล็กตื้นไม่เท่ากัน เกิดเป็นปลายแหลมเล็กหรือเรียกว่า”สไปค์” (spiking) ซึ่งส่วนที่เป็นสไปค์ อาจลึกลงไปถึงบริเวณรอยสัมผัสพีเอ็นที่มีขนาดตื้นเหล่านี้ได้ ทำให้เกิดความเสียหายชั้นบริเวณ รอยสัมผัสเพราะถูกลัดวงจร

เมื่อวงจรมีขนาดเล็กลงพื้นที่ของรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำมีพื้นที่หน้าสัมผัส ที่เล็กลงตามไปด้วย ผลของความต้านทานบริเวณรอยสัมผัสของรอยต่อโลหะกับสารกึ่งตัวนำมีค่า เพิ่มขึ้นเกิดเป็นรอยสัมผัสโอห์มิกที่ไม่ดีทำให้ประสิทธิภาพของวงจรรวมลดน้อยลงในส่วน ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการพัฒนากการสร้างฟิล์มโลหะด้วยวิธีสปีดเตออร์ กับวิธีการระเหยใน สูญญากาศ โดยเฉพาะวิธีการสปีดเตออร์จะใช้วัสดุอลูมิเนียมที่มีซิลิคอนผสมอยู่ 2% โดยน้ำหนัก (Al-Si (wt2%)) ซิลิคอน 2 เปอร์เซ็นต์จะทำให้อลูมิเนียมเกิดการยึดติดด้วย ซิลิคอนช่วยลดปัญหา การเกิดสไปค์ ทั้งนี้วิธีการสปีดเตออร์ยังสามารถควบคุมความหนาในแนวราบได้ดีมากและ เหมาะสมที่จะใช้กับเทคโนโลยีวงจรรวมในปัจจุบัน การสร้างฟิล์มโลหะทั้งสองวิธีที่ได้กล่าวมานั้น ได้นำมาวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและไฟฟ้าของฟิล์มโลหะ สร้างเป็นรอยสัมผัสโอห์มิกและ หาความต้านทานภายในรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ โดยใช้อุณหภูมิในการแอนนัลที่ เหมาะสมที่สุดในการทำให้สารกึ่งตัวนำกับโลหะยึดติดกันได้ดีและมีรอยสัมผัสโอห์มิกความ ต้านทานต่ำ

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. พัฒนาระบบการผลิตโลหะของวงจรรวมระดับ 5 ไมโครเมตรในประเทศไทย
2. ปรับปรุงกระบวนการโลหะที่ได้ทำการศึกษาให้มีความเหมาะสมกับเครื่องมือที่มีอยู่ ภายในห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์
3. ศึกษาและทำความเข้าใจในขั้นตอนการสร้างฟิล์มโลหะของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ด้วย เทคนิคการสร้างฟิล์มโลหะแบบ วิธีการสปีดเตออร์
4. การพัฒนาระบบการสร้างฟิล์มโลหะด้วยวิธีสปีดเตออร์ โดยใช้วัสดุอลูมิเนียมที่มี ซิลิคอนผสมอยู่ 2% (Al-Si (wt 2%))โดยน้ำหนัก
5. วิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้า และทางกายภาพของฟิล์มโลหะและตัวแปรต่างๆที่ เกี่ยวข้องในการสร้างฟิล์มโลหะ เช่น อัตราการเกิดฟิล์มโลหะ ความเรียบของฟิล์มโลหะ สภาพความต้านทานของฟิล์มโลหะ รวมถึงการทำให้เกิดลวดลายบนฟิล์มโลหะ
6. สร้างลวดลายโลหะอลูมิเนียมเพื่อทดสอบการนำไฟฟ้าและจุดเชื่อมต่อของฟิล์มโลหะ เพื่อใช้ทดสอบหาความต้านทานภายในรอยสัมผัสของรอยสัมผัสแบบโอห์มิก
7. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างฟิล์มโลหะกับอุณหภูมิความร้อนที่ให้กับฟิล์มโลหะค่าหนึ่ง ที่สามารถทำให้ฟิล์มโลหะสามารถยึดติดกับสารกึ่งตัวนำได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา ผู้ที่นำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัสอินทรีย์ วัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของรอยสัมผัสที่ออกแบบเป็น contact chain
9. วิเคราะห์การเชื่อมต่อและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโลหะแบบ 2 ชั้น

### 1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

1. การสร้างฟิล์มโลหะด้วยวิธีการสเปคโตรสามารถควบคุมความหนาและความราบเรียบของฟิล์มโลหะ
2. การสร้างฟิล์มโลหะอลูมิเนียมที่มีซิลิคอนผสมอยู่ 2% โดยน้ำหนักเป็นการช่วยลดปัญหาของการเกิดส่วนลึกลงที่ไม่เท่ากันของอะตอมอลูมิเนียมหลังจากกระบวนการแอนนیلที่เรียกว่า สไปค
3. รอยสัมผัสอินทรีย์ที่ดีจะต้องเป็นรอยสัมผัสที่มีความต้านทานต่ำและไม่มีผลเกี่ยวข้องกับทิศทางการไหลของกระแส
4. เมื่อพื้นที่ของรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำมีพื้นที่ลดลงผลของความต้านทานภายในสัมผัสจะมีค่าเพิ่มขึ้น
5. การสร้างชั้นโลหะแบบ 2 ชั้นเป็นการลดระยะของเส้นลวดลายโลหะให้วงจรรวมมีขนาดลดลง
6. เมื่อเพิ่มจำนวนทางเดินกระแส(contact) ในรอยสัมผัสระหว่างโลหะอลูมิเนียมกับ สารกึ่งตัวนำจะทำให้ความต้านทานภายในรอยสัมผัสลดลง

### 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย

ในเทคโนโลยีการผลิตวงจรรวม กระบวนการโลหะก็เป็นหนึ่งในกระบวนการผลิตวงจรรวมซึ่งในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีเกี่ยวกับกระบวนการโลหะ ซึ่งจะทำการศึกษาตั้งแต่การสร้างฟิล์มโลหะที่ดีเพื่อช่วยลดปัญหาของการเกิดการทะลุผ่านรอยต่อหรือที่เรียกว่า "สไปค" และศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มโลหะที่จะนำมาใช้ในกระบวนการโลหะของวงจรรวมเช่น สภาพความต้านทานของฟิล์มโลหะและความราบเรียบของฟิล์มโลหะเป็นต้น และนำฟิล์มที่ได้มาสร้างรอยสัมผัสอินทรีย์ระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นรอยสัมผัสที่ไม่มีผลเกี่ยวข้องกับทิศทางการไหลกระแสซึ่งกระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้ทั้งสองทิศทางและมีความต้านทานภายในรอยสัมผัสที่ต่ำ และทำการศึกษการสร้างกระบวนการโลหะแบบ 2 ชั้น ซึ่งจะช่วยลดปัญหาของเส้นทางเดินของกระแสที่ยาวและมีจำนวนมากในการเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายในวงจรรวมซึ่งเป็นผลทำให้พื้นที่ของวงจรรวมมีค่ามากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงเทคโนโลยีวงจรรวมในระดับ 5 ไมโครเมตร ซึ่งจะเน้นไปที่กระบวนการโลหะสำหรับวงจรรวมในระดับ 5 ไมโครเมตรเริ่มตั้งแต่เทคโนโลยีการสร้างฟิล์มโลหะ โดยจะใช้เทคโนโลยีการสร้างฟิล์มโลหะที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์มีอยู่ และทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มโลหะทั้งกายภาพและทางไฟฟ้าตั้งแต่การสร้างฟิล์มโลหะโดยใช้วัสดุ 2 ชนิด คือ วัสดุอลูมิเนียมบริสุทธิ์ กับวัสดุอลูมิเนียมที่มีซิลิคอนผสมอยู่ 2% โดยน้ำหนัก วัสดุแต่ละชนิดก็จะใช้วิธีการสร้างฟิล์มแต่ละอย่างคือ วิธีการระเหยในสุญญากาศ (evaporation) กับวิธีการสปัตเตอร์ (sputtering) นำฟิล์มที่ได้มาสร้างลวดลายโลหะขนาด 5 ไมโครเมตร รวมถึงสร้างเป็นรอยสัมผัสโหนดมีความสัมพันธ์ทางไฟฟ้าระหว่างรอยสัมผัสของโลหะกับสารกึ่งตัวและทำการศึกษาปัจจัยต่างๆที่จะทำให้รอยสัมผัสโหนดเป็นรอยสัมผัสที่ดี เช่น อุณหภูมิกับเวลาในการแอนนัล เป็นต้น

## 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาเทคโนโลยีวงจรรวมระดับ 5 ไมโครเมตร
2. ศึกษากระบวนการโลหะของวงจรรวมระดับ 5 ไมโครเมตร
3. ศึกษาการใช้เครื่องมือในกระบวนการโลหะของห้องศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์
4. ศึกษากระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์
5. ศึกษากระบวนการโฟโตลิโธกราฟี
6. ศึกษากระบวนการแพร่อะตอมสารเจือโบรอนและฟอสฟอรัส
7. ศึกษากระบวนการสร้างฟิล์มโลหะด้วยวิธีการสปัตเตอร์ (sputtering) และวิธีการระเหยในสุญญากาศ (evaporation)
8. ศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มโลหะจากเงื่อนไขของวิธีการสปัตเตอร์ เช่น อัตราการเกิดฟิล์มโลหะ ความเรียบของฟิล์มโลหะและสภาพความนำไฟฟ้าของฟิล์มโลหะ
9. ศึกษาการสร้างลวดลายโลหะด้วยวิธีการกัดฟิล์มโลหะโดยใช้สารละลายหรือที่เรียกว่าการกัดแบบเปียก (wet etching)
10. ศึกษากระบวนการสร้างลวดลายโลหะแบบ 1 ชั้นในเทคโนโลยีวงจรรวมระดับ 5 ไมโครเมตร
11. ศึกษาความต้านทานภายในรอยสัมผัสโหนดระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ
12. ศึกษาการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำแบบ 1 ชั้น
13. ศึกษากระบวนการสร้างลวดลายโลหะแบบ 2 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยเนื้อหาในวิทยานิพนธ์จะแบ่งเป็นบทต่างๆตามรายละเอียดดังนี้

บทที่ 1 บทนำ เป็นการกล่าวถึงประเด็นของปัญหา วัตถุประสงค์ สมมุติฐาน ขั้นตอนการศึกษาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เพื่อทำความเข้าใจภาพรวมทั้งหมดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 เทคโนโลยีวงจรรวม จะกล่าวถึง ทฤษฎีกระบวนการสร้างวงจรรวมระดับ 5 ไมโครเมตรในประเทศไทยและกล่าวถึงทฤษฎีและเทคโนโลยีโลหะโดยรวม เช่น กระบวนการโลหะด้วยวิธีการสปัตเตอร์ กระบวนการโลหะด้วยวิธีการระเหยในสุญญากาศ กระบวนการสร้างลวดลายโลหะแบบ 2 ชั้นและความต้านทานภายในรอยสัมผัสและการวัดเป็นต้น

บทที่ 3 กระบวนการโลหะในเทคโนโลยีวงจรรวมระดับ 5 ไมโครเมตร กล่าวถึงกระบวนการสร้างฟิล์มโลหะด้วยวิธีการต่างๆของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์และการออกแบบลวดลายโลหะแบบ 1 ชั้นกับกระบวนการสร้างลวดลายโลหะแบบ 2 ชั้น

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง กล่าวถึง การทดลองต่างๆในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เพื่อเป็นการศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มโลหะทั้งทางไฟฟ้าและทางกายภาพ รวมถึงการทดลองที่เกี่ยวกับการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าของรอยต่อโลหะกับสารกึ่งตัวนำแบบ 1 ชั้นเพื่อใช้หาความต้านทานภายในรอยสัมผัสของรอยสัมผัสไอทีเอ็มซีที่ออกแบบเป็น contact chain และผลของการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าของโลหะแบบ 2 ชั้น ซึ่งจะหาความต้านทานภายในที่ via hole ระหว่างโลหะชั้นที่ 1 กับโลหะชั้นที่ 2

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ เป็นการสรุปผลการทดลอง ที่ได้จากบทที่ 4 โดยนำผลการทดลองทั้งหมดมาสรุปเพื่อให้ผลการทดลองที่ได้เกิดความชัดเจนขึ้นและรวมไปถึงข้อเสนอแนะเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ด้วย

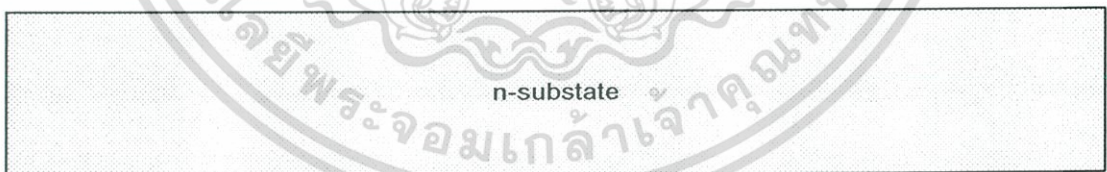
## บทที่ 2

# เทคโนโลยีวงจรรวม

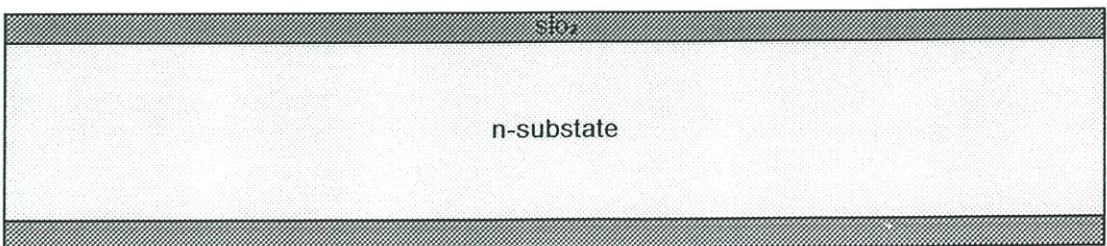
### 2.1 เทคโนโลยีวงจรรวมระดับ 5 ไมโครเมตรในประเทศไทย

การพัฒนาเทคโนโลยีวงจรรวมระดับ 5 ไมโครเมตร เป็นงานวิจัยที่ได้รับการสนับสนุนเงินทุนวิจัยจากรัฐบาลกับ สำนักงานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ซึ่งเป็นงานวิจัยที่ทำร่วมกันระหว่างศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (ERC) และศูนย์วิจัยเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนากระบวนการย่อยของการสร้างวงจรรวมแบบซีมอสระดับ 5 ไมโครเมตร แต่ละกระบวนการ เช่น กระบวนการ ion implantation, กระบวนการ diffusion และ thermal oxidation , กระบวนการ lithography , กระบวนการ chemical vapor deposition กระบวนการ metallization, กระบวนการออกแบบและวิเคราะห์ รวมทั้งการจำลองวงจรรวม เป็นต้นเพื่อความรู้ความเข้าใจเทคโนโลยีของกระบวนการสร้างวงจรรวมแต่ละกระบวนการย่อย [1-5]

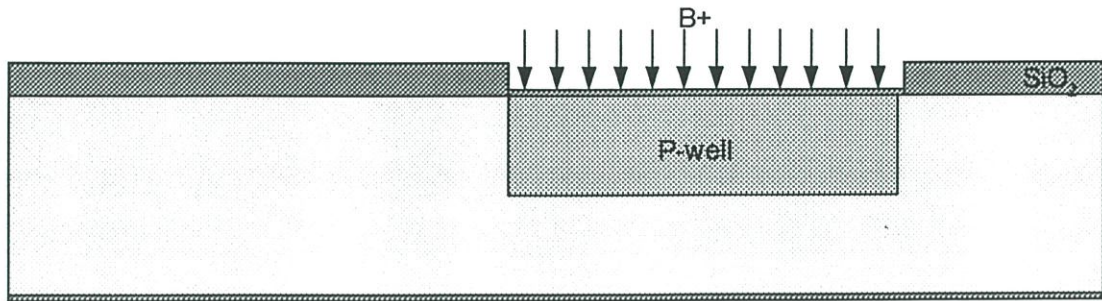
โดยเฉพาะกระบวนการโลหะที่เป็นกระบวนการหลักในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้และเป็นกระบวนการหลังสุดในการสร้างจุดเชื่อมต่อออกไปสู่วงจรรายนอกเพื่อเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกที่จะนำไปใช้งานต่อไป ดังนั้นในการผลิตวงจรรวมจึงควรทำความเข้าใจกระบวนการทั้งหมดในกระบวนการผลิตวงจรรวม แต่เพื่อให้เข้าใจได้ง่ายจึงจะแสดงขั้นตอนตามกระบวนการผลิตวงจรรวมเป็นแผนภาพไว้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.1 แผ่นเวเฟอร์ชนิดเอ็นทำความสะอาดแล้ว

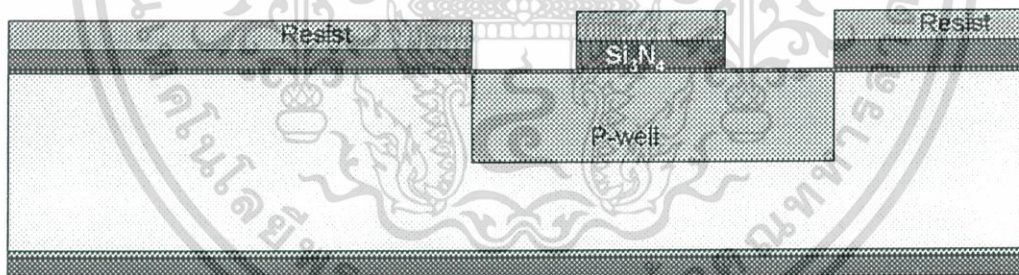


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 2.2 สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>)หนา 50nm  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

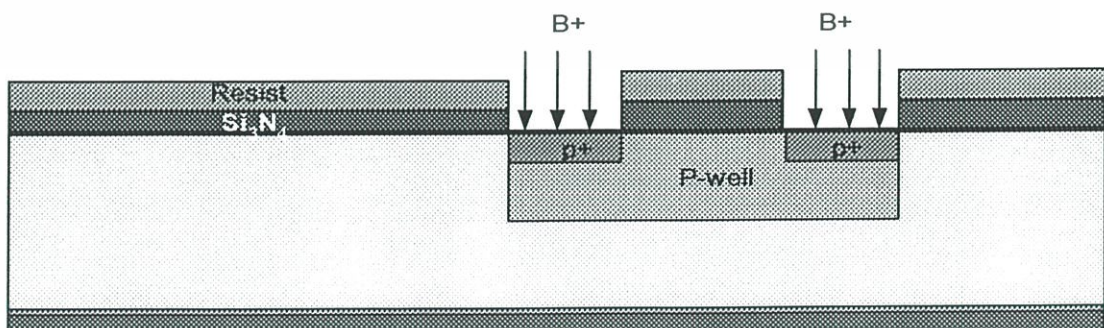


รูปที่ 2.3 แพร่สารเจือโบรอน และทำการขั้บลึกเพื่อสร้างบ่อแยกชนิดพี(P-well)

กระบวนการสร้างวงจรรวมระดับ 5 ไมโครเมตร เริ่มจากการเตรียมแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ชนิดเอ็นที่ทำความสะอาดเรียบร้อยแล้วมาเข้าสู่กระบวนการออกซิเดชัน เพื่อสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนา 500 nm ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และเข้าสู่กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี เพื่อสร้างลวดลายของ แมสก์ 1 ซึ่งเป็น P-well mask ทำการสกัดชั้น ซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อเปิดช่องออกไซด์แล้วจึงสร้างซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนาประมาณ 50 nm เพื่อป้องกันพื้นผิวด้านบนเวเฟอร์ในการทำกระบวนการ ion implantation ซึ่งจะทำกรยิงอะตอมสารเจือโบรอนเพื่อสร้างเป็นบ่อ P-well ดังแสดงในรูปที่ 2.3

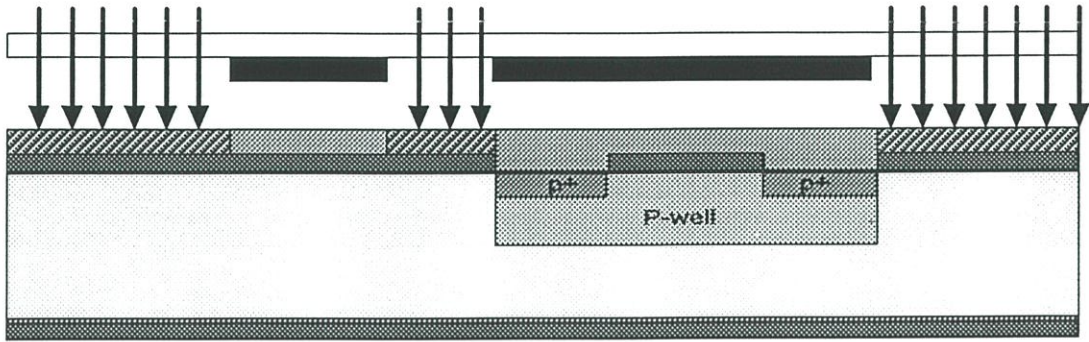


รูปที่ 2.4 การสกัดชั้นซิลิคอนไนไตรด์เพื่อเปิดช่อง



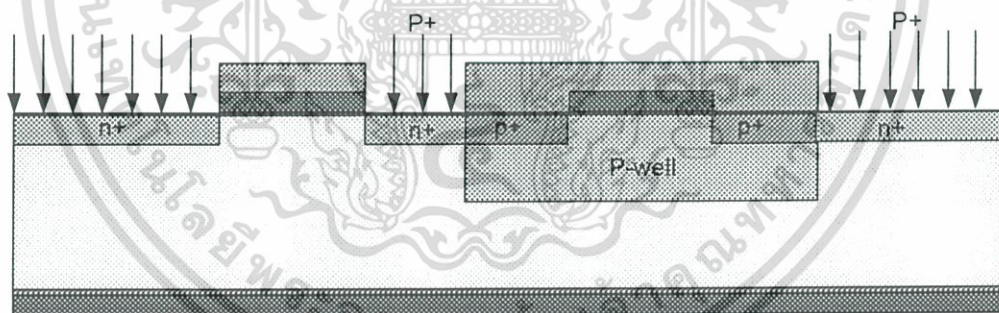
รูปที่ 2.5 แพร่สารเจือโบรอนสร้าง Nch stop

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

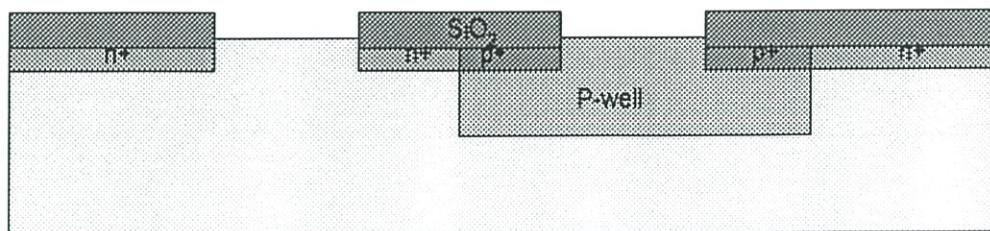


รูปที่ 2.6 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีครั้งที่ 3(mask 3: Pch Locos กับ Pch stop )

หลังจากสร้างบ่อ P-well แล้ว จึงทำการสร้างชั้นฟิล์มบางซิลิคอนไนไตรด์ ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) ที่มีความหนา 100 nm ด้วยกระบวนการ CVD และทำการเปิดแมสก์ ที่ 2 (Nch Locos & Nch stop) สกัดชั้นซิลิคอนไนไตรด์ เพื่อเปิดช่องด้วยกระบวนการ dry etching ดังแสดงในรูปที่ 2.4 แล้วเข้าสู่กระบวนการ ion implantation เพื่อเติมสารเจืออะตอมโบรอนความเข้มข้นสูงสร้างเป็นชั้น p<sup>+</sup> และเป็น Nch stop ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ขั้นตอนต่อมาเป็นกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีเป็นการเปิด แมสก์ ที่ 3 (Pch Locos & Pch stop) อีกครั้งหนึ่งเพื่อเปิดช่องซิลิคอนไนไตรด์ด้วยกระบวนการ dry etching ดังแสดงในรูปที่ 2.6

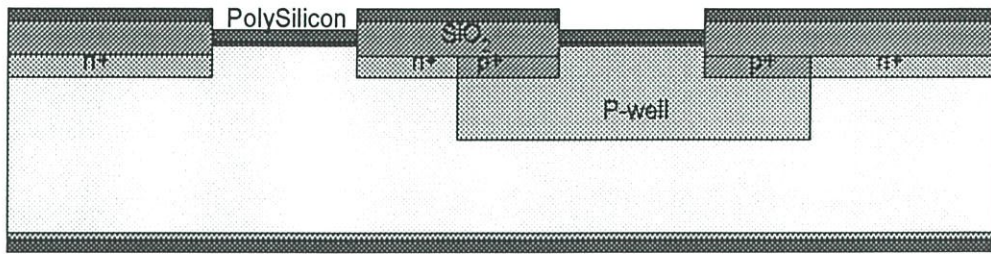


รูปที่ 2.7 แพร่สารเจือฟอสฟอรัส(P<sup>+</sup>)สร้าง Pch stop



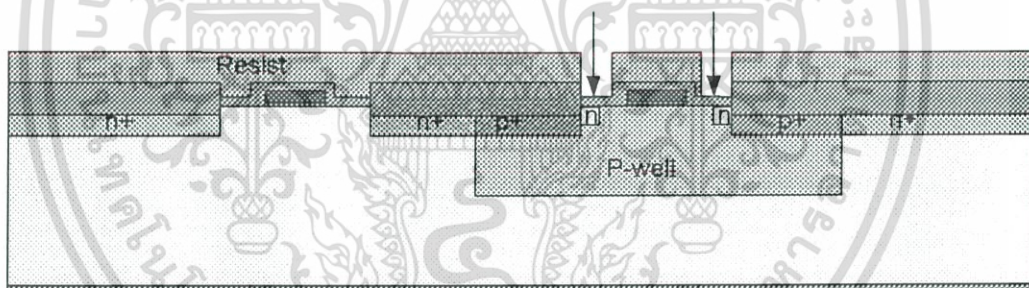
รูปที่ 2.8 สร้างชั้น Locos ที่ความหนาซิลิคอนไดออกไซด์ 850nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

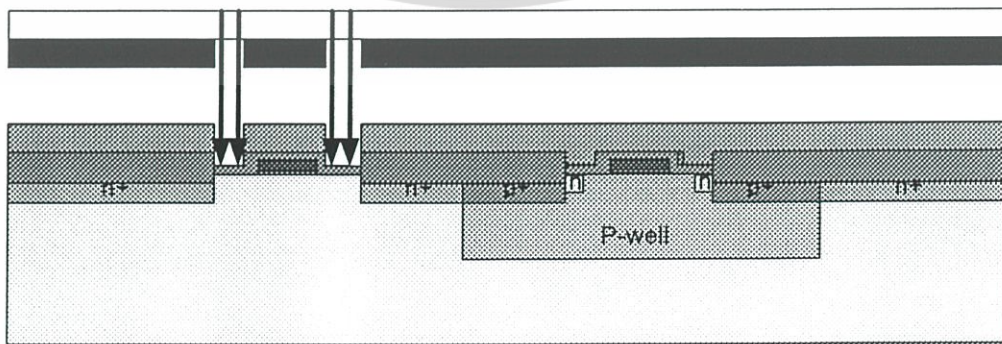


รูปที่ 2.9 การสร้างโพลีซิลิคอนด้วยกระบวนการ LPCVD

หลังจากเปิดช่องซิลิคอนไนไตรด์ออกแล้วสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หนา 50 nm ซึ่งช่วยป้องกันพื้นผิวด้านบนซิลิคอนเวเฟอร์แล้วทำการยิงอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสความเข้มข้นสูงซึ่งอยู่ในกระบวนการ ion implantation สร้างชั้น n+ เพื่อทำเป็น Pch stop ดังแสดงในรูป 2.7 และสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บางกับซิลิคอนไนไตรด์ออกทั้งหมด ขั้นตอนต่อมาสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หนา 850 nm ด้วยกระบวนการ thermal oxidation สร้างเป็นชั้น Locos โดยการลอกชั้นออกไซด์ออกด้วยกระบวนการสกัดแบบเปียก ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ในขั้นตอนต่อมาจึงทำการสร้างชั้น โพลีซิลิคอนความหนา 450 nm ด้วยวิธีการ LPCVD ดังแสดงในรูปที่ 2.9

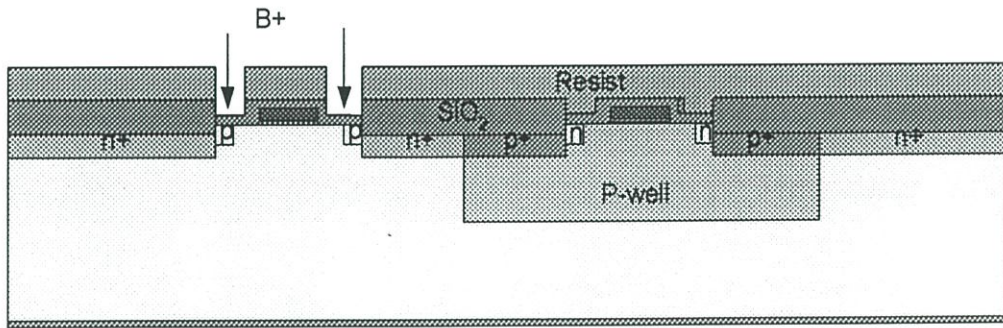


รูปที่ 2.10 กระบวนการ ion implantion เพื่อสร้าง NSD



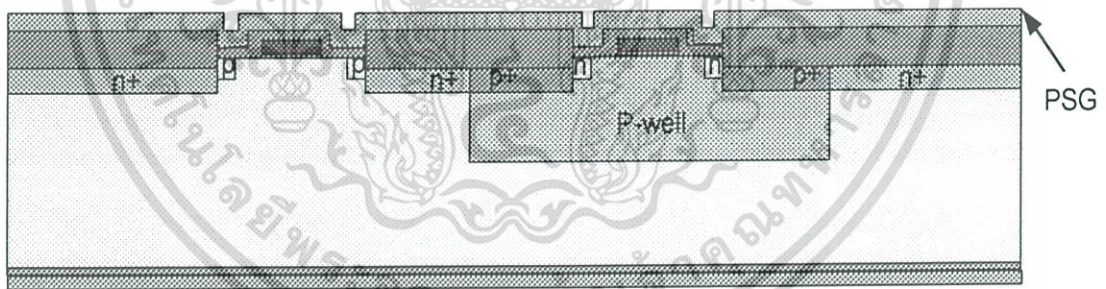
รูปที่ 2.11 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี ครั้งที่ 6 (mask : PSD mask)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปเผยแพร่หรือนำไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

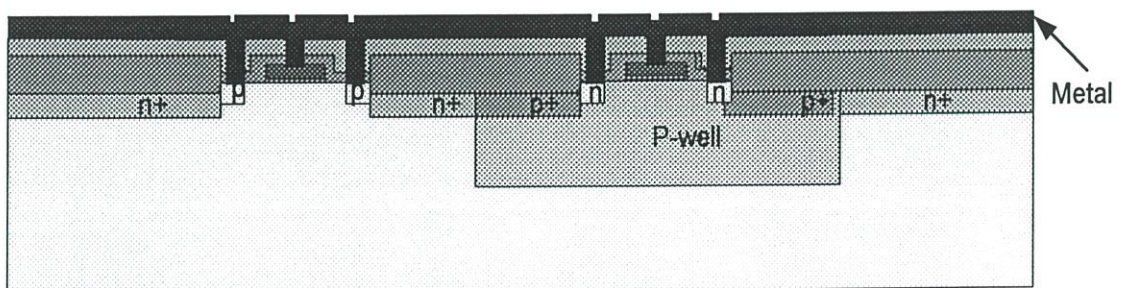


รูปที่ 2.12 กระบวนการ ion implantation เพื่อสร้างชั้น PSD

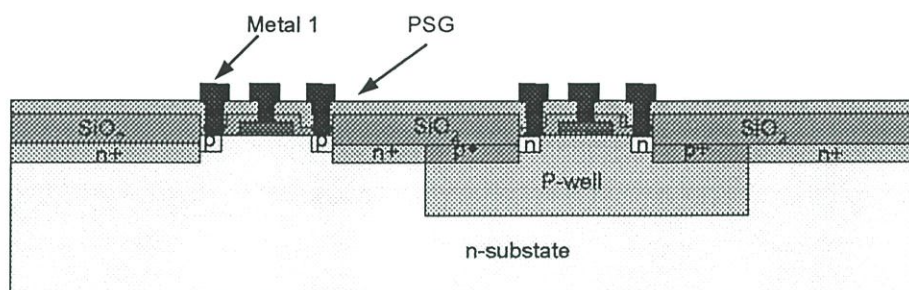
กระบวนการต่อมาเป็นกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี ครั้งที่ 4 ซึ่งเป็น polysilicon mask แล้วทำการสกัดชั้น โพลีซิลิคอนออกด้วยกระบวนการ dry etching (RIE) สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หนา 70 nm ด้วยกระบวนการ thermal oxidation แบบ dry oxidation นำซิลิคอนเวเฟอร์ที่ได้มาเปิดแมสก์ 5 ซึ่งเป็น แมสก์ NSD แล้วทำการเติมอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการ ion implantation ดังแสดงในรูปที่ 2.10 เพื่อสร้างชั้น NSD ลงในบ่อ P-well ขั้นตอนต่อมาทำการเปิด แมสก์ 6 (PSD mask) เติมอะตอมสารเจือโบรอนสร้างชั้น PSD ด้วยกระบวนการ ion implantation ดังแสดงในรูปที่ 2.11 กับ 2.12



รูปที่ 2.13 การสร้างชั้นฟอสฟอรัสซิลิเกตเตกกลาส(PSG)ด้วยกระบวนการ LP-CVD



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายกเว้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**รูปที่ 2.14 การสร้างชั้นอลูมิเนียม(AI) ด้วยกระบวนการสปีดเตออร์**  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 วงจรรวมแบบซีมอสระดับ 5 ไมโครเมตรที่สมบูรณ์

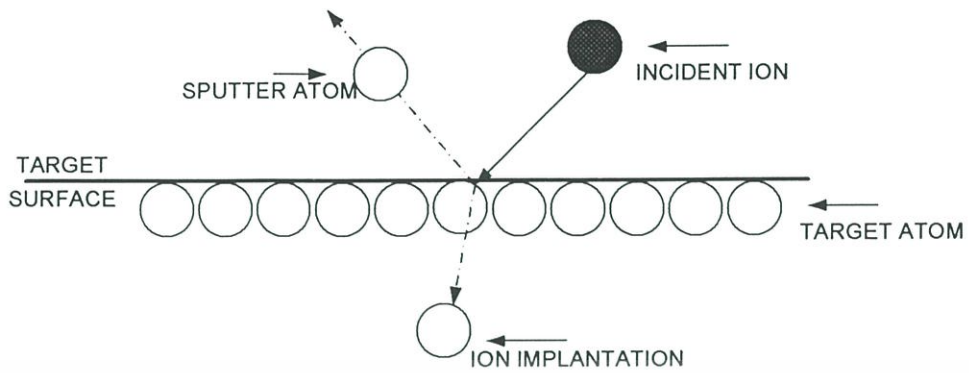
กระบวนการต่อมาเป็นการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บางประมาณ 100 nm โดยใช้กระบวนการ LP\_CVD ต่อมาได้สร้างชั้นฟอสฟอรัส ซิลิเกตกลาส (PSG) ที่มีความหนา 500 nm ด้วยกระบวนการ LP-CVD ดังแสดงในรูปที่ 2.13 แล้วทำการเปิดแมสก์ 7 (contact window) ด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี แล้วทำการสกัดชั้น PSG และชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อเปิดช่องต่อมาสสร้างชั้นอลูมิเนียมที่มีความหนา 500 nm ด้วยวิธีการสปัตเตอร์ตามเงื่อนไขการสปัตเตอร์ ดังนี้คือ ความดันภายในห้อง chamber  $5-7 \times 10^{-7}$  bar ความดันขณะทำงาน  $2-5 \times 10^{-3}$  bar ในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอน ซึ่งฟิล์มที่ได้มีลักษณะเป็นมันวาวและเงางามเหมือนกระจกดังแสดงในรูป 2.14 หลังจากนั้นเข้าสู่กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีครั้งที่ 8 (metal mask) สกัดชั้นอลูมิเนียมออกเพื่อทำเป็นขั้วโลหะที่เดรน เกท และซอส ดังแสดงในรูปที่ 2.15

## 2.2 กระบวนการโลหะด้วยวิธีการสปัตเตอร์

### 2.2.1 การสปัตเตอร์

การสปัตเตอร์ คือ เมื่อผิวของแข็งถูกชน (bombarded) ด้วยอนุภาคที่มีพลังงาน เช่น อะตอมของแข็งที่มีความเร็วที่เกิดจากการชนของอนุภาคระหว่างอะตอมในพื้นผิวและอะตอมที่มีพลังงานดังแสดงในรูป 2.16 ปรากฏการณ์นี้จะเรียกว่า "back-sputtering" หรือเรียกง่าย ๆ ว่า "spluttering" เมื่อเป้าถูกชนด้วยอนุภาคที่มีพลังงาน (ความเร็ว) อนุภาคที่จะเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในเป้านี้ จะเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า "transmission-spluttering" [6-10]

คำว่า "spluttering" จะเป็นรากศัพท์ของคำว่า "sputtering" ที่ให้ความหมายเดียวกับ "cathode sputtering", "cathode disintegration" และ "impact vaporation"



รูปที่ 2.16 ขั้นตอนทางฟิสิกส์ของการสputtering ของอนุภาค

### 2.2.2 หลักการพลาสมา

การดิสชาร์จของก๊าซในกระบวนการสputtering ซึ่งเป็นการศึกษาที่ diode gas discharge tube ของค่าแรงดันต่ำสุดที่ไม่เกิดการดิสชาร์จ ซึ่งก็คือ แรงดันพังทลายหรือแรงดันที่เกิดการ spark voltage  $V_s$  โดยที่

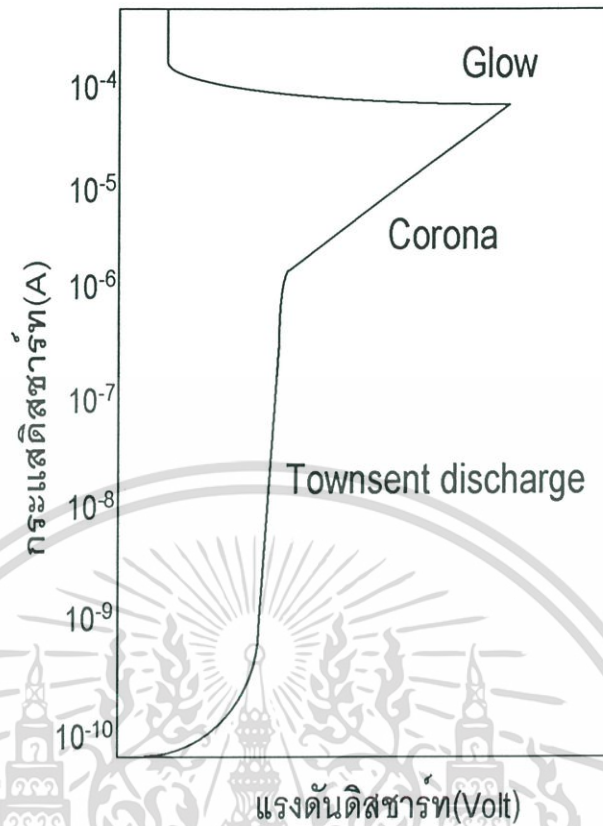
$$V_s = a \frac{pl}{\log pl + b} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $P$  คือความดันก๊าซ  $l$  คือ ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด โดยที่  $a$  และ  $b$  เป็นค่าคงที่ ความสัมพันธ์ระหว่าง spark voltage  $V_s$  และแรงดัน  $P$  จะเป็นไปตามกฎของ Pasche's law ผลดังกล่าวจะแสดงในรูป 2.17 ซึ่งจะแสดงค่าที่เกิด spark voltage ต่ำสุด ที่แรงดัน  $P_m$

โดยทั่วไปในระบบสputtering จะรักษาความดันให้ต่ำกว่า  $P_s$  เพื่อเริ่มให้เกิดการดิสชาร์จ ค่าความดันของก๊าซ  $P_s$  จะขึ้น อยู่กับระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด

$$P_s = \frac{\lambda_o}{l} \quad (2.2)$$

เมื่อค่า  $\lambda_o$  คือค่า mean free path ของอิเล็กตรอนในอนุภาคก๊าซดิสชาร์จจะเริ่มเกิดที่ความดันต่ำ ด้วยการป้อนกระแสตรงผ่านตัวต้านทานไฟฟ้าที่มีค่าสูง ซึ่งมีอยู่หลายช่วงการเกิดดังแสดงในรูป 2.17



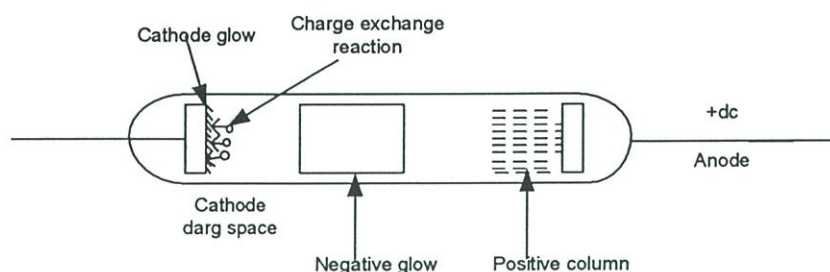
รูปที่ 2.17 การเกิดโกลด์ดีสชาร์จชนิดต่างๆที่เปลี่ยนแปลงกับค่ากระแสดีสชาร์จ

การเกิดการดีสชาร์จในช่วงความหนาแน่นกระแสต่ำกว่า  $0.1 \text{ mA/cm}^2$  จะเกิดการดีสชาร์จแบบเรืองแสงจะเกิดขึ้นใกล้ขั้วอากาศ เป็นจำนวนมาก ซึ่งจะทำให้เกิด space charge ที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งไม่มีความสำคัญต่อโกลด์ดีสชาร์จมากนัก

การเกิดดีสชาร์จในช่วงกระแสสูงกว่า  $1.1 \text{ mA/cm}^2$  จะเกิดดีสชาร์จแบบเรืองแสงจะเกิดขึ้นใกล้ขั้วคาโธด ซึ่งการเกิดโกลด์ดีสชาร์จในเงื่อนไขนี้จะมีมีความสำคัญต่อ space charge มาก

หลักการไอออนไนเซชันในการดีสชาร์จก๊าซ จะเกิดขึ้นเมื่อ อิเล็กตรอนเกิดการปะทะด้วยโมเลกุลของก๊าซ ผลึกจะถูกไอออนไนเซชันและเกิดเป็นประจุบวกเกิดขึ้น พลังงานของอิเล็กตรอนควรจะมีมากกว่าพลังงานไอออนไนเซชันของโมเลกุลก๊าซ เมื่อเริ่มเกิดการดีสชาร์จอิเล็กตรอนจากขั้วคาโธดจะถูกแรงของสนามไฟฟ้าใกล้ขั้วคาโธดและพลังงานที่เกิดจากพลังงานไอออนไนเซชันของโมเลกุลของก๊าซ อิเล็กตรอนที่มีพลังงานนี้จะปะทะกับโมเลกุลก๊าซและเกิดเป็นไอออนบวกก่อนจะไปชนกับผิวคาโธด การชนของประจุบวกกับผิวคาโธดจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนอันดับสองจากผิวคาโธด การไอออนไนเซชันจนเกิดการดีสชาร์จ ดังแสดงในรูป 2.17 การดีสชาร์จจะเกิดเมื่อกระแสดีสชาร์จที่มีค่ามากกว่า  $10^9 \text{ A}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 บริเวณการเกิดแถบมืดและแถบสว่างของ abnormal glow discharge

การเกิด dark space จะเกิดที่ด้านหน้าของผิวคาโทดและในช่วงที่อิเล็กตรอนอันดับสอง ถูกเร่งจากขั้วคาโทด ความกว้างของ dark space จะแปรผันกับความดันก๊าซ  $Pd \cong \text{constant}$

ความกว้างของ dark space คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดการไอออนไนเซชัน ซึ่งจะต้องใช้อิเล็กตรอนอันดับสองที่มีค่ามากพอที่จะเกิดการดิสซาร์ท และยังเป็นตัวกำหนดความดันที่ใช้ความกว้างของ cathode dark space จะมีค่าประมาณ 2 cm (Chapman, 1980) นอกจากนี้ประจุบวกใน dark space การเรืองแสงที่เรียกว่า negative glow ในบริเวณนี้จะเริ่มเกิดเป็นไอออนบวก ( $\text{Ar}^+$ ) เกิดขึ้นในช่วง faraday dark space และ positive column จะเชื่อมโยงกับบริเวณที่เกิด negative glow ซึ่งจะเป็นพื้นที่ของสนามอิสระ

### 2.2.3 หลักการพื้นฐาน การสปัตเตอร์

การสปัตเตอร์ เป็นกระบวนการที่อะตอมผิวหน้าของวัสดุถูก ทำให้หลุดออกมาด้วยการชนของอนุภาคพลังงานสูง โดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างอนุภาค ที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิววัสดุดังกล่าว กระบวนการนี้อาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรืออนุภาคที่มีประจุก็ได้ ดังนั้นสิ่งที่จำเป็นในการสปัตเตอร์คือ

1. มีสารเคลือบเป็นเป้า (target) ให้อนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนจนมีการปล่อยอะตอมของสารเคลือบลงเคลือบบนแผ่นรองรับ

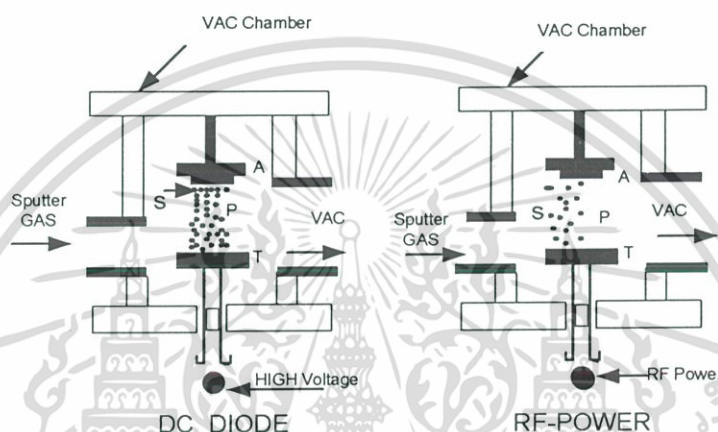
2. มีอนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบ โดยปกติอนุภาคพลังงานสูงนี้อาจจะเป็นกลางไฟฟ้า เช่น นิวตรอนหรืออะตอมของธาตุต่างๆ แต่การทำให้อนุภาคที่เป็นกลางมีพลังงานสูงระหว่าง 10 ถึง 100 อิเล็กตรอนโวลต์ เพื่อใช้ในการสปัตเตอร์ทำได้ค่อนข้างยาก จึงใช้วิธีการเร่งประจุภายใต้สนามไฟฟ้าแทน ซึ่งสามารถควบคุมระดับพลังงานของไอออนได้ตามต้องการ อิเล็กตรอนเป็นประจุไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่ย้ายต่อการผลิตและเร่งให้มีพลังงานสูงภายใต้สนามไฟฟ้าได้ แต่อิเล็กตรอนมีมวลน้อยกว่าอะตอมของเป้าสารเคลือบมาก ทำให้การถ่ายเทพลังงานและ

โมเมนตัมต่ออะตอมสารเคลือบเป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพ และไม่สามารถทำให้กระบวนการเอกสารถูกเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สปัตเตอร์เกิดขึ้นได้ ดังนั้นการชนระหว่างสองอนุภาคที่จะทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมได้ดีที่สุดเมื่อมวลของอนุภาคทั้งสองมีค่าเท่ากัน ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงเลือกการเร่งไอออนบวกของก๊าซ ( $Ar^+$ ) ในสนามไฟฟ้าเป็นอนุภาควิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบ ซึ่งทำให้อัตราการปลดปล่อยอนุภาคของสารเคลือบสูงเพียงพอกับความต้องการ

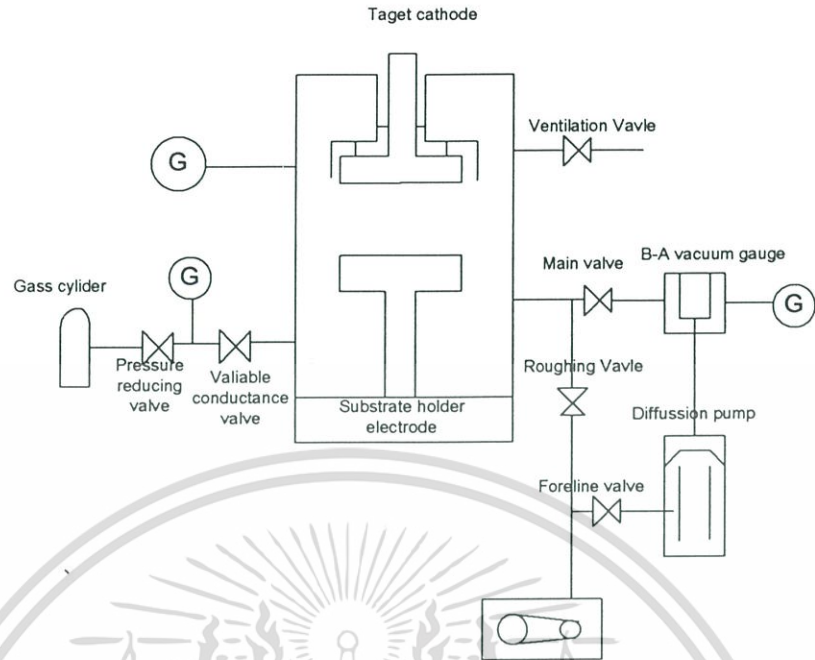
3. อนุภาคพลังงานสูงนี้ต้องถูกผลิตขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้กระบวนการเคลือบสารเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องจนได้ความหนาของฟิล์มเคลือบตามต้องการ ซึ่งสามารถทำได้โดยอาศัยกระบวนการโกลว์ดีสชาร์จ (glow discharge)



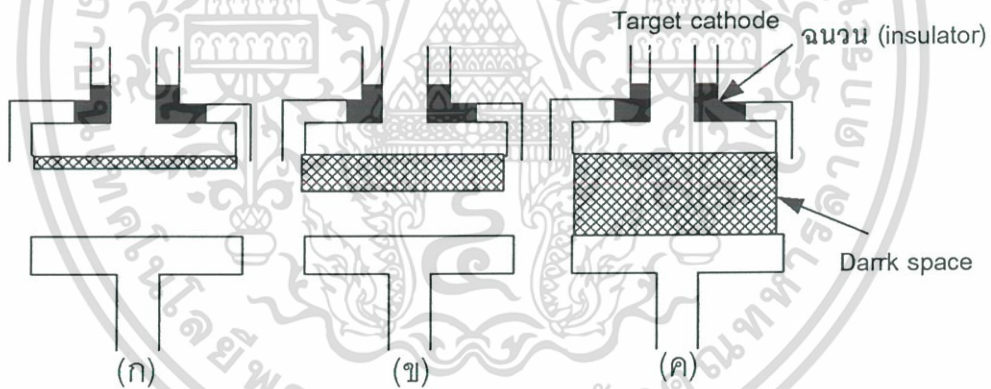
รูปที่ 2.19 ระบบสปัตเตอร์ A คือ ขั้วแอโนด T คือ เป้าเคลือบสาร (target) S คือ ฐานรองรับวัสดุสปัตเตอร์ P คือ บริเวณพลาสมา

เทคนิค สปัตเตอร์ เป็นการเคลือบสารในสุญญากาศอีกวิธีหนึ่งที่มีการใช้กันอย่างกว้างขวางในกระบวนการของการสร้างวงจรรวม สำหรับโลหะที่นิยมใช้เคลือบได้แก่ Al, Ti, Pt, Au, Mo, W, N และ Co หลักการที่ใช้ของระบบ sputtering อาจจะเป็น DC หรือ RF discharge ในระบบไดโอด ดังแสดงระบบโครงสร้างทางฟิสิกส์ไว้ในรูปที่ 2.18 ภายใน chamber ของระบบจะเป็นบรรยากาศของก๊าซเฉื่อยเช่น ก๊าซอาร์กอนที่ความดันประมาณ  $1.3 \times 10^{-2}$  Torr ซึ่ง sputter เป็นปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ที่ไฟฟ้าแรงสูงลบที่ขั้ว cathode มีสารที่ใช้เคลือบติดอยู่เกิดการดีสชาร์จระหว่าง chamber สุญญากาศกับฐานรองจะใช้ศักดาไฟฟ้ามีค่าประมาณ 2-4 KV การดีสชาร์จจะทำให้อะตอมของอาร์กอนแตกออกเป็นไอออน  $Ar^+$  และไอออนที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ด้วยความเร่งของสนามไฟฟ้า ไปกระทบกับเนื้อสารที่ขั้วคาโทดทำให้เกิดการถ่ายเทโมเมนตัมอะตอมที่อยู่ในบริเวณผิวหน้าของสารเคลือบจะเกิดการแตกผลึกและเคลือบที่ผิวฐานรอง จึงทำให้เกิดฟิล์มที่เกิดขึ้นจะมีความหนาอย่างสม่ำเสมอและปริมาณของสิ่งเจือปนจะขึ้นอยู่กับความกว้างของ dark space ดังแสดงในรูปที่ 2.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 โครงสร้างทางฟิสิกส์ของระบบสเป็คเตอร์



รูปที่ 2.21 ลักษณะการเกิด Dark space ที่สภาวะต่างๆ

(ก) ที่ความดันของก๊าซสูง (ข) ที่ความดันของก๊าซปานกลาง (ค) ที่ความดันของก๊าซต่ำ

เมื่อความกว้างของ dark space น้อยเกินไปดังรูปที่ 2.21(ก) เกิดขึ้นเนื่องจากความดันของก๊าซใน chamber มีค่ามากเกินไปจะทำให้ไอออนที่เกิดขึ้นกระทบด้านหลัง ด้านข้างของคาโธด และของ shield ทำให้เกิดสารเจือที่ไม่ต้องการมาเคลือบฐานรองด้วย แต่เมื่อ dark space กว้างเกินไปในรูปที่ 2.21(ค)เกิดขึ้นเนื่องจากความดันก๊าซใน chamber มีค่าที่ต่ำเกินไป ปฏิกิริยาดิสชาร์จในกรณีนี้จะเกิดขึ้นได้ยากและถ้าเกิดขึ้นได้จะไม่มีประสิทธิภาพ ดังนั้นการดิสชาร์จในเอกซาร์ระบบสเป็คเตอร์จึงจะขึ้นอยู่กับความดันของก๊าซ เนื้อสารที่ใช้เคลือบและระยะห่างระหว่างคาโธดกับฉนวนกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการเคลือบสารวิธีนี้จะใช้เวลานานกว่าเทคนิคอื่น แต่เหมาะสำหรับใช้ในการเคลือบสาร หลอมเหลวสูงและต้องการให้ชั้นของสารที่เคลือบมีความบางมาก ๆ ที่สามารถควบคุมได้ในขณะ เคลือบ

2.2.4 ดีซี ไดโอด สปีตเตอร์(DC Diode Sputtering)

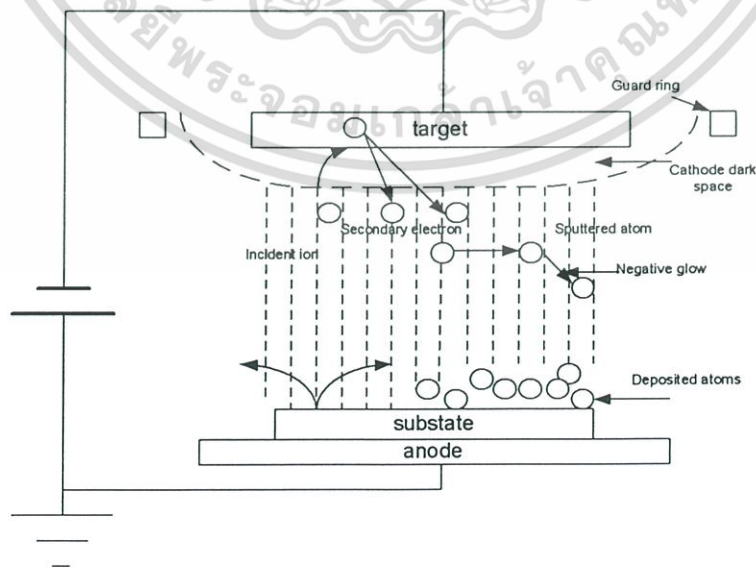
ระบบดีซี ไดโอดสปีตเตอร์จะประกอบด้วยคู่ของอิเล็กโทรดที่วางขนานกันในระบบ โดยที่ ด้านหนึ่งของอิเล็กโทรดจะเป็นขั้วคาโทดและอีกด้านหนึ่งจะเป็นขั้วแอโนด ที่ด้านบนของผิวหน้า คาโทดจะมีวัสดุเป้าครอบอยู่และอีกด้านหนึ่งของขั้วคาโทดจะหล่อเย็นด้วยน้ำ โดยที่บริเวณฐานรอง จะอยู่ที่ขั้วแอโนดเมื่อให้ความดันของก๊าซอาร์กอนเข้าภายในระบบ(chamber) อยู่ที่ 0.1 ทอร์และ ป้อนไฟกระแสตรงโดยต่ออนุกรมกับความต้านทาน 1-10 kΩ ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดมีค่าหลายกิโล โวลต์จะทำให้เกิดโกลด์ดีสชาร์จ และไอออนของ Ar ในโกลด์ดีสชาร์จจะถูกเร่งไปที่ขั้วคาโทดและ เกิดการสปีตเตอร์ที่เป้าจนทำให้เกิดการตกผลึกเป็นฟิล์มบางบนฐานรองแอโนด

ในระบบดีซี ไดโอดสปีตเตอร์ด้วยการชนของโมเลกุลก๊าซและความดันที่ก๊าซจะต้องมีค่า สูงเมื่อระยะที่อนุภาคที่ชนมีค่าน้อยกว่าระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง จำนวนอนุภาคของ ส่วนที่ตกผลึกจะอยู่บนพื้นที่ W

$$W = \frac{K_1 W_0}{pd} \tag{2.3}$$

และอัตราการตกผลึก R หาได้โดย

$$R = \frac{W}{t} \tag{2.4}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ที่ 2.22 แบบจำลองการเกิด D.C. Diode Sputtering ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $K_1$  มีค่าคงที่  $W_0$  คือจำนวนของอนุภาคที่ถูกสปีดเตอร์จากที่คาโอด p เป็นจำนวนก๊าซดิสชาร์จ d คือระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสอง  $W$  คือความหนาแน่นของฟิล์มที่ได้จากการสปีดเตอร์และ  $t$  คือเวลาที่ใช้ในการสปีดเตอร์ จำนวนของอนุภาคที่ถูกสปีดเตอร์จากพื้นของขั้วคาโอด  $W_0$  ซึ่งหาได้จาก

$$W_0 = \left(\frac{j_+}{e}\right)st\left(\frac{A}{N}\right) \quad (2.5)$$

เมื่อ  $j_+$  คือ ความหนาแน่นของกระแสที่ขั้วคาโอด

$e$  คือประจุอิเล็กตรอน

$s$  คือสัมประสิทธิ์ในการสปีดเตอร์

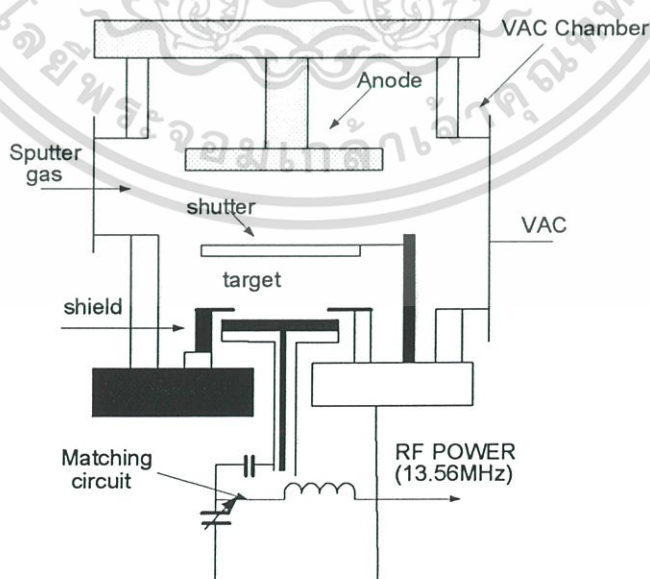
$A$  คือน้ำหนักของอะตอมของวัสดุที่ถูกสปีดเตอร์

$N$  คือค่า Avogadro's number

ด้วยข้อสันนิษฐานที่ว่ากระแสไอออนจะมีค่าเข้าใกล้ กระแสดิสชาร์จ  $I_s$  และสัมประสิทธิ์ของการสปีดเตอร์จะขึ้นอยู่กับแรงดันการดิสชาร์จ  $V_s$  จำนวนอนุภาคที่ถูกสปีดเตอร์ทั้งหมดจะมีค่าเท่ากับ  $V_s I_s t / pd$  ดังนั้นการตกผลึกจึงขึ้นอยู่กับ  $V_s I_s t$

## 2.2.5 อาร์เอฟ ไดโอดสปีดเตอร์ (RF Diode Sputtering)

ในการใช้เป้าหมายแทนที่เป้าโลหะในระบบดีซีไดโอดสปีดเตอร์นั้นการดิสชาร์จจะไม่เกิดขึ้นเพราะว่าจะเกิดประจุบวกที่ผิวหน้าของฉนวน ดังนั้นการเกิดดิสชาร์จของเป้าหมายจะต้องใช้พลังงานความถี่วิทยุแทนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งเรียกระบบนี้ว่า “ระบบคลื่นความถี่วิทยุ”



รูปที่ 2.23 ระบบสปีดเตอร์แบบความถี่วิทยุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ประโยชน์เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นหน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสเปตเตอร์ใน RF-discharge นั้น การสเปตเตอร์ในการดิสชาร์ทที่คลื่นความถี่วิทยุ ได้พบในปี 1960 พบว่าจะเกิดผิวแก้วเคลือบที่ดิสชาร์ทสเปตเตอร์ในระหว่างการเกิด RF-discharge จะให้สำหรับการสร้างผลึกของฟิล์มบางและในปัจจุบันกำลังได้รับการพัฒนาเป็นอย่างมากโดยระบบสเปตเตอร์ดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 2.23

ในระบบ อาร์เอฟสเปตเตอร์จะต้องใช้วงจร impedance-matching ที่อยู่ระหว่างแหล่งจ่ายพลังงานและ chamber

โดยทั่วไปความต้านทานของแหล่งจ่ายกำลังคลื่นความถี่วิทยุจะมีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม ค่าความต้านทานของโกลด์ ดิสชาร์ทจะอยู่ในช่วง 1 ถึง 10 กิโลโอห์มในการอาร์เอฟสเปตเตอร์ค่าความหนาแน่นของกระแสที่เป้า  $I_s$  มีค่าเท่ากับ

$$I_s \cong \frac{Cdv}{dt} \quad (2.6)$$

เมื่อ C ค่าความจุไฟฟ้าระหว่าง discharge plasma และวัสดุเป้า  $\frac{dv}{dt}$  คือค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงศักดาที่ผิวเป้าและพบว่าเมื่อเพิ่มความถี่ในการสร้างจะทำให้กระแสไอออนเป็นเป้าที่มีค่าเพิ่มขึ้นโดยในทางปฏิบัติจะใช้ความถี่เท่ากับ 13.56 MHz

การเกิดดิสชาร์ทในระบบอาร์เอฟสเปตเตอร์ความดันจะมีค่าอยู่ที่  $10^{-2}$  Torr เมื่อสนามไฟฟ้าที่มีโอกาสเกิดการชนระหว่างโมเลกุลก๊าซและอิเล็กตรอนอันดับสองจะมีค่าเพิ่มขึ้นมาก ในระบบอาร์เอฟสเปตเตอร์นั้น blocking capacitor จะต่ออยู่ระหว่างวงจร matching และเป้าซึ่งพื้นที่ของเป้าจะมีขนาดเล็กกว่าพื้นที่ของอาโนดและพื้นที่กาทอเดามากๆ โครงสร้างของการวางแบบสมมาตรของอิเล็กโตรดจะทำให้กระแสไฟตรงที่เป้ามักตกเป็นลบ ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุให้เกิดการสเปตเตอร์ในระบบอาร์เอฟ การป้อนไฟกระแสตรงจะมีค่าครึ่งหนึ่งของศักดาขั้วต่อคลื่นถึงคลื่นของแหล่งจ่ายพลังงานความถี่วิทยุสำหรับค่าสภาพความต้านทานของหน้าล่อเย็นที่ขั้วคาโรดจะต้องมีค่าสูงพอที่จะรักษาความเป็นฉนวน

### 2.2.6 แมกนีตรอนสเปตเตอร์ (Magnetron sputtering)

ตั้งแต่ปี 1960 แมกนีตรอนสเปตเตอร์ได้รับการสนใจที่นำมาสร้างฟิล์มบางอยู่น้อยมาก ความดันก๊าซที่ใช้ในการเกิดโกลด์ดิสชาร์ทจะอยู่ที่  $10^{-5}$  Torr ซึ่งจะมีค่าที่ต่ำมากกว่าการสเปตเตอร์ทั่วไปถึง 2 อันดับ ค่าของสนามแม่เหล็กที่ใช้จะมีค่าหลายร้อยเกาส์และใช้หลักการเขตปลอดประจุบวกเป็นวัสดุสำคัญในการเกิดโกลด์ดิสชาร์ท

หลักการพื้นฐานของ แมกนีตรอนสเปตเตอร์ พบว่ามาจากการใช้แท่งแม่เหล็กวางไว้ที่ขั้วคาโรดดังนั้นวัสดุเป้าจะมีทิศทางสนามแม่เหล็กครอบคลุมอยู่ภายในวัสดุเป้า วัสดุเป้าที่ใช้มีความ

หนาแน่นไม่มากนัก ดังรูปที่ 2.24 แสดงโครงสร้างของ หลาน่า แมกนีตรอนสเปตเตอร์ซึ่งประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

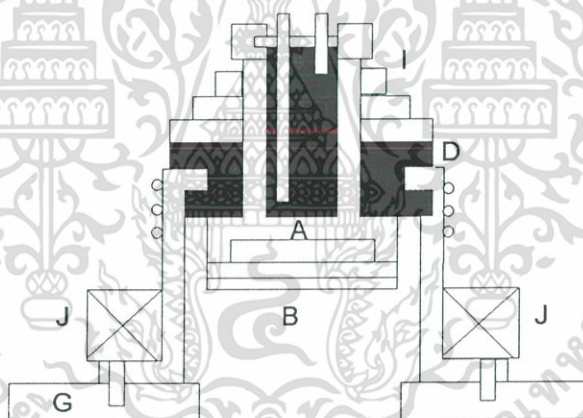
ไปด้วยระบบหล่อเย็นที่ขั้วคาโรด(A)จะทำจากทองแดงซึ่งเป็นเป้า(B)จะเป็นวัสดุปกคลุมด้านหลังทองแดงที่ง่ายต่อการติดตั้ง

ขั้วคาโรดจะทำให้เป็นฉนวนที่ทำด้วยท่ออลูมิเนียมหล่อเย็น และหุ้มด้วยเทปลอน (D) โดยที่แม่เหล็ก(J) จะติดตั้งที่ด้านนอกของอลูมิเนียม โดยที่ระบบจะถูกวางบนโลหะผสมสเตนเลส-เหล็ก (G) แรงดันที่ทำให้เกิดดิสชาร์จจะอยู่ที่ 300 ถึง 800 โวลต์ ซึ่งจะให้สัมประสิทธิ์ในการสปีดเตอร์สูงที่สุด

ระบบแมกเนตรอนสปีดเตอร์จะทำงานที่ความดัน  $10^{-3}$  ถึง  $10^{-4}$  ทอร์และจะเกิดการสปีดเตอร์ที่บริเวณดิสชาร์จโดยไม่มีการกระเจิงของอนุภาค ดังนั้นอัตราการสร้างผลึก(R) ได้จาก

$$R = \frac{KW_o}{t} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $K=1$  สำหรับระบบ planar system และ  $W_o$  จะเป็นจำนวนของอนุภาคที่ถูกสปีดเตอร์ โดยจะสัมพันธ์กับสมการที่ 2.7



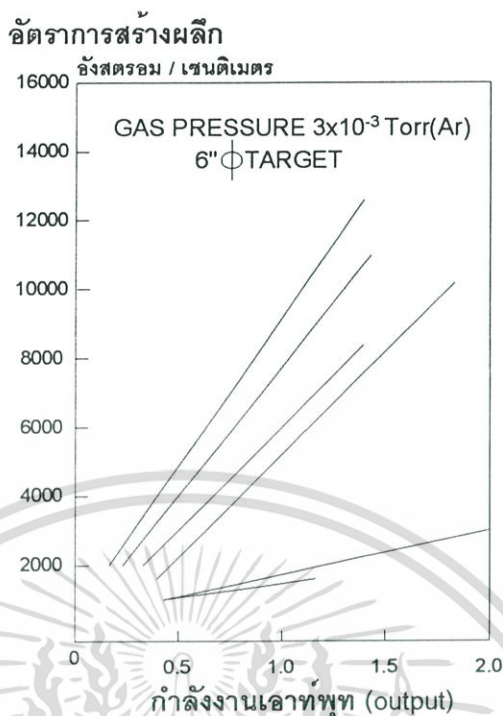
รูปที่ 2.24 ภาคตัดขวางของ planar magnetron sputtering source

โดยที่ จุด A คือ คาโรด และ จุด C คืออลูมิเนียม shield

จุด D คือ Teflon space และ จุด I,G คือ stainless-stell

จุด J คือ แม่เหล็ก

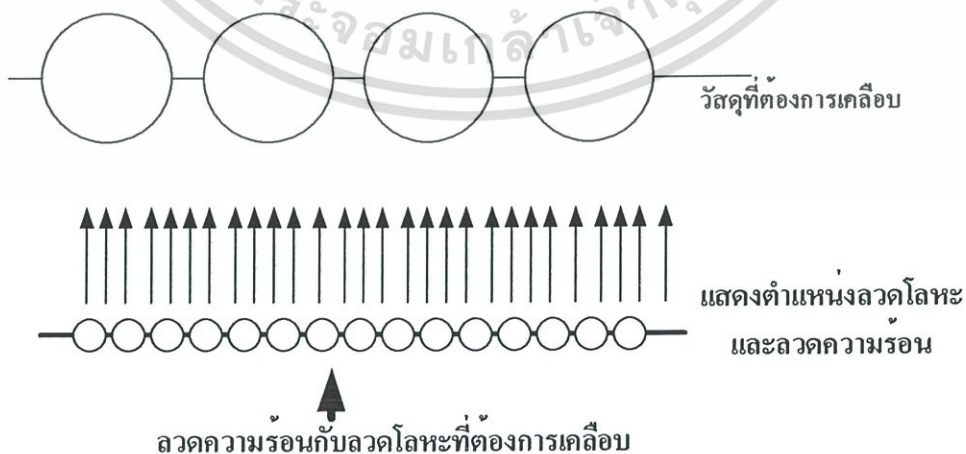
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 อัตราการตกผลึกที่สัมพันธ์กับกำลังที่ใช้ในการสเปตเตอร์ สำหรับระบบ planar magnetron sputtering

### 2.3 กระบวนการโลหะด้วยวิธีการระเหยในสุญญากาศ (Evaporation)

กระบวนการโลหะด้วยวิธีการระเหยในสุญญากาศเป็นอีกวิธีหนึ่งของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการสร้างฟิล์มโลหะบางๆเพื่อใช้ฟิล์มโลหะที่ได้ทำเป็นขั้วโลหะโดยมีหลักการทางฟิสิกส์ดังแสดงในรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 หลักการเคลือบฟิล์มโลหะด้วยวิธีการระเหยในสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น เมื่อนำมาใช้เพื่อประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.26 เมื่อทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าไปที่ขดลวดความร้อนโดยทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นทีละน้อยขดลวดความร้อนจะแสดงภาวะของอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปคือจะเริ่มมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นเรื่อยๆ ส่งผลให้ลวดโลหะที่วางอยู่ด้านบนของขดลวดความร้อนมีความร้อนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงค่าๆหนึ่งที่เรียกว่าจุดหลอมเหลว ซึ่งลวดโลหะจะไหลมารวมกันเป็นจุดเดียว ในตอนนี้จะต้องเพิ่มแรงดันที่ขดลวดความร้อนเพิ่มอีกจนกว่าอุณหภูมิที่ลวดโลหะจะเลยจุดหลอมเหลวและเกิดการระเหยของลวดโลหะไปทั่วห้อง chamber และเข้าไปเคลือบที่วัสดุเกิดเป็นฟิล์มบางบนวัสดุที่ต้องการเคลือบด้วย

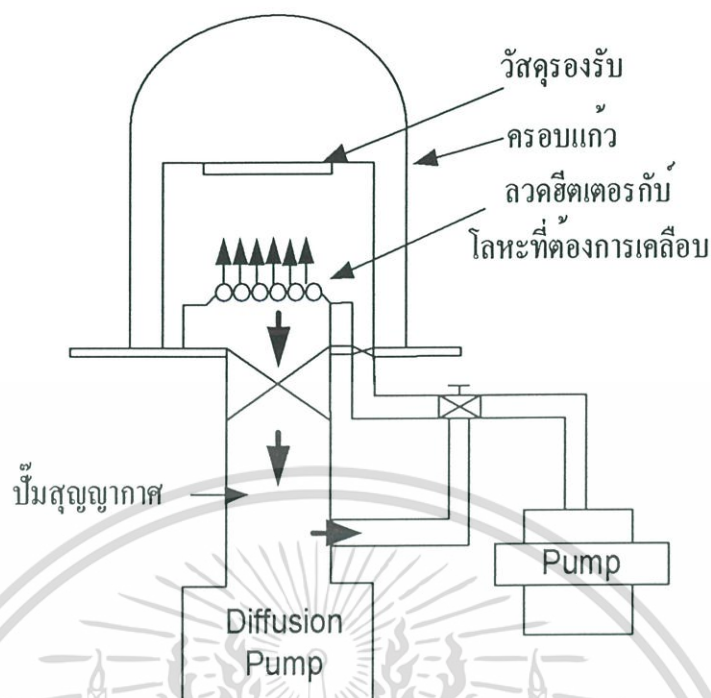
ในการเคลือบฟิล์มโลหะด้วยวิธีการระเหยในสุญญากาศจึงจำเป็นที่จะต้องทราบจุดหลอมเหลวของฟิล์มโลหะที่ต้องการจะเคลือบและสภาพความต้านทานของฟิล์มโลหะนั้นแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 จุดหลอมเหลว(melting point)และสภาพความต้านทาน(resistivity)

โลหะ	จุดหลอมเหลว(°C)	สภาพความต้านทาน( $\mu\Omega\text{-cm}$ )
Al	660	2.7
Cr	1878	12
Mo	2615	5.7
Ti	1670	41.2
W	3417	5.6

### 2.3.1 โครงสร้างของกระบวนการโลหะด้วยวิธีการระเหยในสุญญากาศ

โครงสร้างของกระบวนการโลหะด้วยวิธีการระเหยในสุญญากาศได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.27 โดย chamber ที่ได้แสดงไว้เป็นครอบแก้วรูปทรงระฆังคว่ำ(bell jar) เมื่อเริ่มต้นภายใน chamber จะมีความดันบรรยากาศปกติจากนั้นจะถูกดูดอากาศออกโดยใช้ mechanical pump จนความดันภายใน chamber ได้ประมาณ  $10^{-3}$  Torr จะวัดความดันที่จูนโดย gessisler's Tube แล้วทำการเปิดระบบของ diffusion pump เพื่อให้ diffusion pump ทำการช่วยลดความดันใน chamber ลงอีกจนได้ค่าประมาณ  $10^{-6}$  Torr จึงเริ่มกระบวนการเคลือบฟิล์มโลหะ โดยในการวัดความดันที่เป็นความดันต่ำจะต้องใช้ ionization gauge เป็นตัววัด สำหรับในการเคลือบฟิล์มบางชนิดที่มีปฏิกิริยากับน้ำมันในระบบสุญญากาศ จะต้องมีการออกแบบให้ระบบ high vacuum pump ใช้ turbomolecular และ cryo pump แทนระบบ diffusion pump



รูปที่ 2.27 โครงสร้างของเครื่อง filament evaporator

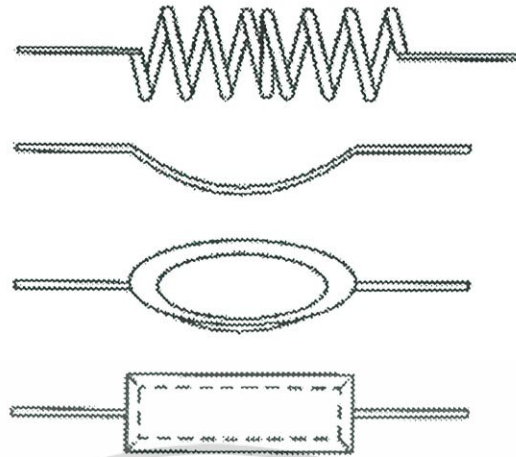
### 2.3.2 เทคนิคการเคลือบโลหะในระบบสุญญากาศ

การเคลือบโลหะในระบบสุญญากาศ โดยใช้ filament evaporation เป็นวิธีการง่ายที่สุด สิ้นเปลืองน้อยที่สุดไม่มีผลของการแพร่กระจายไอออน แต่มีข้อเสียที่อายุการทำงานของไส้ขดลวดความร้อน (filament หรือ boat) ที่ทำจากทังสเตน (tungsten) หรือ Molybdenum ซึ่งจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.28

เมื่อไส้ถูกให้ความร้อนโดยการไหลผ่านของกระแสไฟจำนวนมาก โดยในขณะที่ทำการเคลือบโลหะจะควบคุมให้กระแสไฟไหลผ่านไส้ เพิ่มขึ้นทีละน้อยๆจนกระทั่งโลหะที่วางอยู่ที่ไส้ หลอมตัวเป็นของเหลวติดอยู่กับไส้ก็จะระเหยเป็นไอฟุ้งกระจาย เคลือบแผ่นชิ้นงานที่เป็นผลึกซิลิคอนที่วางอยู่ใน chamber

สำหรับเทคนิคนี้จะใช้กับสารที่มีธาตุรวมกันอยู่ไม่ได้ เนื่องจากธาตุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าจะระเหยเป็นไวก่อนธาตุที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่า การเลือกไส้ให้ต้องพิจารณาให้มีขนาดเหมาะสมกับสารที่ใช้ในการระเหย ถ้าไม่เช่นนั้นก็จะสิ้นเปลืองโลหะที่ใช้ในการระเหยเป็นจำนวนมากเพื่อให้ได้ความหนาของโลหะฟิล์มเคลือบที่ต้องการ และพื้นที่โลหะที่เคลือบมีขนาดเล็ก เทคนิคการระเหยสารวิธีนี้จะใช้ได้สะดวกกับสาร Al, Au, Ag, Pd เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

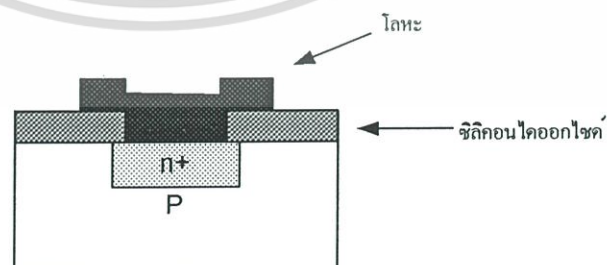


รูปที่ 2.28 ลักษณะของไส้ที่ใช้ในการระเหยต่างๆ

## 2.4 กระบวนการซินเตอร์ของโลหะ

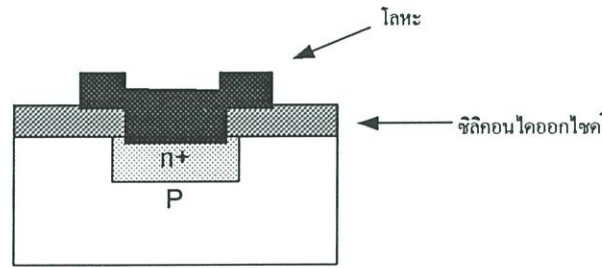
### 2.4.1 กระบวนการซินเตอร์

กระบวนการซินเตอร์ของโลหะเป็นกระบวนการหนึ่งในการสร้างรอยสัมผัสโอห์มิก จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าผิวของซิลิคอนมักจะมีชั้นของออกไซด์บางๆอยู่ระหว่างชั้นของโลหะและชั้นสารกึ่งตัวนำจึงถูกแยกจากชั้นของออกไซด์ในกรณีเช่นนี้จะทำให้รอยสัมผัสที่ค่าความต้านทานสูงนั้นไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งานเพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว หลังจากสร้างชั้นโลหะบนผิวซิลิคอนที่มีความเข้มสูงบริเวณที่เป็นรอยสัมผัสแล้วรอยสัมผัสที่จะถูกนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงค่าหนึ่งเพื่อให้อะตอมของโลหะสามารถแพร่ผ่านออกไซด์บางและเข้าไปในชั้นสารกึ่งตัวนำได้ จะทำให้รอยสัมผัสโอห์มิกที่ดีมีค่าความต้านทานต่ำ วิธีการเช่นนี้ถูกเรียกว่า การซินเตอร์ (sintering) แสดงในรูปที่ 2.30 [11]

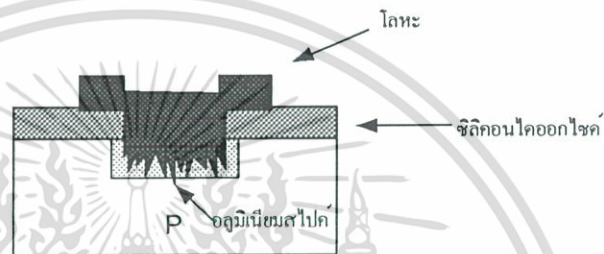


รูปที่ 2.29 รอยต่อโอห์มิกก่อนการซินเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.30 รอยต่อไอห์มิกเมื่อได้รับการซินเตอร์



รูปที่ 2.31 การเกิดอคูมิเนียมสไปค์และทำให้รอยต่อ พี-เอ็นแบบดึ้นเกิดลัดวงจร

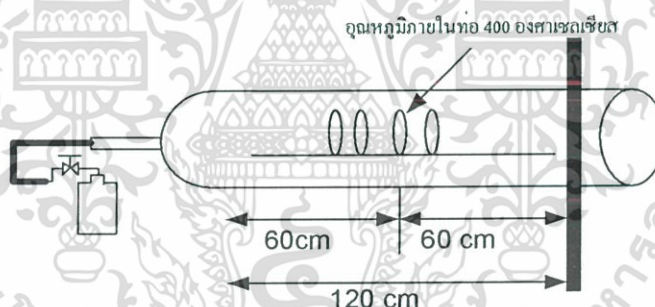
แต่เนื่องจากในปัจจุบันความลึกของชั้นพีเอ็นมีความลึกน้อยกว่า 1 ไมครอนเมื่อมีการแอนเนลเข้าไปอะตอมของอคูมิเนียมที่แพร่เข้าไปในส่วน p+ และ n+ มักไม่สม่ำเสมอ ทำให้เกิดมีส่วนลึกตื้นไม่เท่ากัน เกิดเป็นปลายแหลมเล็กหรือเรียกว่า "สไปค์" (spiking) ซึ่งส่วนที่เป็นสไปค์อาจลัดลงไปถึงบริเวณรอยสัมผัสพีเอ็นที่มีขนาดต้นเหล่านี้ได้ ทำให้เกิดความเสียหายชั้นบริเวณรอยสัมผัสเพราะถูกลัดวงจร ดังแสดงในรูปที่ 2.31

เมื่อวงจรมีขนาดเล็กลงทำให้พื้นที่ของรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำมีพื้นที่หน้าสัมผัสที่เล็กลงตามไปด้วย ทำให้มีผลของความต้านทานบริเวณรอยสัมผัสของรอยต่อโลหะกับสารกึ่งตัวนำมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้เกิดเป็นรอยสัมผัสไอห์มิกที่ไม่ดีทำให้ประสิทธิภาพของวงจรรวมลดน้อยลงในส่วนของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการพัฒนากการสร้างฟิล์มโลหะด้วยวิธีสปีดเตอร์ กับวิธีการระเหยใน สูญญากาศ โดยเฉพาะวิธีการสปีดเตอร์จะใช้วัสดุอคูมิเนียมที่มีซิลิคอนผสมอยู่ 2% โดยน้ำหนัก (Al-Si (wt2%)) โดยซิลิคอน 2 เปอร์เซ็นต์จะทำให้เกิดอคูมิเนียมเกิดการอิมิตัวด้วยซิลิคอนช่วยลดปัญหาการเกิดสไปค์ ทั้งนี้วิธีการสปีดเตอร์ยังสามารถควบคุมความหนาในแนวราบได้ดีมากและเหมาะสมที่จะใช้กับเทคโนโลยีวงจรรวมในปัจจุบัน การสร้างฟิล์มโลหะทั้งสองวิธีที่ได้กล่าวมานั้นได้นำมาวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและไฟฟ้าของฟิล์มโลหะ สร้างเป็นรอยสัมผัสไอห์มิกและหาความต้านทานภายในรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ โดยใช้อุณหภูมิต่ำ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การขึ้นเตอรืที่เหมาะสมที่สุดในการทำให้สารกึ่งตัวนำกับโลหะยึดติดกันได้ดีและมีรอยสัมผัสโอห์มิกมีความต้านทานต่ำ

#### 2.4.2 กระบวนการขึ้นเตอรืของโลหะในเทคโนโลยีวงจรรวม 5 ไมโครเมตร

จากกระบวนการสร้างเทคโนโลยีวงจรรวมเมื่อทำการสร้างฟิล์มโลหะและสร้างลวดโลหะด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีแล้วลวดลายอลูมิเนียมจะทำหน้าที่เป็นแถบตัวนำและก่อให้เกิดเป็นลวดลายโอห์มิกแต่รอยสัมผัสนี้อาจจะยังไม่สมบูรณ์เพียงพอด้วยเหตุจากปัจจัยหลายอย่างดังที่ได้อธิบายในหัวข้อ 2.4.1 ดังนั้นกระบวนการขึ้นเตอรืจะช่วยให้รอยสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมและซิลิคอนเป็นรอยสัมผัสที่สมบูรณ์ การขึ้นเตอรืจะทำในเตาแพร่สารที่ตั้งอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 400-550 °C ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน โดยใช้เวลาประมาณ 10-30 นาที ซึ่งในขณะที่ทำการขึ้นเตอรืจะทำการปล่อยก๊าซที่มีไนโตรเจนรวมอยู่ด้วยเข้าไป ดังแสดงในรูปที่ 2.32 ซึ่งในการขึ้นเตอรืนั้นเป็นการกระทำเพื่อช่วยให้คุณสมบัติของสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างขึ้นมีคุณสมบัติที่ดี และการทำงานไม่เปลืองง่าย ต่อสภาพแวดล้อม [12]



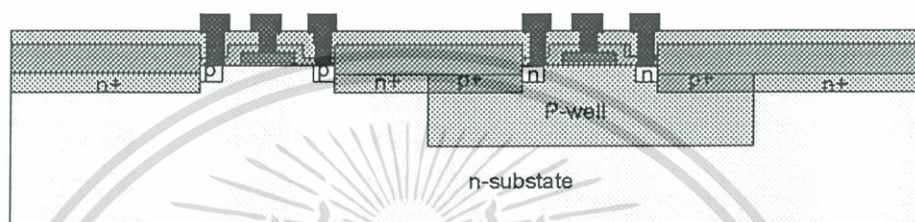
รูปที่ 2.32 กระบวนการขึ้นเตอรืของโลหะโดยใช้ความร้อน

กระบวนการขึ้นเตอรื ในกระบวนการเทคโนโลยีวงจรรวม 5 ไมโครเมตรเริ่มจากการให้อุณหภูมิภายในท่อ quartz มีอุณหภูมิที่ 400 °C เท่ากันทั้งท่อในระหว่างที่รออุณหภูมิภายในท่อจะต้องปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าไปในท่อโดยให้มีอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่ 1000 cc/นาที เมื่ออุณหภูมิภายในท่อ quartz มีค่าเท่ากันทั้งหมดแล้ว(ใช้วิธีการวัดเฉพาะช่วงเรียกว่า flat zone) นำชิ้นงานที่จะทำการขึ้นเตอรืใส่เข้าไปในท่อ quartz โดยให้ชิ้นงานอยู่กลางท่อพอดีคือ ระยะ 60 cm จากปากท่อ เป็นเวลา 30 นาที แล้วจึงนำเอาชิ้นงานออกรอให้อุณหภูมิของชิ้นงานเย็นลง เป็นอันเสร็จสิ้นกระบวนการขึ้นเตอรื ซึ่งเป็นอุณหภูมิและระยะเวลาที่ดีที่สุดในการทำรอยสัมผัสโอห์มิก

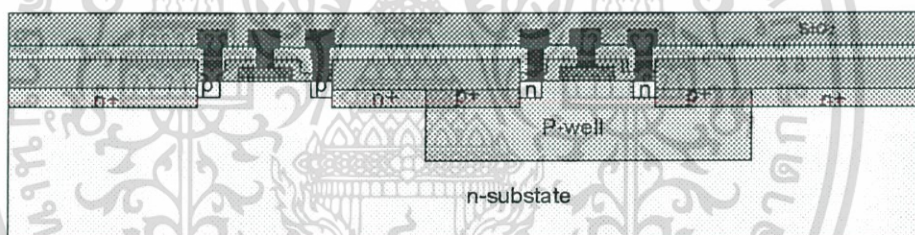
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 กระบวนการสร้างลวดลายโลหะแบบ 2 ชั้น

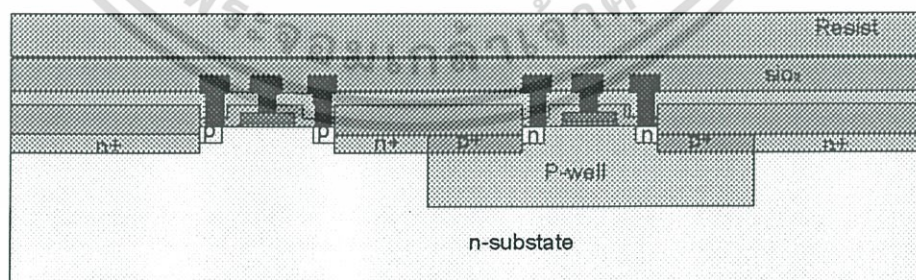
กระบวนการโลหะแบบสองชั้นเป็นการสร้างโลหะชั้นที่สองให้กับวงจรรวมเพื่อช่วยในการเพิ่มเส้นทางการกระแสวิงจรรวมและลดความต้านทานภายในรอยสัมผัสโหนดซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับวงจรรวม กระบวนการสร้างลวดลายโลหะแบบ 2 ชั้นจะมีขั้นตอนการสร้างอยู่ทั้งหมดประมาณ 50 ขั้นตอน แต่เพื่อให้เกิดความเข้าใจจึงอธิบายในรูปแบบของแผนภาพดังต่อไปนี้ [1,13]



รูปที่ 2.33 วงจรรวมแบบซีมอสในระดับ 5 ไมโครเมตรแบบ 1 ชั้น



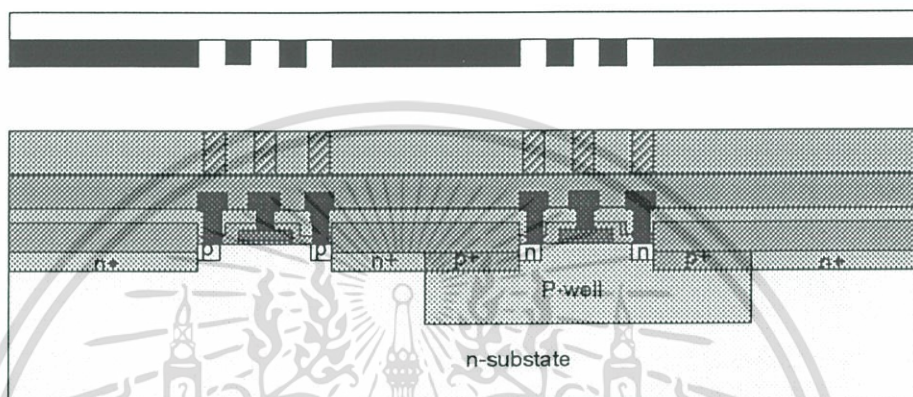
รูปที่ 2.34 การสร้าง ซิลิคอนไดออกไซด์ ด้วยกระบวนการ PECVD



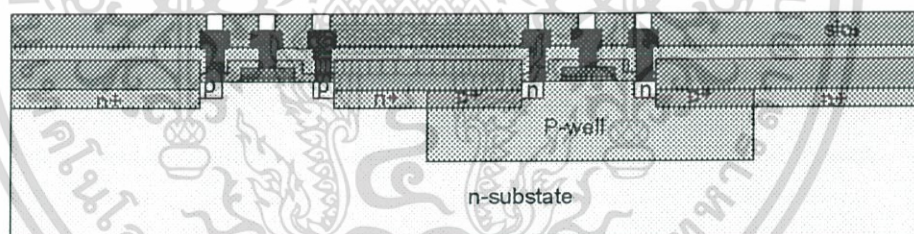
รูปที่ 2.35 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี เคลือบน้ำยาไวแสง

หลังจากได้วงจรรวมแบบ 1 ชั้นดังแสดงในหัวข้อ 2.1 มาแล้วจากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการทำความสะอาดแผ่น (cleaning) ด้วยวิธี wet cleaning เรียบร้อยแล้วทำการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

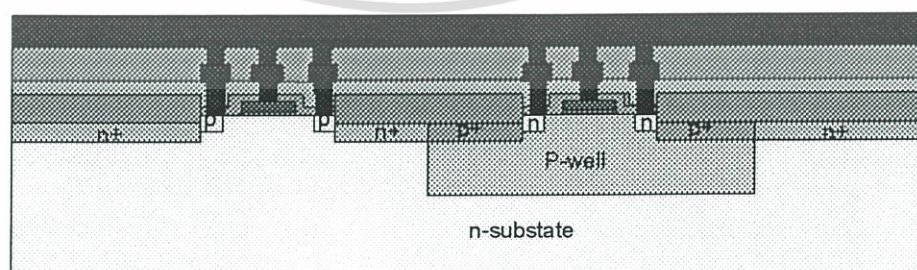
ออกไซด์ ด้วยวิธี PECVD ความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์มีความหนาประมาณ 500nm อุณหภูมิในการสร้าง 400 °C ดังแสดงในรูปที่ 2.34 ต่อมาเป็นกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี นำแผ่นที่เคลือบซิลิคอนไดออกไซด์แล้วมาเคลือบน้ำยาไวแสงเบอร์ MPS1818 ที่มีความหนามากกว่า 1.5  $\mu\text{m}$  ดังแสดงในรูปที่ 2.35 แล้วทำการฉายแสงครั้งที่ 9 (mask 9 เป็น mask via hole) ส่วนที่ถูกแสงของน้ำยาไวแสงจะหลุดออกดังแสดงในรูปที่ 2.36



รูปที่ 2.36 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี และการถ่ายแมสก์ (mask: via hole)



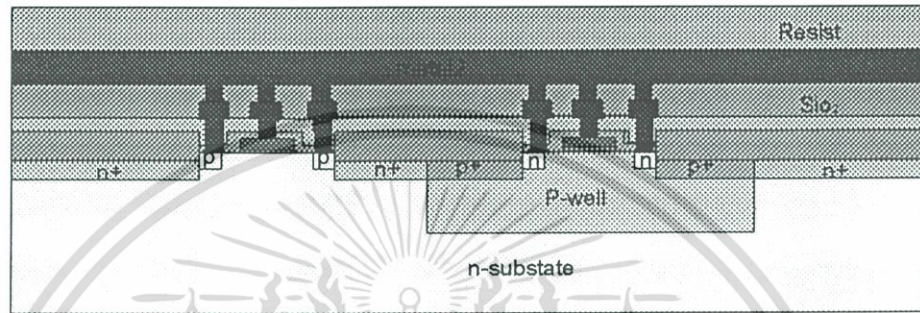
รูปที่ 2.37 การสกัด ซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยวิธี wet etching



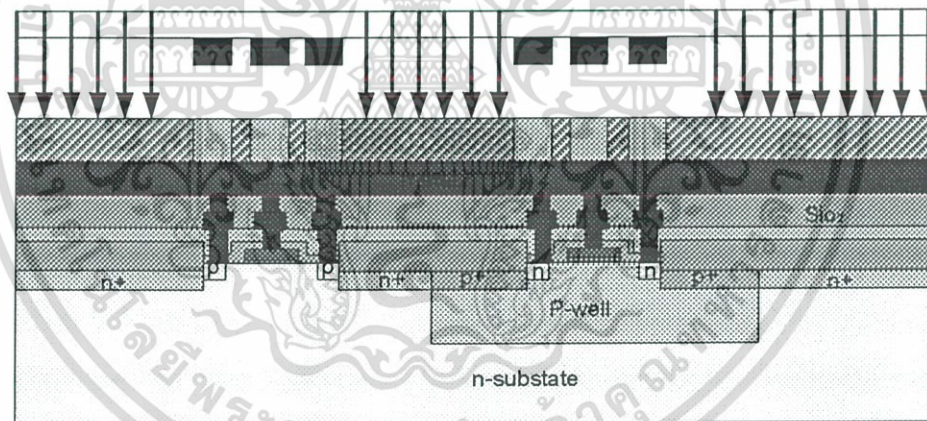
รูปที่ 2.38 การสร้างฟิล์มโลหะชั้นที่ 2 ด้วยวิธีการสปัตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

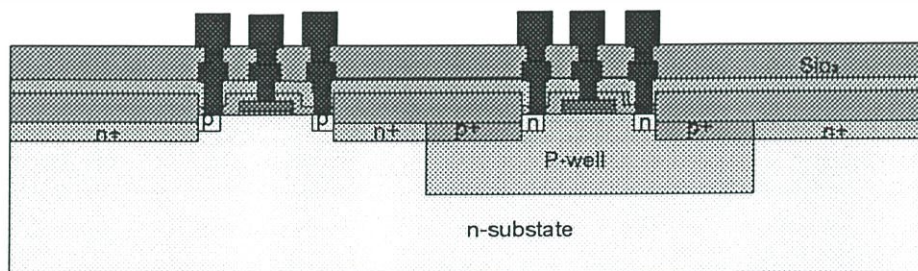
ขั้นต่อมาทำการสกัดซิลิคอนไดออกไซด์ออกตรงส่วนที่นำยาไวแสงถูกแสง UV โดยใช้กระบวนการสกัดแบบ RIE สกัดซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อเปิดช่องดังแสดงในรูป 2.37 และเข้าสู่กระบวนการทำความสะอาดแผ่น ขั้นตอนต่อมาเป็นกระบวนการสร้างชั้นฟิล์มโลหะชั้นที่ 2 ด้วยวิธีการ สปัดเตออร์ ตามเงื่อนไขของความดันในการทำงาน  $2-5 \times 10^{-3}$  bar เวลาในการสปัดเตออร์ 85 นาที ได้ความหนา 500nm ดังแสดงในรูปที่ 2.38



รูปที่ 2.39 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี การเคลือบนำยาไวแสง



รูปที่ 2.40 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีเป็นการถ่ายแมสค์ 2 (mask: metal 2)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2563  
 รูปที่ 2.41 วงจรรวมแบบซีมอส ระดับ 5 ไมโครเมตรแบบ 2 ชั้น  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

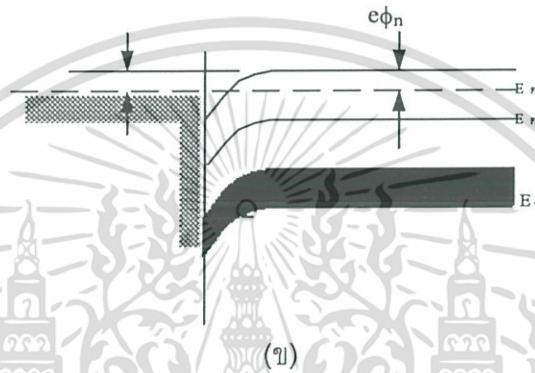
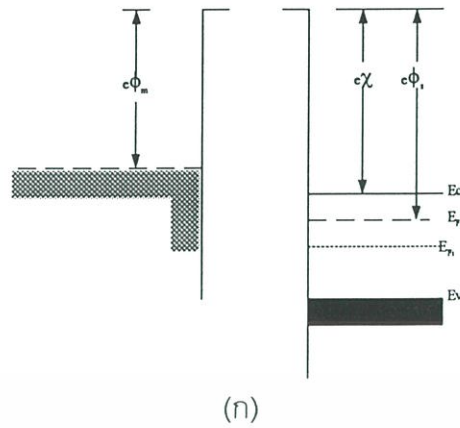
หลังจากได้ฟิล์มโลหะชั้นที่ 2 เรียบร้อยเรียบร้อยแล้วจึงเข้าสู่กระบวนการ โฟโตลิโทกราฟีเริ่มจากการนำแผ่นมาเคลือบฟิล์มน้ำยาไวแสงเบอร์ MPS1818 ที่ความหนามากกว่า  $1.5 \mu\text{m}$  ดังแสดงในรูปที่ 2.39 แล้วนำมาฉายแสง UV ผ่านแมสก์ที่ 10 (mask metal 2) ดังแสดงในรูปที่ 2.40 และทำการสกัดเป็นลวดลายโลหะโดยใช้วิธีการสกัดแบบ RIE ได้เป็นวงจรรวมซีมอส 5 ไมโครเมตร ประเทศไทยที่สมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.41

## 2.6 ความต้านทานภายในรอยสัมผัสและการวัด

### 2.6.1 รอยสัมผัสโอห์มิกระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ

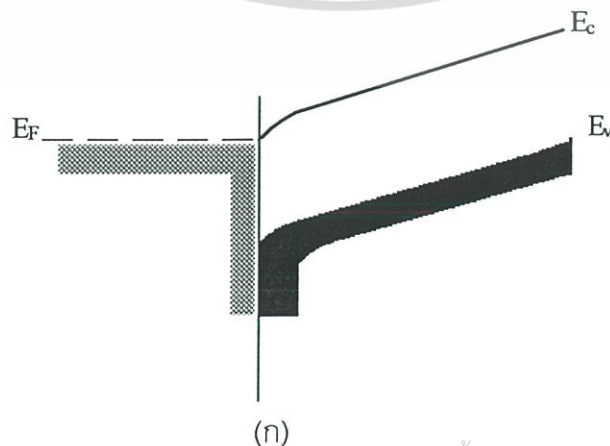
รอยสัมผัสต้องถูกสร้างระหว่างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำใดๆหรือวงจรรวมกับโลกภายนอก รอยสัมผัสเหล่านี้ถูกทำให้เป็นรอยสัมผัสโอห์มิก รอยสัมผัสโอห์มิกคือรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ แต่ในกรณีนี้จะเป็นรอยสัมผัสแบบเรกติไฟร์ รอยสัมผัสโอห์มิกเป็นรอยต่อความต้านทานต่ำ นำกระแสได้ทั้งสองทิศทางระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำในทางอุดมคติ กระแสที่ไหลผ่านรอยสัมผัสโอห์มิกจะเป็นคงามสัมพันธ์เชิงเส้นกับแรงดันที่ให้และแรงดันที่ให้น่าจะมีค่าน้อยมาก มีรอยสัมผัสโอห์มิก ทั่วไปอยู่สองแบบที่เป็นไปได้ แบบแรกคือกัมแพงค์กัที่ไม่เรกติไฟร์ในอุดมคติและแบบที่สองคือกัมแพงค์กัการทลเนล เราจะกำหนดเจาะจงความต้านทานรอยสัมผัสลงไป ซึ่งจะถูกใช้ในการวิเคราะห์หรือรอยสัมผัสโอห์มิก [14]

กัมแพงค์กัที่ไม่เรกติไฟร์ในอุดมคติ เราจะทำการพิจารณารอยสัมผัสโลหะกับสารกึ่งตัวนำ ในรูปที่ 2.42 คือ  $\phi_m < \phi_s$  ในรูปที่ 2.42 ก เราจะเห็นระดับพลังงานก่อนสัมผัสและในรูปที่ 2.42 ข คือกัมแพงค์กัหลังสัมผัสในสภาวะสมดุลความร้อน เพื่อให้รอยต่อนี้เข้าสู่สภาวะสมดุลความร้อน อิเล็กตรอนจะไหลจากโลหะเข้าไปในสถานะพลังงานต่ำกว่าในสารกึ่งตัวนำซึ่งทำให้พื้นผิวของสารกึ่งตัวนำเป็นชนิดเอ็นมากขึ้นประจุอิเล็กตรอนส่วนเกินในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นปรากฏเป็นความหนาแน่นประจุพื้นผิว ถ้าให้แรงดันบวกแก่โลหะจะไม่มีกัมแพงค์กัขวางกั้นการไหลของอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำเข้าไปในโลหะทำให้แรงดันบวกกับสารกึ่งตัวนำ ความสูงกัมแพงค์กัสำหรับการไหลอิเล็กตรอนจากโลหะเข้าสู่สารกึ่งตัวนำจะประมาณ  $\phi_{bn} = \phi_n$  ซึ่งมีค่าน้อยสำหรับสารกึ่งตัวนำที่ถูกโด๊ปอย่างปานกลางไปจนถึงสูง สำหรับเงื่อนไขการไบอัสนี้อิเล็กตรอนสามารถไหลจากโลหะเข้าไปในสารกึ่งตัวนำอย่างง่ายได้

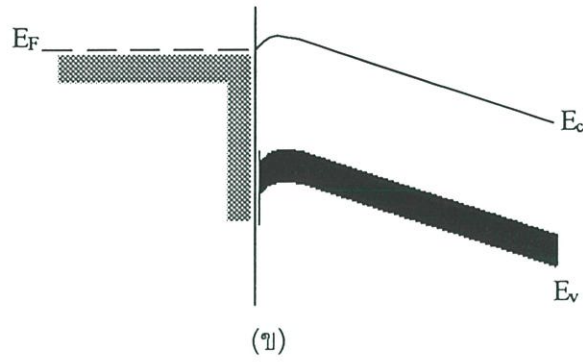


รูปที่ 2.42 ไดอะแกรมแถบพลังงานในอุดมคติของรอยต่อโลหะ-สารกึ่งตัวนำเมื่อ  $\phi_m < \phi_s$   
 (ก) ก่อนสัมผัส (ข) หลังสัมผัส

รูปที่ 2.43 ก แสดงไดอะแกรมแถบพลังงานเมื่อแรงดันบวกถูกให้แก่โลหะเมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำอิเล็กทรอนิกส์สามารถไหลได้อย่างสะดวก “ลงเนิน” จากสารกึ่งตัวนำเข้าไปในโลหะ รูปที่ 2.43 ข แสดงกรณีเมื่อแรงดันบวกถูกให้แก่สารกึ่งตัวนำเมื่อเทียบกับโลหะอิเล็กทรอนิกส์สามารถไหลข้ามผ่านกำแพงจากโลหะเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ รอยต่อนี้คือรอยสัมผัสอีนัมิก

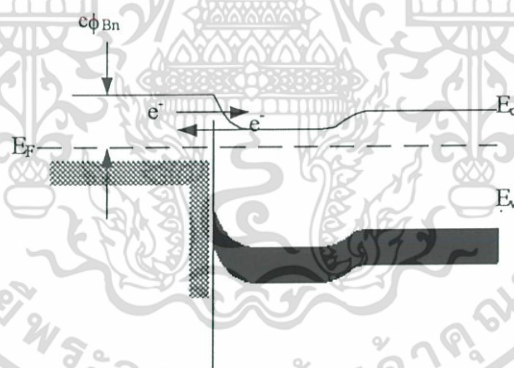


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.43 ไดอะแกรมแถบพลังงานในอุดมคติของรอยสัมผัสไอหิมิกของโลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น (n) เมื่อให้แรงดันบวกแก่โลหะ (ข) เมื่อให้แรงดันบวกแก่สารกึ่งตัวนำ

กำแพงการทันเนล ความกว้างบริเวณประจุค้างในรอยสัมผัสเรกติไฟร์ของโลหะ-สารกึ่งตัวนำเป็นสัดส่วนกับค่ารากที่สองของการได้ปสารกึ่งตัวนำ ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะจะลดลงเมื่อความเข้มของการ ได้ปในสารกึ่งตัวนำเพิ่มขึ้น ดังนั้น เมื่อความเข้มของสารกึ่งตัวนำเพิ่มขึ้น โอกาสการทันเนลจะทะลุผ่านกำแพงศักย์จะเพิ่มขึ้น รูปที่ 2.44 แสดงรอยต่อที่ซึ่งโลหะสัมผัสกับชั้นอิพิททาเซียลชนิดเอ็นที่ได้ปเข้มข้น



รูปที่ 2.44 ไดอะแกรมแถบพลังงานของรอยต่อสารกึ่งตัวนำเข้มข้นชนิดเอ็นกับโลหะ

กระแสการทันเนลจะอยู่ในรูป

$$j_t \propto \exp\left(\frac{-e\phi_{Bn}}{E_{\infty}}\right) \tag{2.8}$$

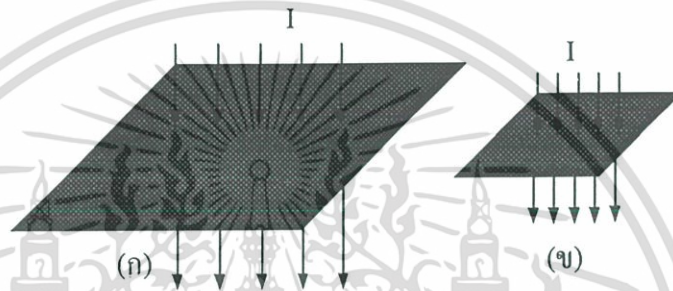
ซึ่ง

$$E_{\infty} = \frac{e\hbar}{2} \sqrt{\frac{N_d}{\epsilon_s m_n^*}} \tag{2.9}$$

กระแสการทันเนลเพิ่มขึ้นอย่างเอกซ์โพเนนเชียลกับความเข้มข้้นการได้ป เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยู่ต่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6.2 ความต้านทานรอยสัมผัส

ความต้านทานภายในรอยสัมผัสเกิดจากการมีสารสองชนิดที่ต่างกันมาสัมผัสกันเป็นรอยต่อโอห์มิก เช่น โลหะกับสารกึ่งตัวนำ ซึ่งรอยต่อของสารสองชนิดนี้จะมีความต้านทานค่าหนึ่งจากรูปเมื่อเรากำหนดให้กระแสไฟมีขนาดที่เท่ากันไหลผ่านพื้นที่รอยสัมผัสขนาดใหญ่ในรูปที่ 2.45 (ก) และรอยสัมผัสพื้นที่ขนาดเล็ก 2.45 (ข) กระแสในรูป 2.45 (ก) จะไหลผ่านได้สะดวกเพราะมีพื้นที่มาก ส่วนในรูปที่ 2.45 (ข) พื้นที่เล็กจะทำให้กระแสไหลผ่านไม่สะดวก เปรียบเสมือนมีความต้านทานจากรอยสัมผัสเกิดขึ้น และยิ่งพื้นที่รอยสัมผัสเล็กลงมาก ผลของความต้านทานภายในรอยสัมผัสจะยิ่งมีความสำคัญต่อการเชื่อมต่อนำไฟฟ้าอย่างมาก



รูปที่ 2.45 รอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ

แผนภาพของรอยต่อโอห์มิกจะกำหนดค่าความต้านทานรอยสัมผัส  $R_c$  ตัวพารามิเตอร์นี้คือส่วนกลับของอนุพันธ์ของความหนาแน่นกระแสเทียบกับแรงดันที่ไบอัสเท่ากับศูนย์ เราอาจจะเขียนว่า

$$R_c = \left( \frac{\partial J}{\partial V} \right)^{-1} \Bigg|_{V=0} \quad \text{โอห์ม} \quad (2.10)$$

เราต้องการ  $R_c$  ให้มีค่าน้อยเท่าที่จะน้อยได้สำหรับกรณีรอยสัมผัสแบบโอห์มิก

สำหรับรอยสัมผัสเรกติไฟร์ที่สารกึ่งตัวนำมีความเข้มข้นปานกลาง ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันได้ในสมการนี้คือ

$$J_n = A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\phi_{Bn}}{kT}\right) \left[ \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right]$$

กระแสการปลดปล่อยจากความร้อนเป็นกระแสส่วนมากในรอยต่อนี้ ความต้านทานรอยต่อในกรณีนี้คือ

$$R_c = \frac{\left(\frac{kT}{e}\right) \exp\left(\frac{+e\phi_{Bn}}{kT}\right)}{A^* T^2} \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

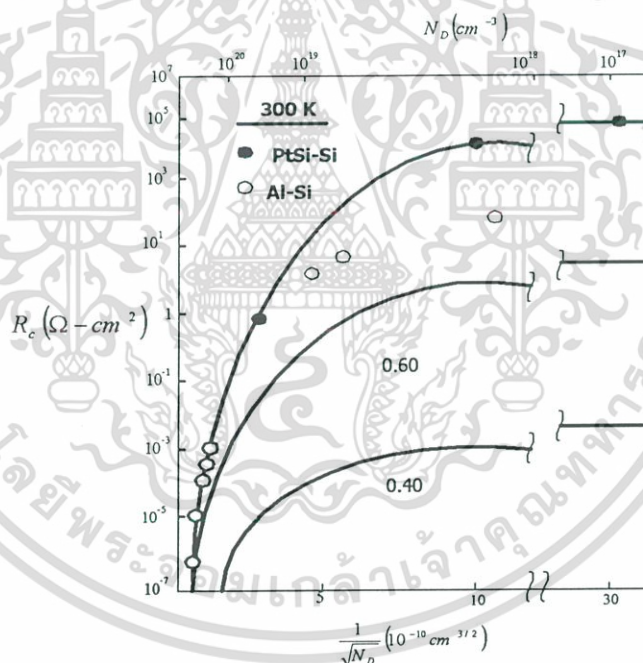
ความต้านทานรอยต่อลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความสูงของกำแพงศักย์ลดลง

สำหรับรอยต่อโลหะ-สารกึ่งตัวนำ ที่ถูกได้ด้วยความเข้มข้นของสารเจือสูง กระบวนการทันทันจะมีอิทธิพล จากสมการที่ (2.8) และ (2.9) ความต้านทานคือ

$$R_c \propto \exp \left[ \frac{+ 2\sqrt{\epsilon_s m_n^*}}{\hbar} \cdot \frac{\phi_{Bn}}{\sqrt{N_d}} \right] \quad (2.12)$$

ซึ่งแสดงค่าความต้านทานรอยต่อเป็นความสัมพันธ์กับการได้ปสารกึ่งตัวนำอย่างมาก

รูปที่ 2.45 แสดงการพลอตของค่า  $R_c$  ในทางทฤษฎีซึ่งจะเป็นความสัมพันธ์ของการได้ปสารกึ่งตัวนำ สำหรับความเข้มข้นการได้ปที่สูงกว่า  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  กระบวนการทันทันจะมีอิทธิพล ค่า  $R_c$  จะขึ้นอยู่กับค่าความสูงของกำแพงศักย์และเกือบจะไม่ขึ้นอยู่กับ การได้ป จากรูปยังแสดงค่าที่ได้จากการทดลองของรอยต่อแพลทินัมซิลิไซด์-ซิลิคอนและอลูมิเนียม-ซิลิคอนด้วย



รูปที่ 2.46 ความต้านทานรอยสัมผัสได้จากทางทฤษฎีและการทดลองเป็นความสัมพันธ์กับการได้ป

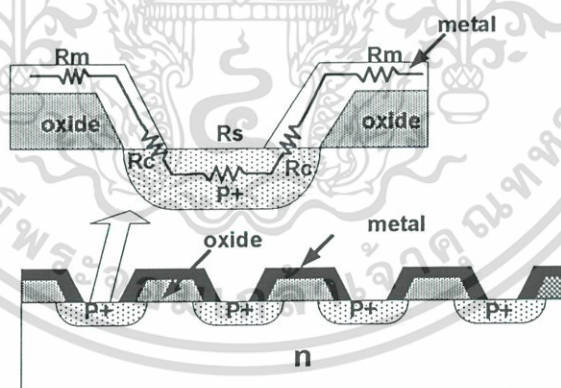
สมการ(2.12)คือความต้านทานรอยสัมผัสของรอยต่อการทันทัน ซึ่งตรงกับรอยสัมผัสโลหะกับ  $n^+$  ถูกแสดงในรูปที่ 2.44 อย่างไรก็ตาม รอยต่อ  $n^+-n$  มีความต้านทาน รอยสัมผัสด้วย เพราะว่ามีกำแพงศักย์เกี่ยวข้องกับรอยต่อนี้ สำหรับบริเวณเอ็นที่ถูกได้ปอย่างต่ำความต้านทาน รอยสัมผัสนี้อาจจะมีค่ามากกว่าและเป็นความต้านทานรอยต่อทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีการเกิดขึ้นของรอยสัมผัสโห้มีคเป็นแบบตรงไปตรงมา เพื่อที่จะทำให้เกิดรอยสัมผัสแบบโห้มีคที่ดีเราจำเป็นต้องสร้างกำแพงศักย์ค่าต่ำๆและใช้สารกึ่งตัวนำค่าที่ได้ปค่าสูงๆที่พื้นผิวอย่างโร้ก็ตามในทางเทคโนโลยีของการสร้างรอยสัมผัสโห้มีคที่เชื่อถือได้ที่ดีในทางปฏิบัติจะไม่่ง่ายเหมือนในทางทฤษฎี เป็นการยากที่จะสร้างรอยสัมผัสโห้มีคที่ดีลงบนวัสดุช่องว่างแถบพลังงานกว้าง โดยทั่วไปกำแพงศักย์ค่าต่ำไม่สามารถสร้างลงบนวัสดุเหล่านี้ได้ ดังนั้น สารกึ่งตัวนำที่ถูกได้ปอย่างเข้มขันที่พื้นผิวจะถูกใช้ในการทำให้เกิดรอยสัมผัสการทันเนล การเกิดขึ้นของรอยต่อการทันเนลต้องการการการแพร่การไอออนอิมพลานท์หรือบางที่การปลูกอิพิทาเซียล ความเข้มขันการได้ปของพื้นผิวในสารกึ่งตัวนำอาจจะถูกจำกัดด้วยค่าการละลายของสารเจือ ซึ่งมีค่าประมาณ  $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  สำหรับ GaAs ชนิดเอ็น ความไม่สม่ำเสมอในความเข้มขันการได้ปที่พื้นผิวอาจจะป้องกันข้อจำกัดทางทฤษฎีของความต้านทาน รอยสัมผัสที่จะเข้าสู่ค่านี้ ในทางปฏิบัติจะต้องอาศัยกระบวนการ การสร้างที่ดีต่าง ๆ ทั้งหมดเพื่อที่จะทำให้เกิดรอยสัมผัสโห้มีค

### 2.6.3 ความต้านทานภายในรอยสัมผัสแบบ 2 รอยต่อและการวัด

ความต้านทานในรอยสัมผัสแบบ 2 รอยต่อเกิดจากการจ่ายแรงดันไฟฟ้าผ่านขั้วโลหะทั้งสองโดยมีทิศทางการไหลของกระแสจากขั้วที่ 1 ไปขั้วที่ 2 หรือ จากขั้วที่ 2 ไปขั้วที่ 1 (ใน 1 chain) ทำให้ทราบความต้านทานรวม (total resistance:  $R_T$ ) ระหว่างขั้วโลหะที่ 1 กับขั้วโลหะที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 2.46 [15-17]



รูปที่ 2.47 ความต้านทานภายในแบบ 2 รอยต่อ

$$R_T = R_m + R_{C1} + R_s + R_{C2} + R_m \quad (2.13)$$

$R_T$  : ความต้านทานระหว่างขั้วโลหะที่ 1 กับที่ 2

$R_m$  : ความต้านทานของโลหะ

$R_{C1}$  : ความต้านทานรอยสัมผัสที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่นำมาใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$R_{c2}$  : ความต้านทานรอยสัมผัสที่ 2

$R_s$  : ความต้านทานของสารกึ่งตัวนำ

ให้  $R_m \approx 0$  (ความต้านทานในโลหะมีค่าเข้าใกล้ ศูนย์)

$$R_T = R_{c1} + R_s + R_{c2} \quad (2.14)$$

ให้  $R_{c1} = R_{c2} = R_c$

$$R_T = 2.R_c + R_s \quad (2.15)$$

$$R_s = \rho_s \frac{l}{A} \quad (2.16)$$

ในกรณีที่ A เป็นพื้นที่วงกลม

$$R_s = \rho_s \frac{l}{\pi r^2} \quad (2.17)$$

$$R_c = \frac{r_c}{A} = \frac{r_c}{\pi r^2} \quad (2.18)$$

$R_c$  : ความต้านทานรอยสัมผัส

$r_c$  : ความต้านทานจำเพาะภายในรอยสัมผัส

A : พื้นที่ของรอยสัมผัส

จากสมการที่ (2.13)-(2.18) จะเห็นได้ว่าเมื่อพิจารณาค่าของ  $R_T$  จากการป้อนกระแสและแรงดันจะได้ความต้านทานตกคร่อมระหว่างขั้วโลหะจุดที่ 1 และจุดที่ 2 กับความต้านทาน  $R_s$  ที่คิดจากสมการที่ (2.17) นำค่าของตัวแปรทั้งสองตัวที่ได้กลับไปแทนในสมการที่ (2.15) ทำให้ทราบค่าของความต้านทานรอยสัมผัส  $R_c$  หากนำค่าของ  $R_c$  ที่ได้แทนลงในสมการที่ (2.18) ก็สามารรถที่จะทราบค่าของความต้านทานจำเพาะภายในรอยสัมผัส  $r_c$  ซึ่งเป็นตัวที่ใช้บอกถึงความต้านทานที่อยู่ภายในรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ ถ้า  $r_c$  มีค่าความต้านทานที่สูงก็จะทำให้การนำไฟฟ้าบริเวณรอยสัมผัสเป็นไปได้ไม่ดี ซึ่งก็จะส่งผลเสียต่ออุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

ในบทต่อไปจะกล่าวถึง กระบวนการโลหะในเทคโนโลยีวงจรรวมระดับ 5 ไมโครเมตร เป็นกระบวนการสร้างฟิล์มโลหะด้วยวิธีการต่างๆของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คือวิธีการสปัตเตอร์ กับวิธีการระเหยในสุญญากาศ รวมถึงการออกแบบลวดลายโลหะและกระบวนการสร้าง contact chain แบบ 1 ชั้น ก็กับการออกแบบลวดลายโลหะและกระบวนการสร้าง contact chain แบบ 2 ชั้น

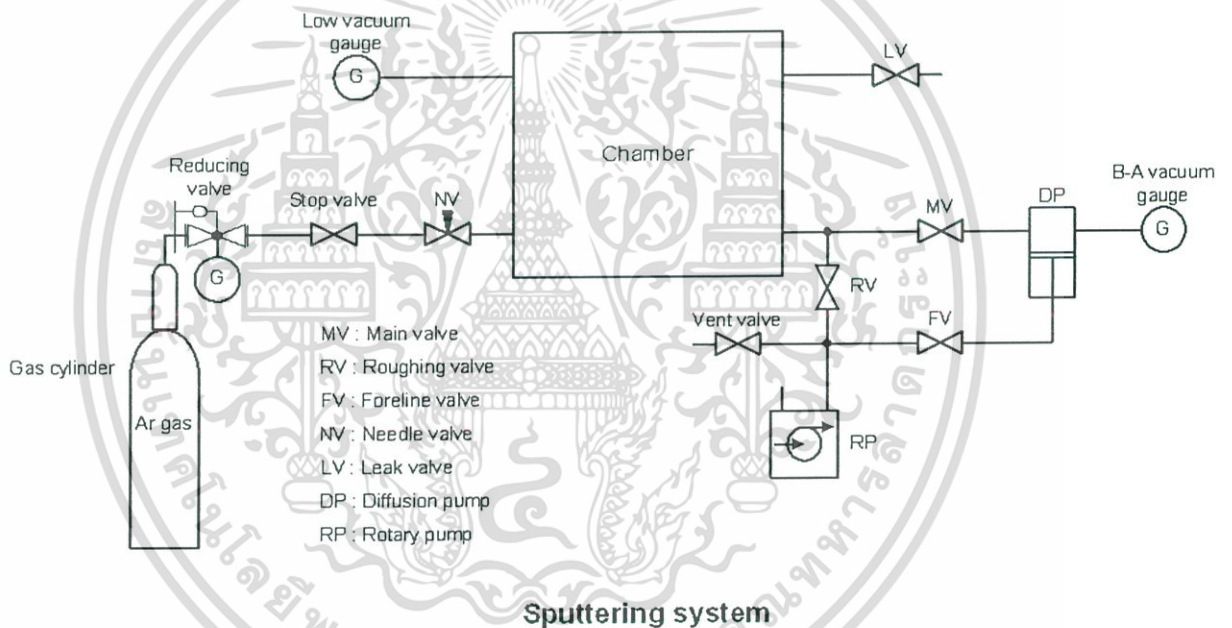
### บทที่ 3

## กระบวนการโลหะในเทคโนโลยีวงจรรวม

### ระดับ 5 ไมโครเมตร

#### 3.1 กระบวนการสร้างฟิล์มโลหะด้วยวิธีการสปัตเตอร์บนฐานรองซิลิคอนและซิลิคอนไดออกไซด์

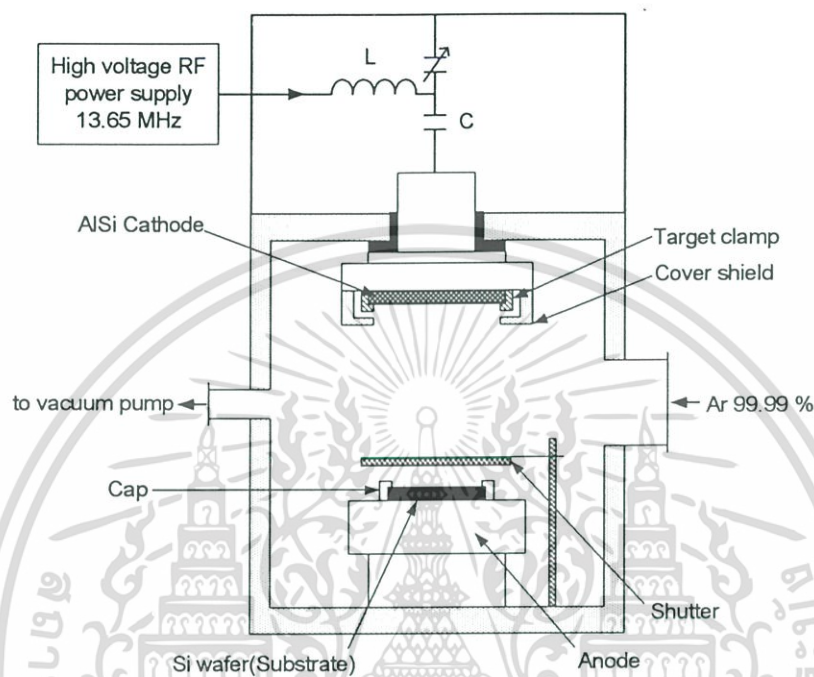
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงกระบวนการสร้างฟิล์มโลหะด้วยวิธีการสปัตเตอร์โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า “ อาร์เอฟ ไดโอด สปัตเตอร์ ” โดยหลักการดำเนินงานพื้นฐานได้ถูกอธิบายไว้ในบทที่ 2 หัวข้อ 2.2 [1,10]



รูปที่ 3.1 Sputtering System Diagram ของเครื่อง SPE-210 Diode Sputtering System

จากไดอะแกรมในรูปที่ 3.1 แสดงส่วนสำคัญต่างๆของเครื่อง SPE-210 ไดโอดสปัตเตอร์ ประกอบไปด้วย แหล่งกำเนิดแรงดันสูง ซึ่งมีความถี่อยู่ในย่านความถี่วิทยุ (13.65 MHz) , แหล่งจ่ายแก๊ส , ห้องสปัตเตอร์(sputtering chamber), และปั๊มสุญญากาศ( rotary and diffusion pump) ภายในห้องสปัตเตอร์ประกอบด้วย ขั้วคาโทด (cathode) ขั้วแอโนด (anode) และชัตเตอร์ (shutter) โดยแผ่นอลูมิเนียมซิลิคอน (Al-Si (2wt%)) เป็นเป้าถูกติดไว้กับขั้วคาโทด ดังแสดงในรูปที่ 3.2 การสปัตเตอร์เกิดจากการป้อนกำลัง RF ผ่านวงจรมัทซิงเข้าสู่ห้องสปัตเตอร์ซึ่งอยู่ในบรรยากาศของแก๊สอาร์กอน (Ar) ทำให้แก๊สแตกตัวเป็นไอออน เกิดเป็นพลาสมาขึ้นมาในบริเวณระหว่างขั้วคาโทดและขั้วแอโนด เนื่องจากขั้วแอโนดติดอยู่กับผนังห้องไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

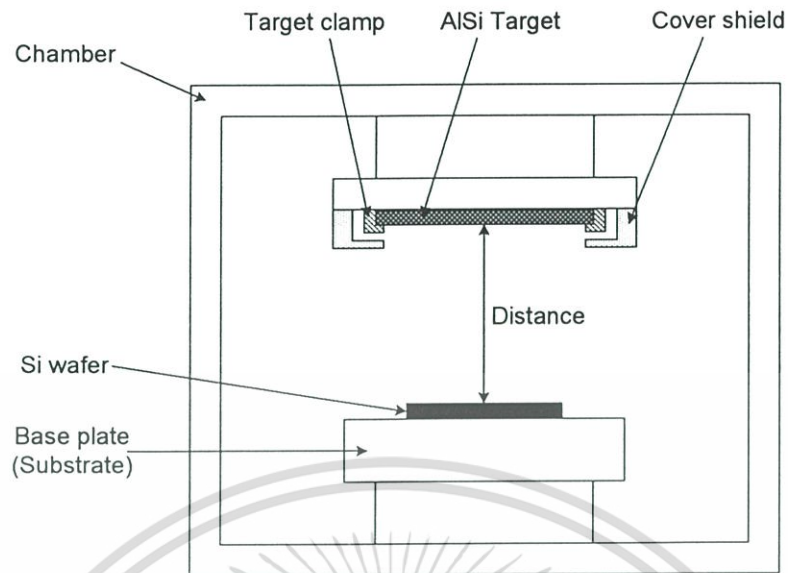
สปีดเตอร์ ทำให้พื้นที่ของซั้วอาโนดมากกว่าซั้วคาโธด จึงเกิดการเหนี่ยวนำซั้วคาโธดให้มีศักย์เป็นลบ และดึงดูดไอออนบวกในพลาสมาให้พุ่งเข้าชน โดย Al-Si ที่ซั้วคาโธด ทำให้อะตอมของ Al-Si กระเด็นออกมาและสะสมบนผิวฐานรองแผ่นซิลิคอนซึ่งวางที่ซั้วอาโนด เกิดเป็นฟิล์มโลหะ Al-Si



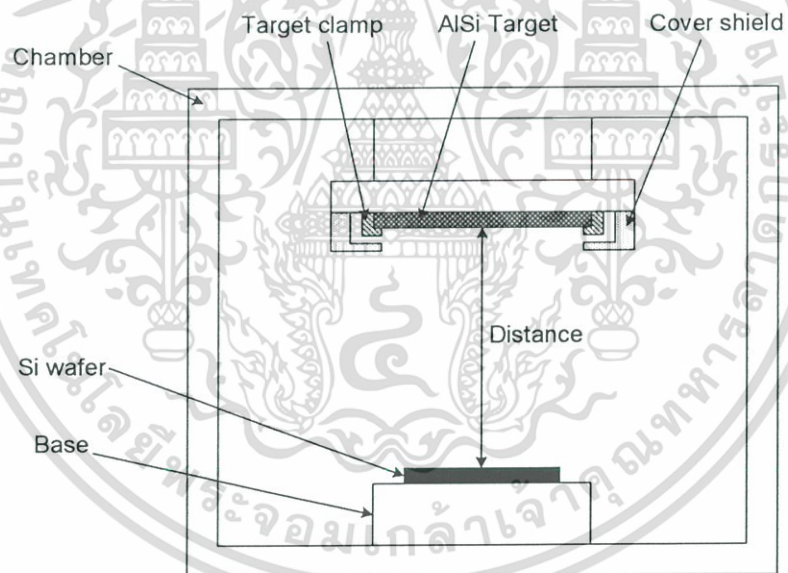
รูปที่ 3.2 ระบบการสปีดเตอร์แบบ อาร์เอฟไดโอด

ขั้นตอนการสปีดเตอร์ เริ่มด้วยการนำแผ่นซิลิคอน หนา 100) วางลงบนซั้วอาโนด แล้วดูดอากาศออกจากห้องสปีดเตอร์จนกระทั่งเหลือความดันต่ำกว่า  $5 \times 10^{-7}$  บาร์ เพื่อทำความสะอาดห้องสปีดเตอร์ จากนั้นปล่อยแก๊สอาร์กอนเข้าไปในห้องสปีดเตอร์จนกระทั่งถึงความดัน  $2 \times 10^{-1}$  bar โดยค่อยๆ เพิ่มกำลัง RF ขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเกิดพลาสมาขึ้นในห้องสปีดเตอร์ จากนั้นปรับความดันให้ได้  $2 \times 10^{-3}$  bar [13,10] ปรับกำลัง RF จนได้ค่าที่จะทำการสปีดเตอร์ ทำการพรี-สปีดเตอร์ (pre-sputter) โดยปล่อยให้ระบบอยู่ในเงื่อนไขที่จะทำการสปีดเตอร์เป็นเวลา 5 นาที เพื่อทำความสะอาดผิวหน้าของ Al-Si จึงเปิดชัตเตอร์ออกเพื่อเริ่มทำการสปีดเตอร์ ดังแสดงตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.3 แผนภาพภายใน chamber ของเครื่องสเปคเตอร์

(ก) ระยะห่างระหว่างขั้วคาโทดกับขั้วแอโนด ที่ 27 cm

(ข) ระยะห่างระหว่างขั้วคาโทดกับขั้วแอโนด ที่ 37 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

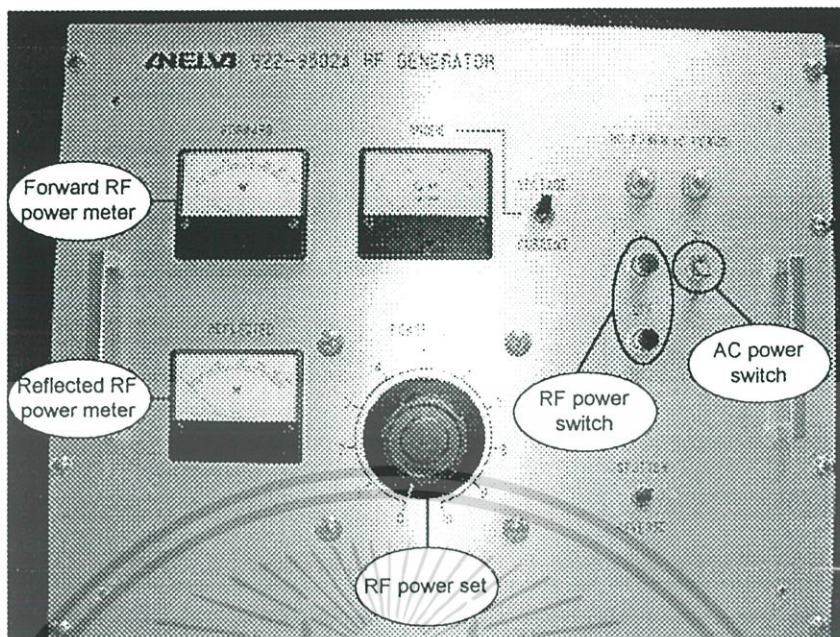
กระบวนการสร้างฟิล์มโลหะเริ่มด้วยการปรับระยะห่างระหว่างขั้วคาโทดและขั้วแอโนด ซึ่งมีสองระยะคือ 27 และ 37 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งระยะความห่างที่ 27 mm จะมีขีดจำกัดเรื่องความดันที่ให้อ่างฟิล์ม ซึ่งจะมีช่วงการใช้งานได้ที่ความดันต่ำสุดที่  $2 \times 10^{-2}$  bar [13] ผลของฟิล์มโลหะที่ได้มีสีเทาดำและมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นฉนวน ดังนั้นจึงต้องมีการปรับระยะห่างระหว่างขั้วให้มากขึ้นไปที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 37 mm จะทำให้ช่วงความดันในการสเปกตรัมลดลงอยู่ในช่วง  $2-5 \times 10^{-3}$  bar ทำให้ได้ฟิล์มโลหะมีคุณภาพดีขึ้น ในระหว่างกระบวนการสร้างฟิล์มโลหะจะเกิดความร้อนทั้งขั้วคาโทดและขั้วแอโนดเนื่องจากอะตอมของอาร์กอนวิ่งไปชนขั้วคาโทด ซึ่งมีโลหะ Al-Si ทำให้อะตอมของโลหะกระเด็นตกลงมาที่แผ่นซิลิคอนและคลายความร้อนลงบนแผ่นซิลิคอน ซึ่งความร้อนนี้จะมีผลการเรียงตัวอะตอมโลหะ Al-Si ดังนั้นต้องควบคุมอุณหภูมิที่ขั้วแอโนดไม่ให้เกิน  $40^{\circ}\text{C}$  จะได้ฟิล์มโลหะที่มีคุณภาพดีขึ้น

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการสเปกตรัม Al-Si ในการทดลอง

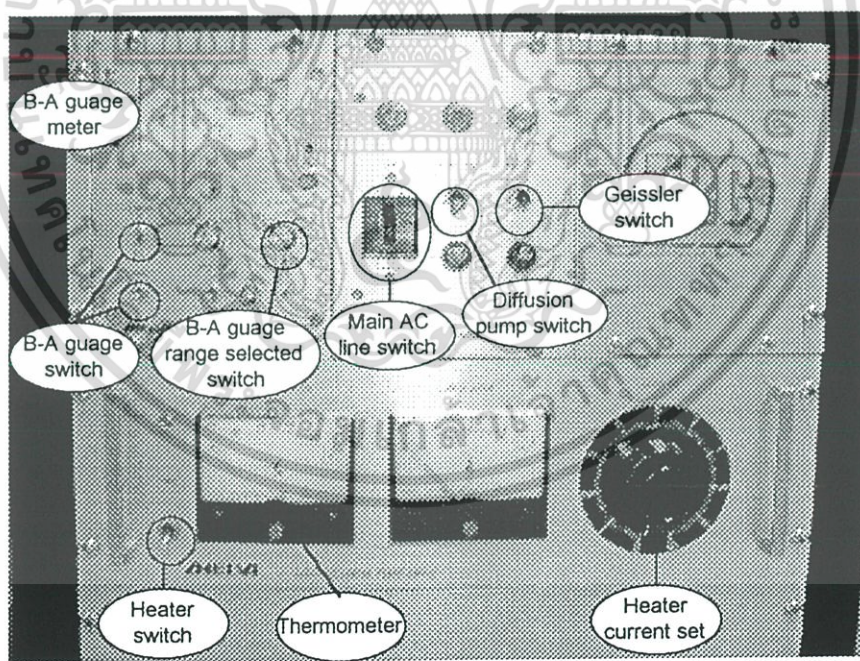
เงื่อนไข	รายละเอียด
ขั้ว คาโทด	เป้าโลหะ Al-Si(2wt%) ขนาด $\varnothing$ 80 mm. ความบริสุทธิ์ 99.999%
บรรยากาศ	อาร์กอน 99.99 %
ความดัน	$2-5 \times 10^{-3}$ bar
ระยะห่างของขั้วคาโทดและขั้วแอโนด	37 mm
กำลังงาน RF	100 - 150 วัตต์
อุณหภูมิของแอโนด	$25 - 30^{\circ}\text{C}$
ฐานรอง	ซิลิคอน หนา(100) ปกคลุมด้วยซิลิคอนไดออกไซด์ 0.3 ไมครอน

จากเงื่อนไขของการสเปกตรัมทั้งหมดสามารถอธิบายเป็นขั้นตอนการทำงานในระบบของเครื่อง SPE-210 ไดโอดสเปกตรัมได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 Panel of RF Generator



รูปที่ 3.5 Panel of Pump Switch ,Ionizing Gauge and Heater

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มโลหะอลูมิเนียมด้วยวิธีการสปัตเตอร์

1. ติดตั้ง AISi target
2. เช็กระบบ
 

chamber	: Close
main valve (MV.)	: Close
roughing valve (RV.)	: Close
foreline valve (FV.)	: Close
needle valve (NV.)	: Close
stop valve	: Close
cooling water valve	: Close
3. เปิดวาล์ว cooling water ( หมุน 2.5 รอบ และวาล์วทุกตัวเปิด)
4. เปิดสวิตช์ rotary pump (main switch ) และเปิดสวิตช์ diffusion pump ( diffusion pump จะทำงานหลังจากเปิดแล้วประมาณ 20 นาที ตั้งอุณหภูมิไว้ที่  $400^{\circ}\text{C}$  แล้วรอประมาณ 2-5 นาทีก่อนเปิดวาล์ว RV.
5. เปิดวาล์ว RV. (ค่อยๆหมุน) และรอจนกว่าจะได้ pressure  $< 1 \times 10^{-1}$  bar (จะรอประมาณ 10-30 นาที ในระหว่างนี้ให้ทำความสะอาดห้องอาร์กอนแก๊ส(Ar)ด้วย โดยเมื่อได้ pressure  $< 1 \times 10^{-1}$  bar แล้วให้เปิดวาล์ว NV. และ stop valve รอจนกว่า pressure  $< 1 \times 10^{-1}$  bar อีกจึงปิดวาล์ว NV. แล้วเปิดที่หัวถังของอาร์กอนแก๊ส ปรับความดันให้ได้ 10 Psi แล้วปิดหัวถังอาร์กอนแก๊ส กลับมาเปิดวาล์ว NV. ใหม่รอให้ได้ pressure  $< 1 \times 10^{-1}$  bar อีกครั้ง ทำอย่างนี้ประมาณ 3 ครั้ง เมื่อครบแล้วให้ปิด stop valve และเปิดอาร์กอนแก๊สมาข้างไว้ในท่อ)
6. ปิดวาล์ว RV.
7. เปิดวาล์ว FV. แล้วทดสอบใช้ geissler tube วัดอากาศใน Chamber (geissler tube ไม่ควรติด) รอประมาณ 3 นาที
8. เปิดวาล์ว MV. (ค่อยๆเปิดจนสุด) และรอจนระบบมี pressure ใน chamber  $< 1 \times 10^{-5}$  bar โดยวัดได้จาก B-A vacuum gauge (หรือ ion-gauge )
9. เติม liquid  $\text{N}_2$  เมื่อได้ pressure  $\sim 1 \times 10^{-5}$  bar และเติมทุกๆ 30 นาทีจนกว่าจะได้ base pressure  $< 5 \times 10^{-7}$  (ปกติจะใช้  $4.8 \times 10^{-7}$  bar)
10. ปิดสวิตช์ B-A vacuum gauge
11. ปิดวาล์ว NV. แล้วเปิดหัวถัง Ar gas ปรับ regulator ให้ได้ 10 Psi
12. ปิดวาล์ว MV.
13. เปิดวาล์ว NV. สำหรับ flow Ar gas โดยหมุนวาล์ว NV. ประมาณ 2.5-3 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูงาน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14. เปิดวาล์ว MV. (ค้อยๆหมุน) สำหรับควบคุม pressure ให้ได้  $4 \times 10^{-2}$  bar ขณะทำ sputtering
15. เปิดสวิตช์ RF power switch โดย
  - AC power switch : On
  - RF power switch : On
16. ปรับ RF power set (ยังไม่เปิด Shutter)
  - forward power 100 W.
  - reflect power < 10 W.
  - anode voltage < 1.5 kV.
17. ทำการ pre-sputter โดยยังไม่ต้องเปิด shutter เป็นเวลา 10 นาที
18. เปิด shutter ทำการ sputtering ตามเวลาที่ต้องการ
19. ปิด shutter
20. ปรับ RF power set ของ forward power ลดลงจนเป็น 0 แล้วปิดสวิตช์ของ RF power switch
21. ปิด Ar gas โดย
  - ปิดวาล์ว NV.
  - stop valve
  - ปิดหัวถังแก๊ส
22. ปิดวาล์ว MV. จนสุด และรออีก 1 ชั่วโมง
23. ปิดสวิตช์ AC switch ของ RF power switch หลังจากปิดสวิตช์ RF switch แล้ว 15 นาที
24. ปิดวาล์ว MV.
  - ถ้าทำต่อไม่ต้องปิด diffusion pump ให้นำอุปกรณ์ออกได้ แล้วใส่อุปกรณ์ใหม่เข้าไป แล้วทำตามขั้นตอนที่ผ่านมา โดยเริ่มจากนำอุปกรณ์ใส่แล้วปิด chamber แล้วทำตามขั้นตอนตั้งแต่ขั้นตอนที่ 5 เป็นต้นไป โดยไม่ต้องทำความสะอาดท่อ Ar gas อีก
25. ปิดสวิตช์ diffusion pump แล้วรออีก 30 นาที
26. ปิดวาล์ว FV.
27. ปิดสวิตช์ rotary pump
28. leak pressure ของ rotary pump ในทันที
29. ปิดระบบ cooling water

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.1 ผลการดำเนินการศึกษาเงื่อนไขของการเคลือบฟิล์มอลูมิเนียมซิลิคอนลงบนแผ่นซิลิคอนออกไซด์

สำหรับขั้นตอนนี้ได้ทำการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเคลือบฟิล์มอลูมิเนียมซิลิคอนโดยการสร้างฟิล์มโลหะเคลือบลงบนฐานรองที่มีซิลิคอนไดออกไซด์เคลือบอยู่ด้านบนของพื้นผิวซิลิคอน โดยใช้พารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

- base Pressure <math>< 1 \times 10^{-6}</math> bar
- operating Pressure  $\approx 2 \times 10^{-3}$  bar
- forward / Reflect Power of RF : 100 / 10 Watt
- cool down time  $\approx 1$  ชม.

จากนั้นทำการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มดังนี้

- ค่า resistance ของฟิล์ม :  $0.2 \Omega / \square$
- ค่า reflectance ของฟิล์ม : 100 %
- ค่า deposition rate ของฟิล์ม :  $\approx 70$  อังสตรอม/นาที
- สีของแผ่นฐานรอง และ AISi : มันวาวเหมือนกระจก

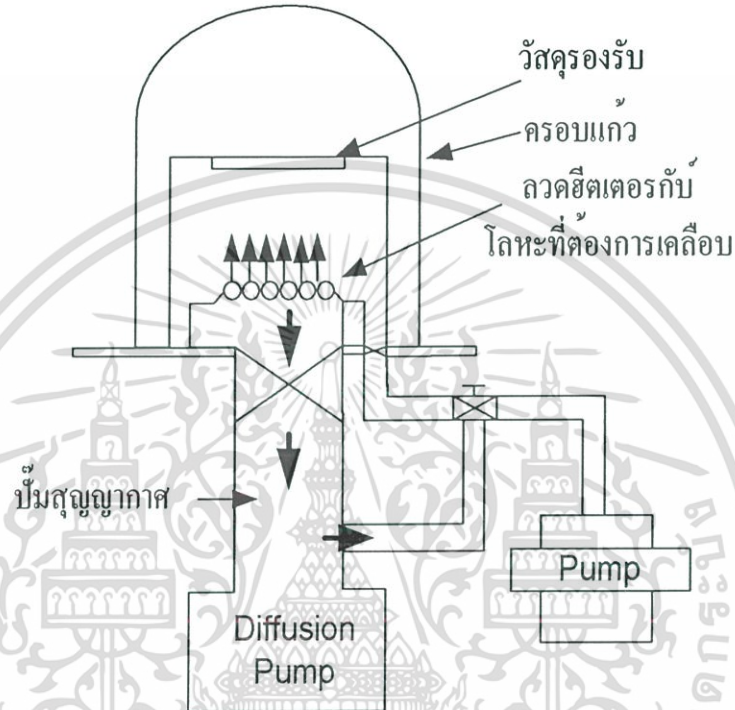


รูปที่ 3.6 ภาพถ่ายฟิล์มอลูมิเนียมซิลิคอนที่เคลือบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 กระบวนการสร้างฟิล์มโลหะด้วยวิธีการระเหยในสุญญากาศบนฐานรองซิลิคอน และซิลิคอนไดออกไซด์

กระบวนการโลหะด้วยวิธีการระเหยในสุญญากาศเป็นอีกวิธีหนึ่งในวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้ใช้ในการสร้างฟิล์มโลหะเพื่อใช้ทำเป็นขั้วโลหะ โดยหลักการพื้นฐานได้ถูกอธิบายไว้ในบทที่ 2



รูปที่ 3.7 โครงสร้างของเครื่อง filament evaporation

รูปที่ 3.7 เป็นรูปที่แสดง โครงสร้างของกระบวนการโลหะด้วยวิธีด้วยวิธีการระเหยในสุญญากาศ โดย chamber ที่ได้แสดงไว้เป็นครอบแก้วรูปทรงระฆังคว่ำ (bell jar) เมื่อเริ่มต้นภายใน chamber จะมีความดันบรรยากาศปกติจะถูกดูดอากาศออกโดยใช้ mechanical pump จนความดันภายใน chamber ได้ประมาณ  $10^{-3}$  bar จะวัดความดันที่จูนนี้โดย gessisler's tube จากนั้นเมื่อแรงดันภายใน chamber ได้ประมาณ  $10^{-3}$  bar แล้วทำการเปิดระบบของ diffusion pump เพื่อให้ diffusion pump ทำการช่วยลดแรงดันใน chamber ลงอีกจนได้ค่าประมาณ  $10^{-6}$  bar จึงเริ่มกระบวนการเคลือบฟิล์มโลหะ โดยในการวัดความดันที่เป็นความดันต่ำจะต้องใช้ ionization gauge เป็นตัววัด เมื่อความดันภายในครอบแก้วลดลงจนถึงค่าประมาณ  $10^{-6}$  bar ตามต้องการ หลังจากนั้นให้แรงดันและกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดที่ใส่ทำมาจากทังสเตน

เมื่อได้ถูกทำให้ร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าจำนวนมากที่ไหลผ่านทำให้ลวดอุณหภูมิเนี่ยมที่วางอยู่บนนี้ให้เกิดการหลอมเหลว ซึ่งลวดอุณหภูมิเนี่ยมจะไหลมารวมกันเป็นจุดเดียว ซึ่งในขั้นตอนนี้จะต้องเฝ้าระวังให้ดี ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่อยเพิ่มแรงดันให้กับไส้ไปเรื่อยๆจนกว่าอุณหภูมิของโลหะอลูมิเนียมจะเลยจุดหลอมเหลวและระเหยเป็นไอฟุ้งกระจายไปเคลือบแผ่นผลึกซิลิคอนที่วางอยู่ใน chamber

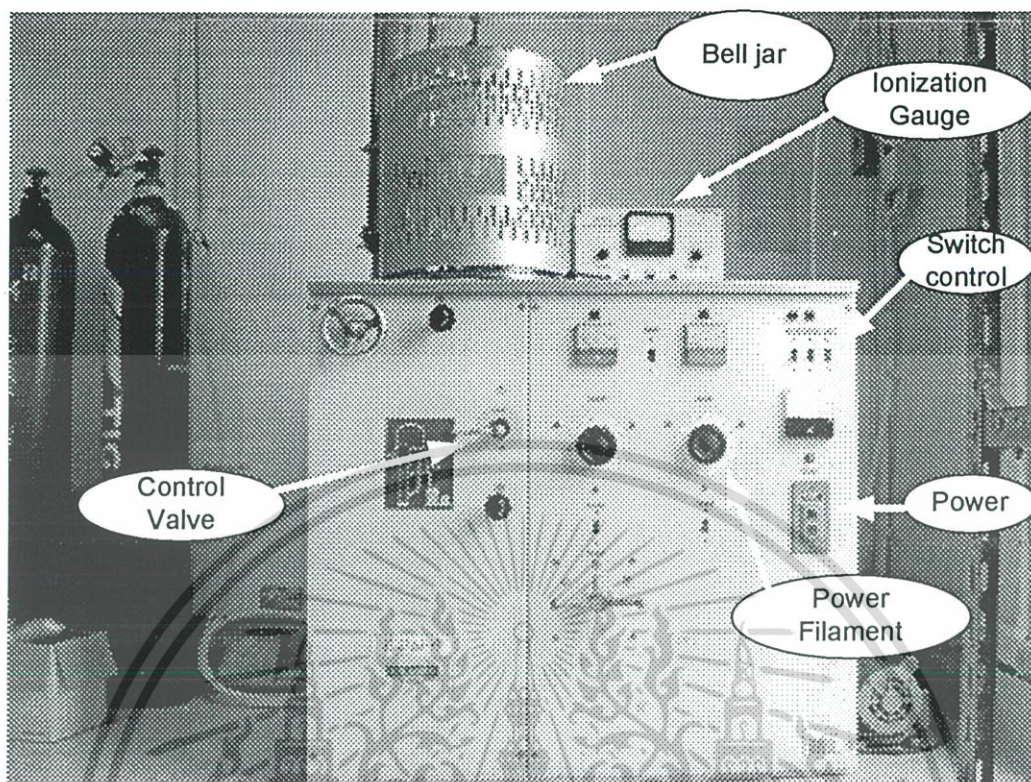
ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขของวิธีการระเหยในสุญญากาศของฟิล์ม AI ในการทดลอง

เงื่อนไข	รายละเอียด
ลวดโลหะอลูมิเนียม	ความบริสุทธิ์ 99.999% ยาว 1 cm. จำนวน 8 ไส้
ความดัน	$10^{-6}$ bar
ลวดความร้อน	ทังสเตน
กำลังงาน Filament	30-40 วัตต์
ฐานรอง	ซิลิคอน ระบาย(100) ปกคลุมด้วยซิลิคอนไดออกไซด์ 0.3 ไมครอน

#### ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มโลหะอลูมิเนียมในสุญญากาศ

1. ทำความสะอาดและเตรียมแผ่นซิลิคอนให้แห้ง (ซิลิคอนเคลือบบนด้วยซิลิคอนไดออกไซด์)
2. เตรียมลวดโลหะอลูมิเนียม ยาว 1cm. จำนวน 8 ไส้
3. ทำความสะอาดและเตรียมลวดโลหะอลูมิเนียมให้แห้ง
4. วางแผ่นซิลิคอนลงบน chamber ที่ตำแหน่งเหมาะสมเพื่อให้ชั้นสารที่เคลือบมีความสม่ำเสมอ
5. ติดตั้งไส้ความร้อนที่ทำจากทังสเตน และลวดอลูมิเนียมใน chamber
6. เปิดวาล์วของ chamber ทำการดูดอากาศขั้นต้นออกให้ความดันภายในต่ำลงเหลือ  $10^{-3}$  bar โดยใช้ mechanical pump
7. ปิดวาล์วของ mechanical pump เปิดวาล์ว diffusion pump เพื่อทำให้ความดันใน chamber ลดลงเหลือ  $10^{-6}$  -  $10^{-7}$  bar
8. จ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ไส้ความร้อนทังสเตน โดยการเพิ่มกำลังงานไฟฟ้าขึ้นไปทีละน้อยจนกว่าโลหะอลูมิเนียมที่อยู่บนขดลวดความร้อนจะค่อยหลอมตัวเข้าด้วยกัน
9. เริ่มทำโลหะอลูมิเนียมให้เป็นไอ โดยมี shutter ปิดอยู่เพื่อมิให้สารที่เจือปนที่อยู่ในภายในโลหะอลูมิเนียมเข้าไปเคลือบบนแผ่นผลึกซิลิคอน
10. เปิด shutter ทำการเคลือบฟิล์มโลหะลงไปทีแผ่นซิลิคอนให้ได้ความหนาตามต้องการ
11. หยุดการเคลือบโลหะ ปล่อยให้ทุกอย่างใน chamber เย็นตัวลง
12. ปล่อยให้วาล์วต่างๆเข้าไปใน chamber ซ้ำๆจนความดันปกติ เสร็จจึงนำออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในหน่วยงานเท่านั้น ไม่สามารถนำออกเผยแพร่ได้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 เครื่องเคลือบฟิล์มโลหะแบบระเหยในสุญญากาศ

### 3.2.1 ผลการดำเนินการศึกษาเงื่อนไขของการเคลือบฟิล์มอลูมิเนียมบริสุทธิ์ลงบนแผ่นซิลิคอนออกไซด์

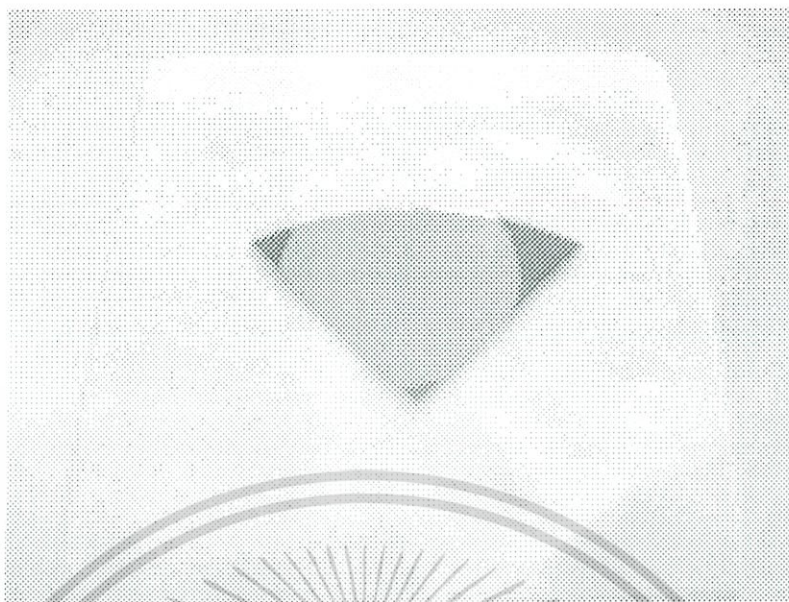
สำหรับขั้นตอนนี้ ได้ทำการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเคลือบฟิล์มอลูมิเนียมบริสุทธิ์ โดยการสร้างฟิล์มโลหะเคลือบลงบนฐานรองที่มีซิลิคอนไดออกไซด์เคลือบอยู่ด้านบนของพื้นผิวซิลิคอน โดยใช้พารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

- base Pressure <  $1 \times 10^{-6}$  bar
- power Filament : 30-40 Watt
- cool down time  $\approx$  2 Hours

จากนั้นทำการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มดังนี้

- ค่า resistance ของฟิล์ม :  $0.2 \Omega / \square$
- ค่า reflectance ของฟิล์ม : 100 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนและ AI เท่านั้น มันทัวร์เหมือนกระจก ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 ภาพถ่ายฟิล์มอลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่เคลือบ

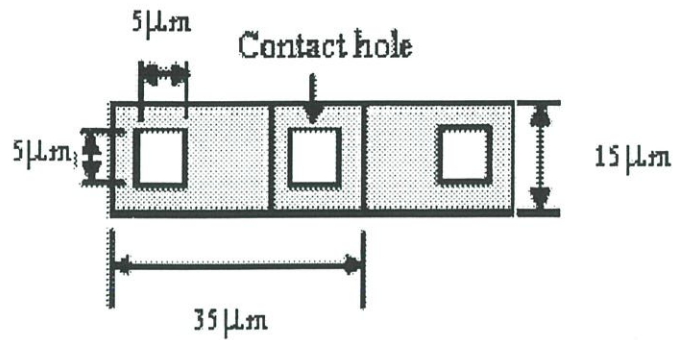
### 3.3 การออกแบบลวดลายโลหะแบบ 1 ชั้นในเทคโนโลยีวงจรรวมระดับ 5 ไมโครเมตร

เมื่อวงจรรวมได้ถูกสร้างขึ้นเรียบร้อยแล้วจำเป็นต้องมีเส้นลวดโลหะและขาโลหะต่อออกสู่วงจรรายนอกเพื่อเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสร้างรอยสัมผัส (contact) ระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำที่เป็นส่วนต่างๆของวงจรรวม ซึ่งรอยสัมผัสของสารกึ่งตัวนำกับโลหะในลักษณะนี้ปกติจะมีคุณสมบัติเป็น "รอยสัมผัสโอห์มิก" กล่าวคือจะไม่มีผลเกี่ยวข้องกับทิศทางการไหลของกระแสโดยกระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้ทั้งสองทิศทาง [11] ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษารอยสัมผัสโอห์มิกที่ทำเป็นรอยสัมผัสแบบ 2 รอยต่อในโครงสร้างของ contact chain กล่าวคือ contact chain เป็น contact แบบ 2 รอยต่อที่มีการเรียงรอยต่อกันเป็นแบบอนุกรมกันไปเรื่อยๆซึ่งมีลักษณะคล้ายกับลูกโซ่ ตามแต่จำนวน contact ที่จะใช้ทดสอบจุดเชื่อมต่อทางไฟฟ้าและใช้ในการหาความต้านทานภายในรอยสัมผัสซึ่ง contact ทั่วไปไม่สามารถวัดได้ (จำนวน contact chain มีจำนวนมากเพื่อใช้ในการหาค่าเฉลี่ยของความต้านทานภายในให้ถูกต้องที่สุด)

ในงานวิจัยนี้เราได้ทำการสร้างลวดลายโลหะของรอยสัมผัสโอห์มิกแบบ 2 รอยต่อโดยการออกแบบเป็น contact chain เพื่อใช้ศึกษาความต้านทานภายในรอยสัมผัสโอห์มิกแบบ 2 รอยต่อและยังใช้เป็นตัวทดสอบการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าที่มี contact หลาย contact ต่ออยู่ภายในวงจรรวมอีกด้วย โดยการออกแบบลวดลายโลหะแบบ 1 ชั้น จะถูกสร้างในแบบของ contact chain ซึ่งจะมีกระบวนการสร้าง contact chain ดังต่อไปนี้ [12]

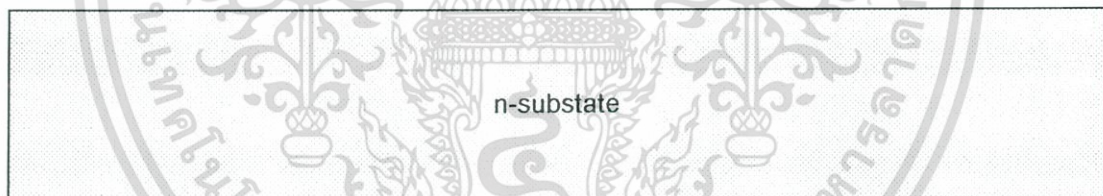
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของโรงเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

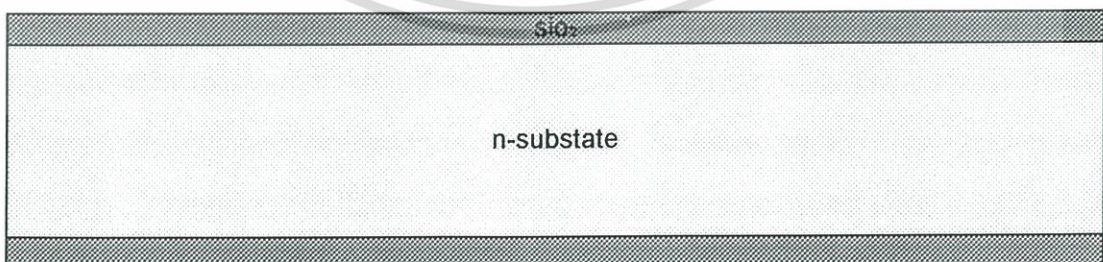


รูปที่ 3.10 มิติของขนาดของ contact chain

กระบวนการสร้างลวดลายโลหะที่ออกแบบเป็น contact chain จากรูปที่ 3.10 แสดงให้เห็นว่า contact chain มีแมสก์ในการสร้างทั้งหมด 3 แมสก์ โดยแมสก์แรกเป็นแมสก์ได้ป ขนาด  $35 \times 15 \mu\text{m}$  และแมสก์ที่ 2 จะเป็นแมสก์ contact hole ที่มีขนาด  $5 \times 5 \mu\text{m}$  แมสก์สุดท้ายเป็นแมสก์ metal มีขนาด  $35 \times 15 \mu\text{m}$  ซึ่งเป็นแมสก์ใช้สร้างเป็นลวดลายโลหะและเป็นแมสก์ที่ซ้อนทับกับ แมสก์ได้ปนั้น เอง ซึ่งมีกระบวนการสร้างดังแผนภาพต่อไปนี้



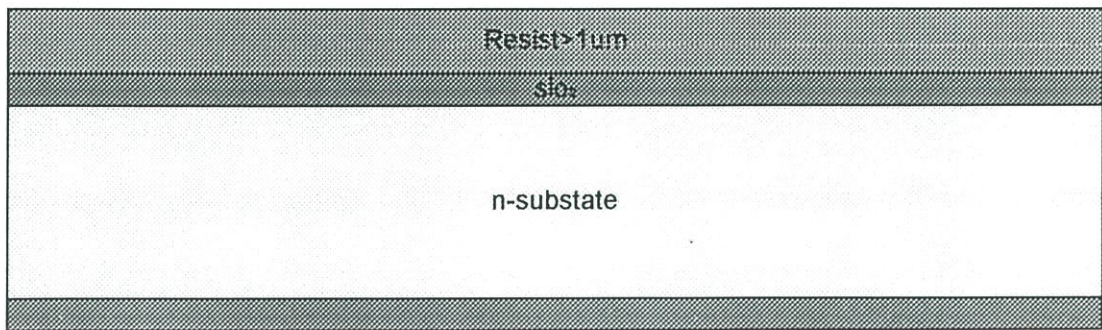
(ก) เตรียมแผ่นซิลิคอนไนเตรด



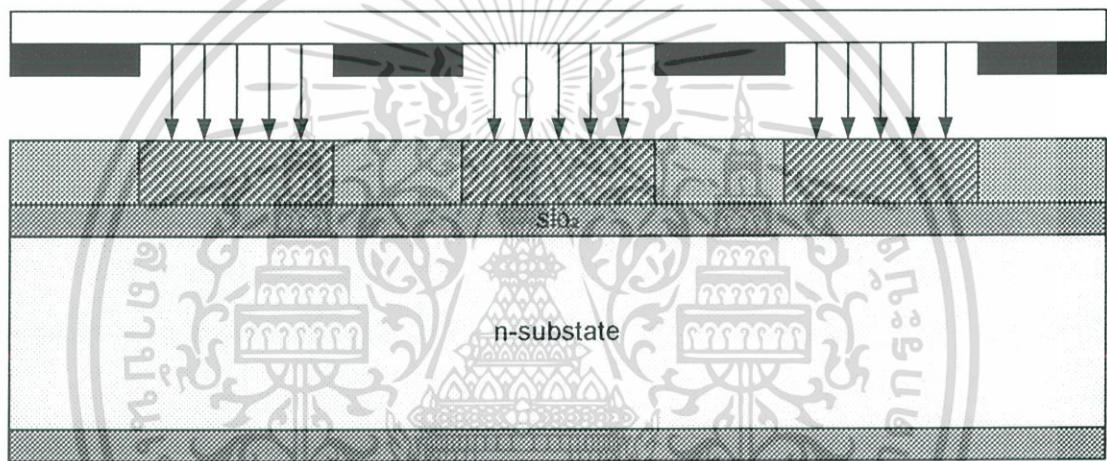
(ข) สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

รูปที่ 3.11 กระบวนการสร้างลวดลายโลหะ contact chain ในแมสก์แรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



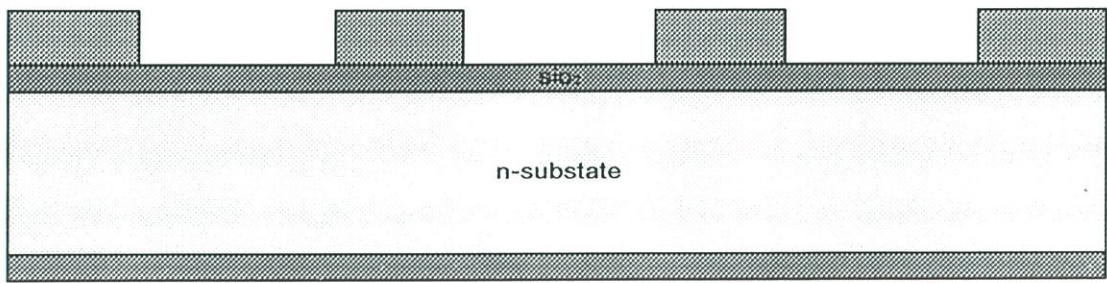
(ค) เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวกในกระบวนการ โฟโตลิโทกราฟี



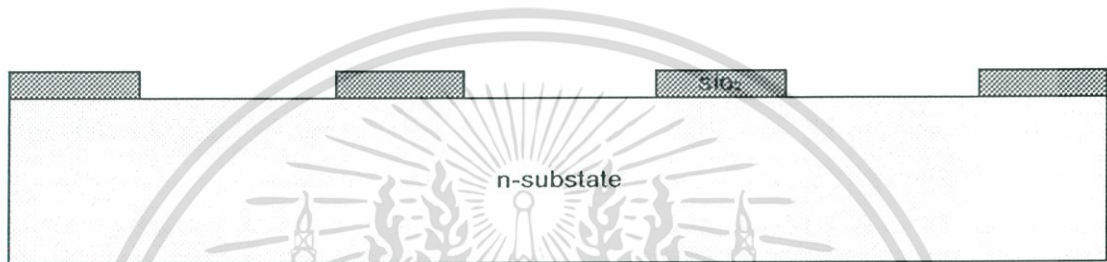
(ง) ฉายแสงเปิดช่องน้ำยาไวแสงชนิดบวกในแมสก์ที่ 1

รูปที่ 3.11 กระบวนการสร้างลวดลายโลหะ contact chain ในแมสก์แรก(ต่อ)

จากรูปที่ 3.11 เป็นขั้นตอนในการสร้างลวดลายโลหะโดยจะเริ่มจากการเตรียมแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ ที่ทำความสะอาดแผ่นเรียบร้อยแล้ว มาเข้าสู่กระบวนการออกซิเดชันเพื่อสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนา 500 nm ในรูปที่ 3.11 (ข) ต่อจากนั้นเข้าสู่กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวกที่มีความหนามากกว่า  $1.5\mu\text{m}$  ทำการฉายแสงผ่านแมสก์ที่ 1 (แมสก์ โคป) ส่วนของน้ำยาไวแสงที่ถูกแสงจะหลุดออกเมื่อถูก develop เกิดเป็นลวดลายขึ้นบนน้ำยาไวแสง ดังแสดงในรูปที่ 3.11 (ค,ง)



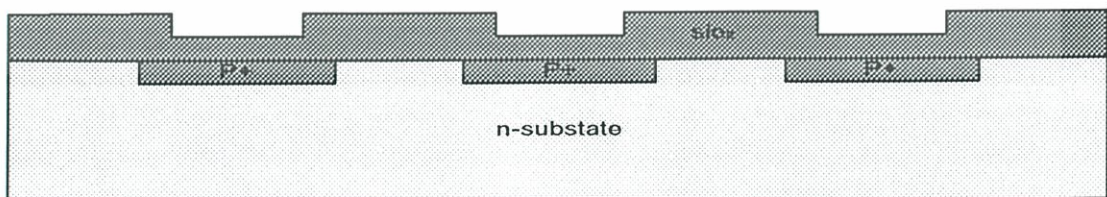
(ก) Develop สร้างลวดลายขึ้นบนน้ำยาไวแสง



(ข) กัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เปิดรูเพื่อจะแพร่สารเจือ



(ค) แพร่สารเจือโบรอน สร้างชั้นสารกึ่งตัวนำ p<sup>+</sup>

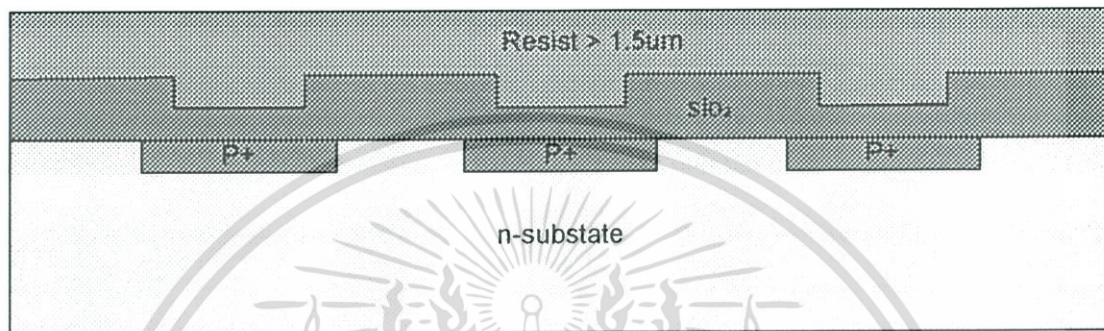


(ง) สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เคลือบบนแผ่นเวเฟอร์

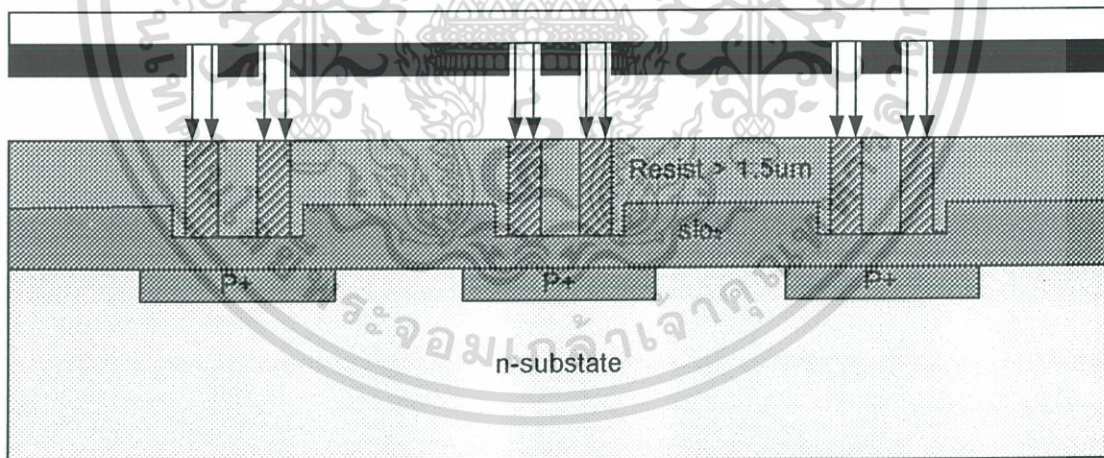
รูปที่ 3.12 กระบวนการสร้าง contact chain ที่ถูกได้ไปด้วยสารเจือโบรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อน้ำยาไวแสงหลุดออกเกิดเป็นลวดลายบนน้ำยาไวแสงดังแสดงในรูปที่ 3.12(ก)จากนั้นนำไปทำ postbake เพื่อให้ชั้นของ น้ำยาไวแสงยึดติด กับ ผิวของ ซิลิคอนไดออกไซด์ชั้นตอน ต่อมาเป็นกระบวนการกัดแบบเปียกเพื่อลอกชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และเปิดช่องในการได้ปในรูปที่ 3.12 (ข) กระบวนการต่อมาเป็นการแพร่สารเจือโบรอนหรือฟอสฟอรัสเพื่อทำให้เกิดเป็นชั้นสารกึ่งตัวนำ p<sup>+</sup> แล้วสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เคลือบไปที่แผ่นเวเฟอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.12 (ค,ง)

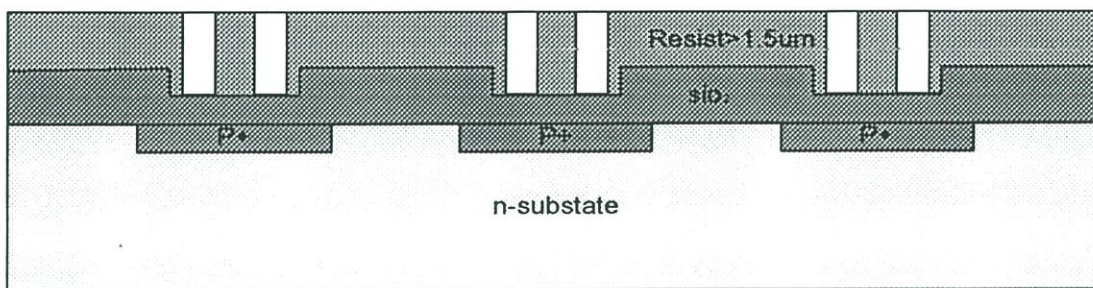


(ก) กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก

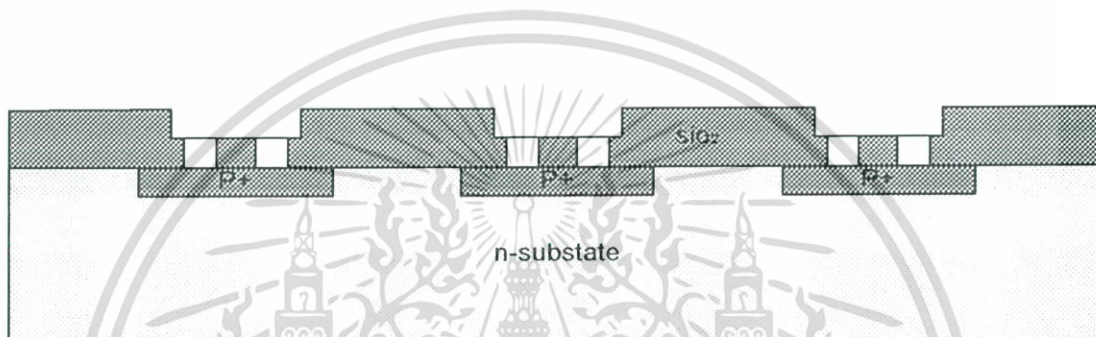


(ข) ฉายแสงเปิดช่องน้ำยาไวแสงชนิดบวก ในแมสก์ที่ 2  
รูปที่ 3.13 กระบวนการสร้าง contact chain ที่ในแมสก์ที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



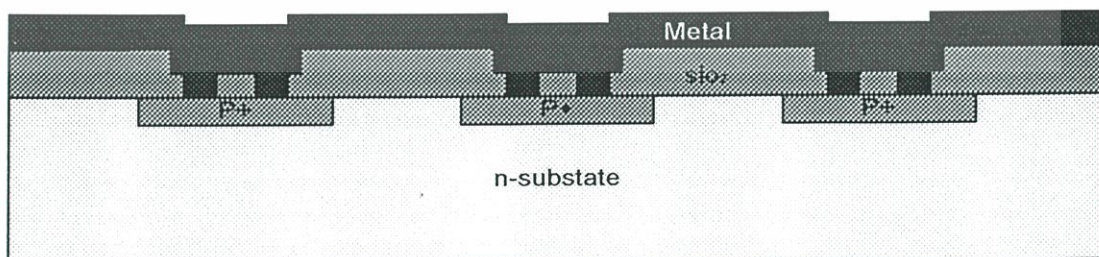
(ค) Develop สร้างลวดลายบนน้ำยาไวแสง



(ง) Develop สร้างลวดลายบนน้ำยาไวแสง

รูปที่ 3.13 กระบวนการสร้าง contact chain ที่ในแมสก์ที่ 2(ต่อ)

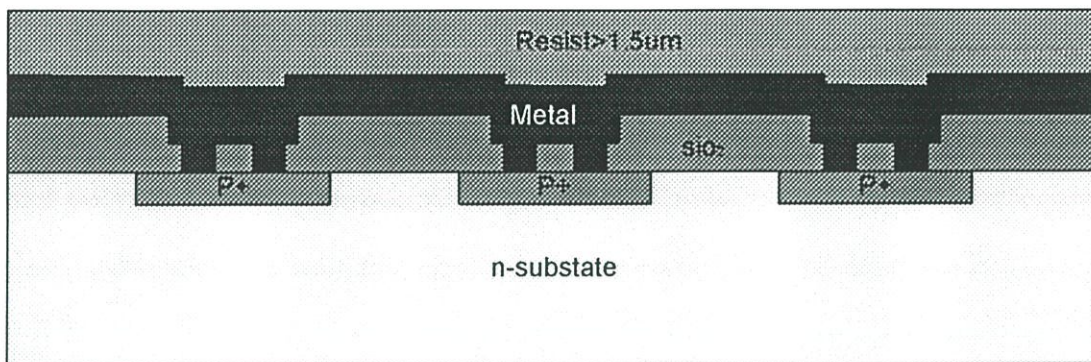
ขั้นตอนต่อมาเป็นกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี[19] เริ่มจากการเคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวกในรูปที่ 3.13(ก)ลงบนแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ ฉายแสงผ่านแมสก์ 2 เป็นแมสก์ contact hole ทำการ develop สร้างลวดลายลงบนน้ำยาไวแสง(ในส่วนน้ำยาไวแสงที่ถูกแสงจะหลุดออก)หลังจากนั้นเป็นกระบวนการกัดแบบเปียกเพื่อเปิดช่อง contact hole ที่สร้างเป็นขั้วโลหะในรูปที่ 3.13 (ค,ง)



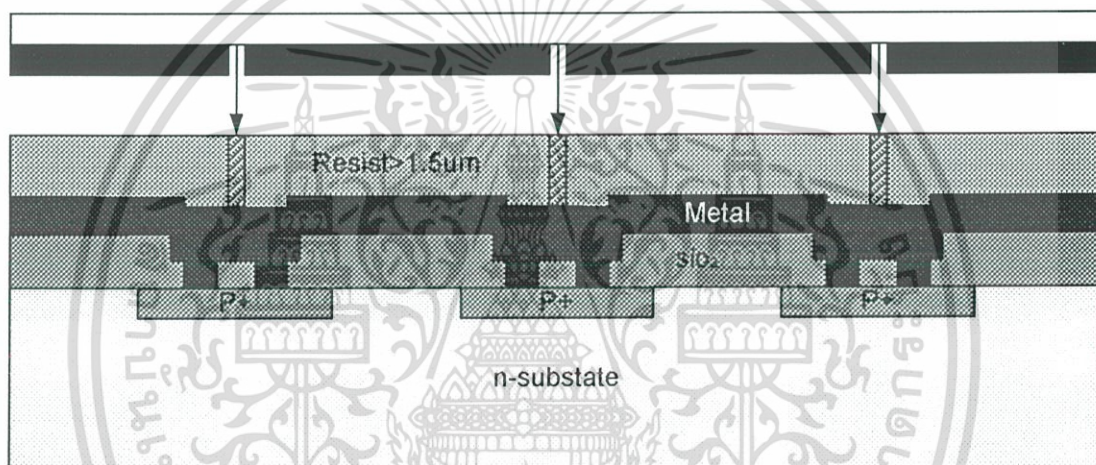
(ก) สร้างชั้นฟิล์มโลหะอะลูมิเนียม

รูปที่ 3.14 กระบวนการสร้าง contact chain ที่ในแมสก์ที่ 3

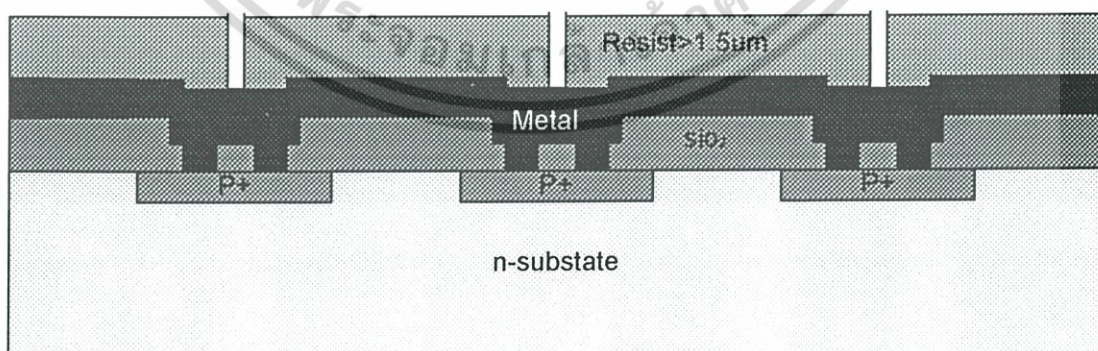
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก



(ค) ฉายแสงเปิดช่องน้ำยาไวแสงชนิดบวก ในแมสก์ที่ 3

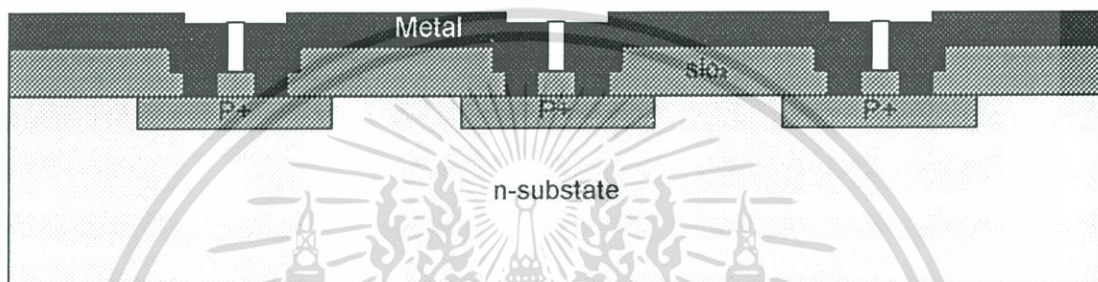


(ง) Develop สร้างลวดลายบนน้ำยาไวแสง

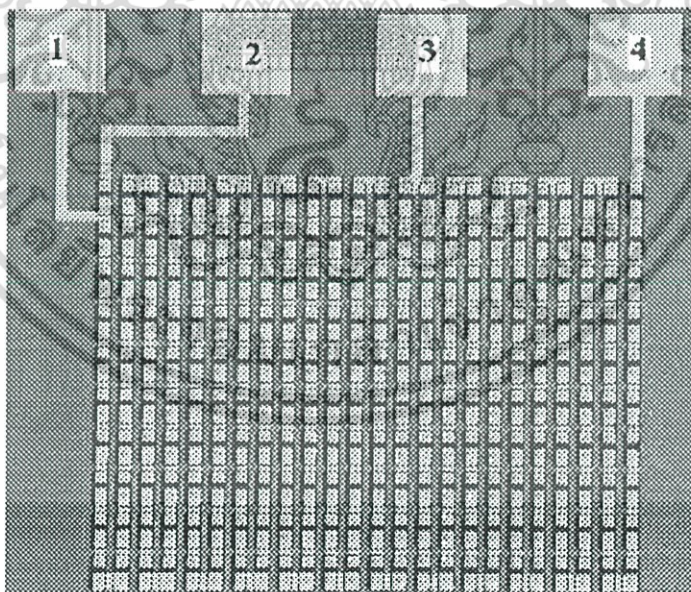
รูปที่ 3.14 กระบวนการสร้าง contact chain ที่ในแมสก์ที่ 3(ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการต่อมาสร้างชั้นฟิล์มโลหะอลูมิเนียมที่มีซิลิคอนผสมอยู่ 2%(AlSi:2wt%) โดยนำหน้าด้วยวิธีการสปีดเตอร์ ที่ความหนา 500nm ด้วยเงื่อนไขของการสปีดเตอร์ ในหัวข้อที่ 3.1 ในการสร้างฟิล์มโลหะ ในรูปที่ 3.14 (ก) แล้วนำมาเคลือบน้ำยาไวแสงในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี ฉายแสง และนำมา develop เพื่อขึ้นลวดลายของน้ำยาไวแสง ดังแสดงในรูปที่ 3.14 (ข,ค,ง) ต่อมาจึงเข้าสู่กระบวนการกัดเพื่อสร้างเป็นลวดลายโลหะและขั้วโลหะเป็นอันเสร็จสมบูรณ์ในการสร้าง contact chain แบบ 1 ชั้นดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ภาพตัดขวาง contact chain ที่สมบูรณ์



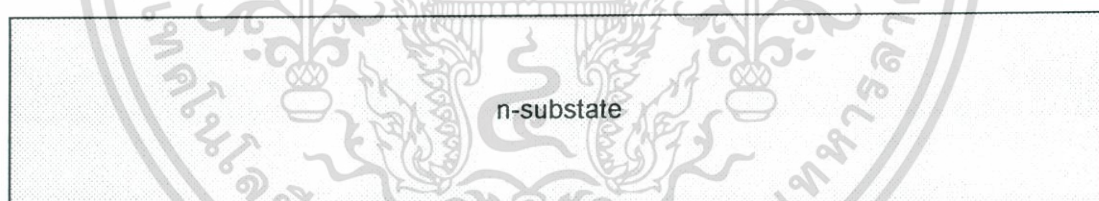
รูปที่ 3.16 ภาพถ่ายด้านบนของ contact chain จากกล้องไมโครสโคป

จากรูปที่ 3.16 ที่แสดงภาพถ่ายของ contact chain จะสังเกตว่าในวิทยานิพนธ์ได้ทำการออกแบบ contact chain ไว้ทั้งหมด 240 chain กับ 480 contact และ pad ที่ต่อออกมากับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้จริงจะต้องมีการคำนวณและออกแบบให้เหมาะสมกับเงื่อนไขการใช้งานจริง ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

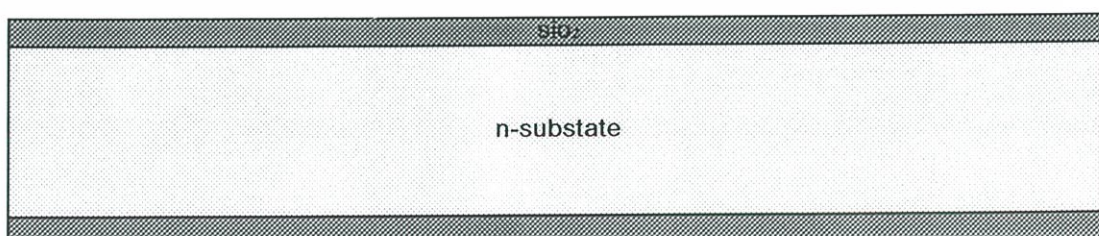
อุปกรณ์ภายนอกมีอยู่ 4 pad โดยในแต่ละ pad เป็นดังนี้ ระหว่าง pad 1 กับ pad 2 มี 1chain กับ 2 contact ระหว่าง pad 2 กับ pad 3 มี 140 chain กับ 280 contact และระหว่าง pad 2 กับ pad 4 มี 240 chain กับ 480 contact ทั้งนี้ที่ต้องสร้าง contact chain จำนวนมากก็เพราะว่าเพื่อต้องการทราบค่าเฉลี่ยที่แน่นอนของความต้านทานภายในรอยสัมผัส และทดสอบจุดเชื่อมต่อภายในวงจรรวมด้วย

### 3.4 กระบวนการสร้างลวดลายโลหะแบบ 2 ชั้น

การสร้างขั้วโลหะสัมผัสที่ใช้สำหรับต่อออกไปสู่อุปกรณ์ภายนอก โดยทั่วไปในเทคโนโลยีวงจรรวมจะมีการสร้างขั้วโลหะและลวดลายโลหะเป็นหลายชั้นเนื่องจากในวงจรรวมมีอุปกรณ์ภายในจำนวนมากเมื่อมีการเชื่อมต่อขั้วโลหะและลวดลายโลหะของอุปกรณ์ที่อยู่ภายในวงจรรวมจึงต้องใช้เส้นทางเดินกระแสที่ยาวมากในการเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายในวงจรรวมจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง ทำให้พื้นที่ของวงจรรวมมีขนาดใหญ่ขึ้นจากปัญหาดังกล่าวเราจึงทำการเชื่อมต่อลวดลายโลหะเป็นแบบหลายชั้น (Multilayer) เพื่อช่วยลดเส้นทางเดินกระแสและลดขนาดของวงจรรวมลง ซึ่งในส่วนของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการศึกษากการสร้างลวดลายโลหะแบบ 2 ชั้น เพื่อช่วยลดปัญหาดังกล่าว โดยจะมีกระบวนการสร้างดังแผนภาพด้านล่าง [18]

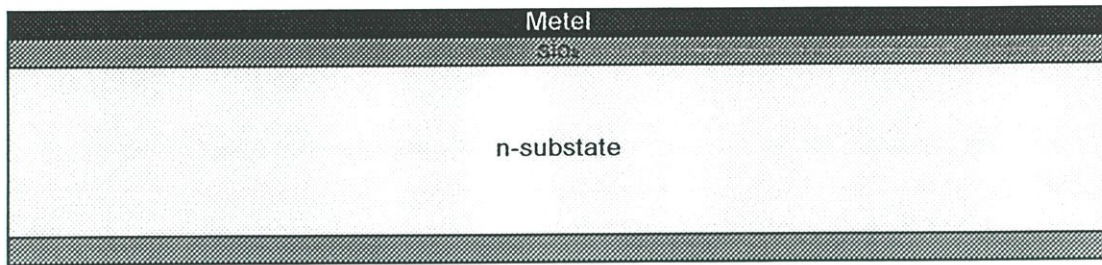


(ก) แผ่นเวอเฟอร์ ชนิดเอ็นทำความสะอาดแล้ว

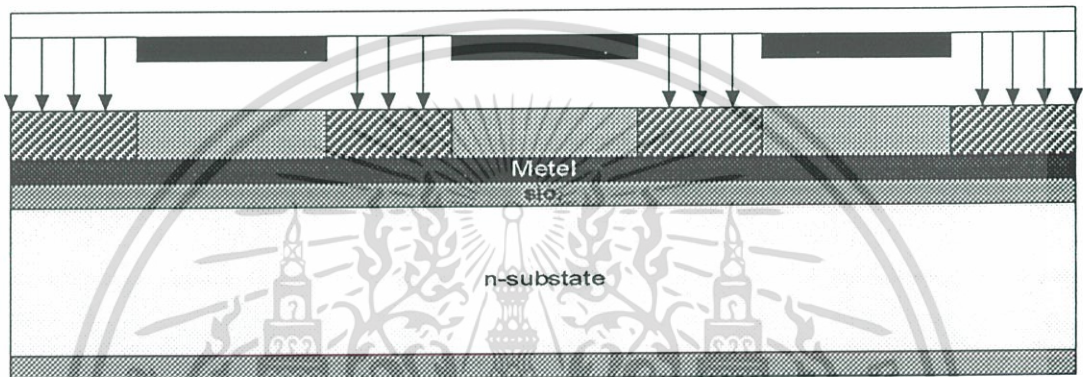


(ข) สร้างชั้น ซิลิคอนไดออกไซด์ หนา 500 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สรุปที่ 3.17 กระบวนการสร้างลวดลายโลหะแบบ 2 ชั้น ในแม่สีที่ 1 โยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



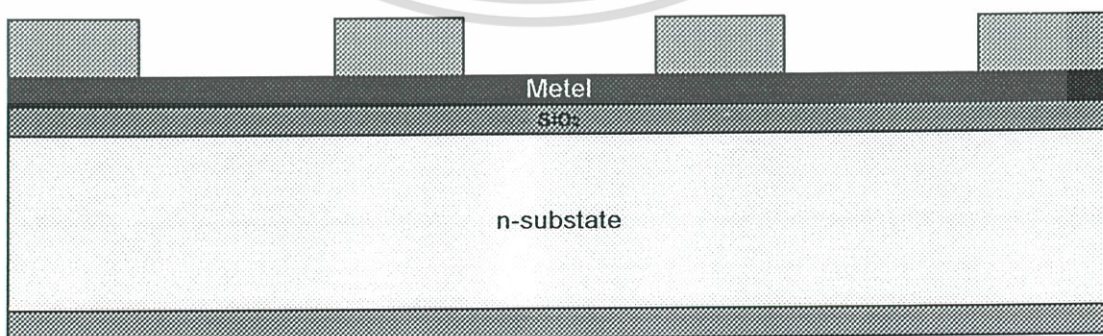
(ข) สร้างชั้น อลูมิเนียม ด้วยวิธีการสปัตเตอร์



(ง) กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี ด้วย แมสก์ 1

รูปที่ 3.17 กระบวนการสร้างลวดลายโลหะแบบ 2 ชั้น ในแมสก์ที่ 1(ต่อ)

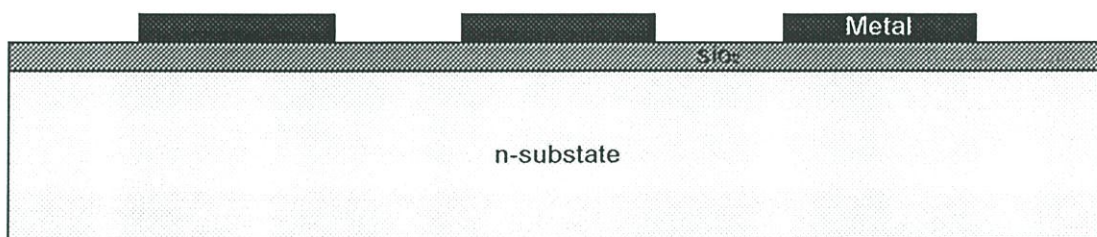
เริ่มจากการเตรียมแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ที่ทำความสะอาดแล้วนำมาสร้างซิลิคอนไดออกไซด์ ด้วยวิธีการออกซิเดชัน ความหนา 500 nm แล้วสร้างฟิล์มอลูมิเนียมด้วยวิธีการสปัตเตอร์ตามเงื่อนไขของการ สปัตเตอร์ในหัวข้อที่ 2.1 หลังจากนั้นนำฟิล์มที่ได้มาสู่กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี โดยใช้แมสก์ 1 ดังแสดงในรูปที่ 3.17(ก,ข,ค,ง)



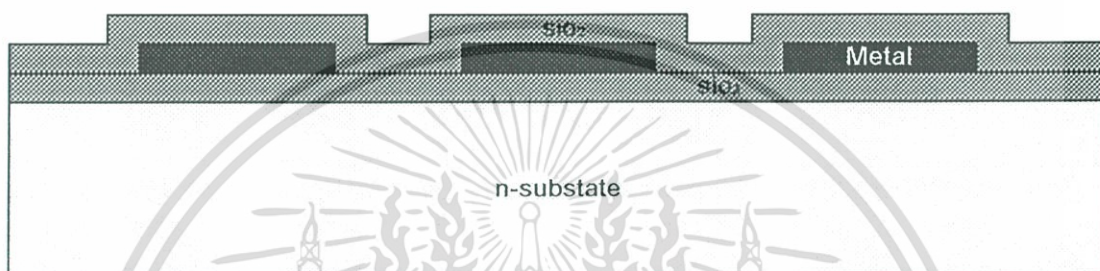
(ก) Develop สร้างลวดลายขึ้นบนน้ำยาไวแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ในกรณีที่มีการนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร  
รูปที่ 3.18 กระบวนการสร้างลวดลายโลหะแบบ 2 ชั้น ในแมสก์ที่ 2

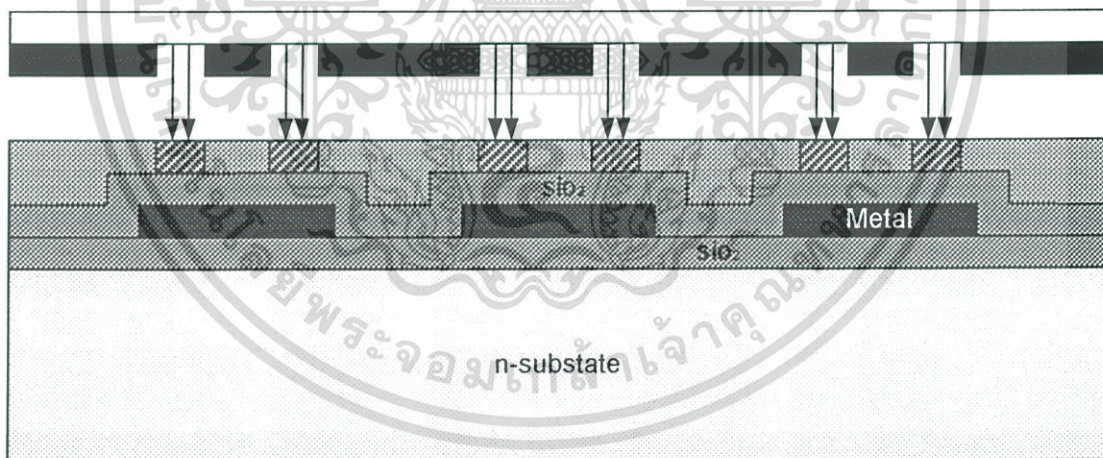
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) กัดชั้น Metal 1 สร้างลวดลายโลหะ



(ค) สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ลงบนโลหะด้วยวิธีการสปัตเตอร์



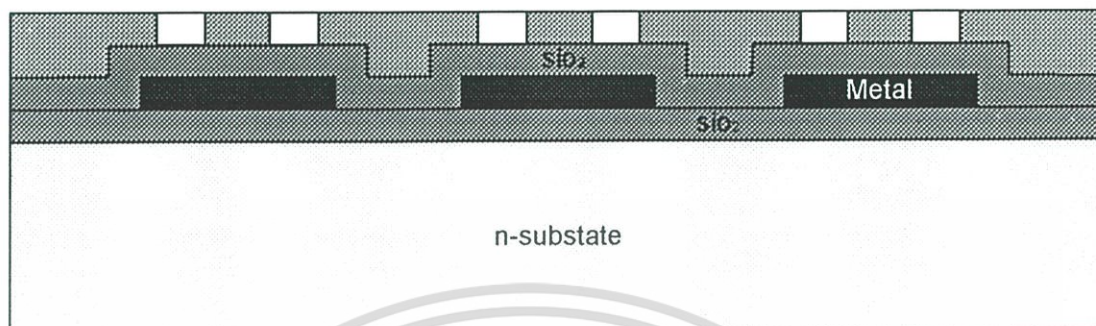
(ง) กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี ด้วย แมสก์ 2

รูปที่ 3.18 กระบวนการสร้างลวดลายโลหะแบบ 2 ชั้น ในแมสก์ที่ 2(ต่อ)

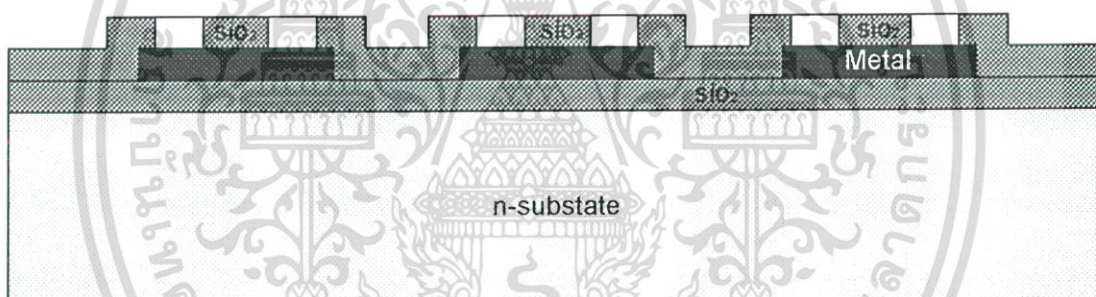
ขั้นตอนต่อมา ทำการกัดชั้นโลหะอลูมิเนียมด้วยสารละลาย  $\text{H}_3\text{PO}_4$ :  $\text{HNO}_3$ :  $\text{CH}_3\text{COOH}$ :  $\text{H}_2\text{O}$  ในอัตราส่วน 80: 5:5:10 แล้วสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ทับลงบนโลหะอลูมิเนียม โดยใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

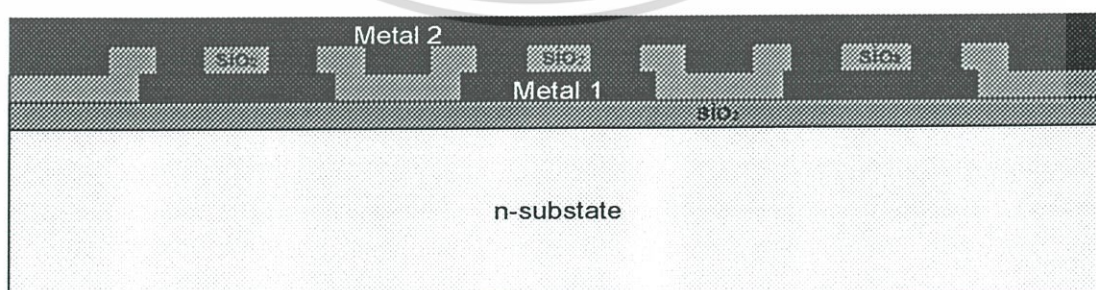
เทคนิคการสัปดาห์เตอร์ เข้าสู่กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีในแมสก์ที่ 2 เพื่อใช้ในการเปิดรู contact hole ดังแสดงในรูปที่ 3.18



(ก) Develop สร้างลวดลายขึ้นบนน้ำยาไวแสง



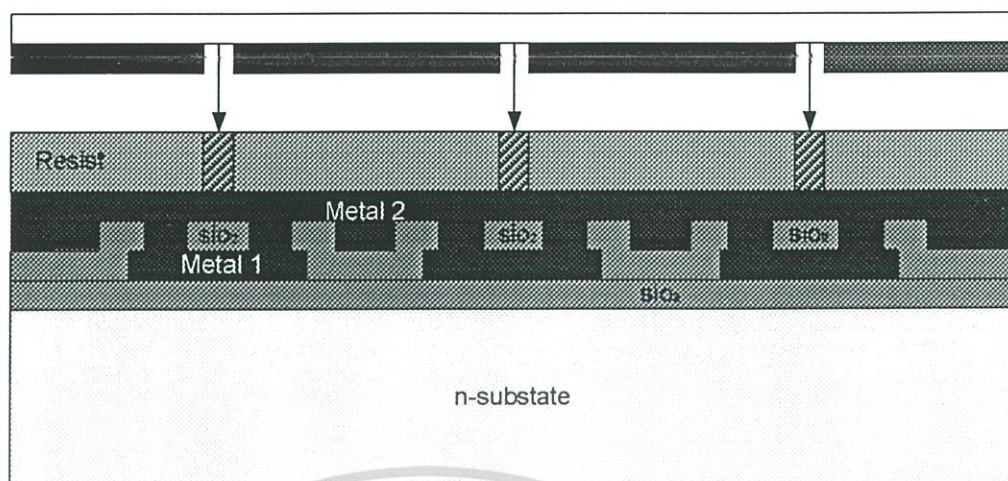
(ข) กัดชั้น ซิลิคอนไดออกไซด์ เปิดรู via hole



(ค) สร้างชั้นโลหะอลูมิเนียมชั้นที่ 2 ด้วยวิธีการสัปดาห์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 3.19 กระบวนการสร้างลวดลายโลหะแบบ 2 ชั้นในแมสก์ที่ 3

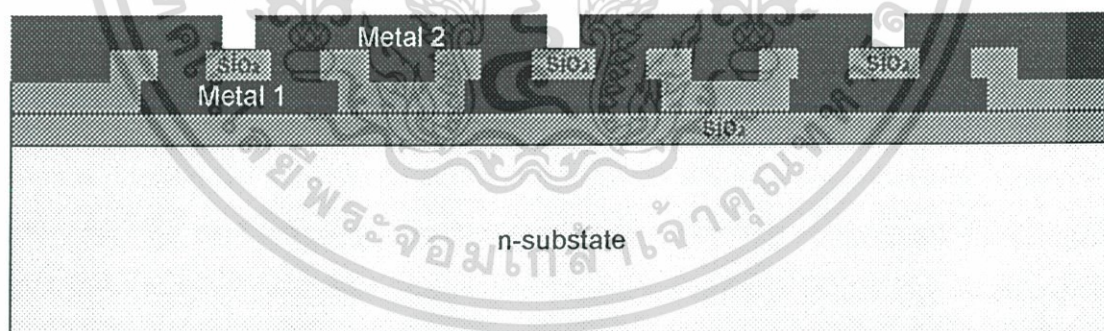
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี แมสก์ 3

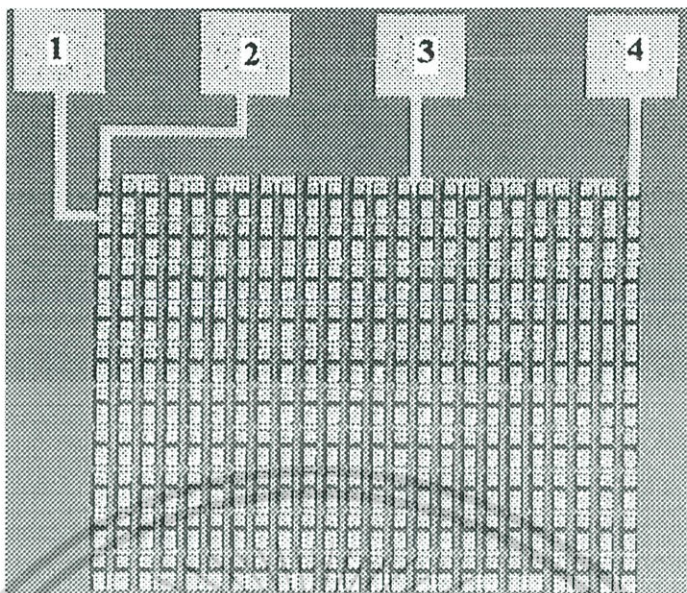
รูปที่ 3.19 กระบวนการสร้างลวดลายโลหะแบบ 2 ชั้น ในแมสก์ที่ 3(ต่อ)

ต่อจากนั้นทำการกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อทำการเปิดรู via contact แล้วสร้างฟิล์มโลหะอลูมิเนียมชั้นที่ 2 ทับลงไปโดยใช้เทคนิคการสปัตเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.19 (ข,ค) ต่อมาจึงเข้าสู่กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี เพื่อสร้างลวดลายโลหะชั้นที่ 2 และทำเป็นลวดลายโลหะแบบ 2 ชั้นที่เสร็จสมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 ภาพตัดขวางลวดลายโลหะแบบ 2 ชั้นในแบบ contact chain ที่สมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 ภาพถ่ายด้านบนของ สวดลายโลหะแบบ 2 ชั้น จากกล้องไมโครสโคป

จากรูปที่ 3.21 ที่แสดงภาพถ่ายของ contact chain จะสังเกตว่าในวิทยานิพนธ์ได้ทำการออกแบบ contact chain ไว้ทั้งหมด 240 chain กับ 480 contact และ pad ที่ต่อออกมากับอุปกรณ์ภายนอกมีอยู่ 4 pad โดยในแต่ละ pad เป็นดังนี้ ระหว่าง pad 1 กับ pad 2 มี 1 chain กับ 2 contact ระหว่าง pad 2 กับ pad 3 มี 140 chain กับ 280 contact และระหว่าง pad 2 กับ pad 4 มี 240 chain กับ 480 contact ทั้งนี้ที่ต้องสร้างสวดลายโลหะแบบ 2 ชั้นในแบบของ contact chain จำนวนมากก็เพราะว่าเพื่อต้องการทราบค่าเฉลี่ยที่แน่นอนของความต้านทานของ Via contact ระหว่างโลหะชั้นที่ 1 กับโลหะชั้นที่ 2 และทดสอบจุดเชื่อมต่อภายในวงจรรวมด้วย

ในบทต่อไปจะกล่าวถึง การทดลองและผลการทดลอง ซึ่งจะเป็นการทดลองต่างๆในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เพื่อเป็นการศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มโลหะทั้งทางไฟฟ้าและทางกายภาพ รวมถึงการทดลองที่เกี่ยวกับการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าของรอยต่อโลหะกับสารกึ่งตัวนำแบบ 1 ชั้นเพื่อใช้หาความต้านทานภายในรอยสัมผัสของรอยสัมผัสโหนดที่ออกแบบเป็น contact chain และผลของการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าของโลหะแบบ 2 ชั้น ซึ่งจะหาความต้านทานภายในที่ via hole ระหว่างโลหะชั้นที่ 1 กับโลหะชั้นที่ 2

## บทที่ 4

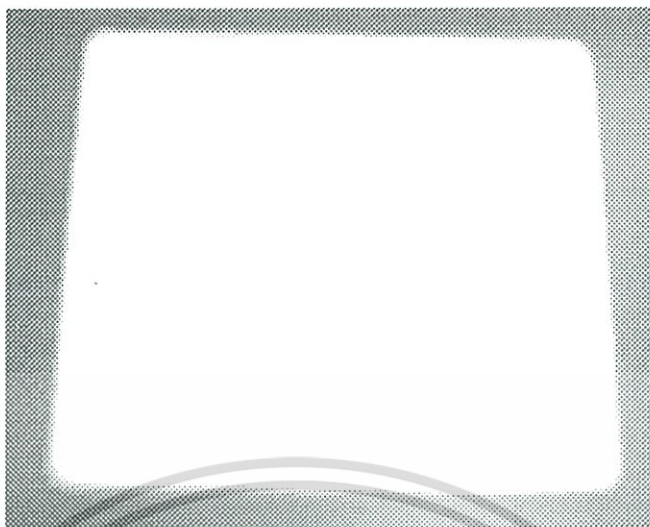
### การทดลองและผลการทดลอง

จากความสำคัญของเทคโนโลยีโลหะที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 และบทที่ 3 โดยเฉพาะในส่วนของฟิล์มโลหะที่มีความสำคัญลำดับต้นๆ ในการสร้างจุดเชื่อมต่อกายในของวงจรรวมและจุดเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก ซึ่งในส่วนของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ทำการสร้างฟิล์มโลหะโดยใช้วัสดุอลูมิเนียมที่มีซิลิคอนผสมอยู่ 2% (Al-Si (2wt%)) โดยน้ำหนัก ด้วยวิธีการสปัตเตอร์ และ ฟิล์มโลหะที่เป็น อลูมิเนียมบริสุทธิ์ ด้วยวิธีการระเหยในสุญญากาศ โดยเฉพาะในส่วนของวิธีการสปัตเตอร์ ยังสามารถควบคุมความหนาและความราบเรียบของฟิล์มโลหะได้ดีกว่าแบบ วิธีการระเหยในสุญญากาศ ซึ่งแสดงการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางไฟฟ้าของฟิล์มโลหะดังต่อไปนี้

#### 4.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางไฟฟ้าของฟิล์มโลหะ

ในการทดลองนี้เราได้ทำการสร้างฟิล์มโลหะอลูมิเนียมที่มีซิลิคอนผสมอยู่ 2%(Al-Si(2wt%)) โดยน้ำหนัก ด้วยวิธีการ "อาร์เอฟ ไดโอด สปัตเตอร์" ซึ่งได้ถูกอธิบายหลักการทำงานไว้ในบทที่ 3 จากรูปที่ 3.1.2 ขั้นตอนการสปัตเตอร์ เริ่มจากนำแผ่นโลหะอลูมิเนียมซิลิคอน (Source : Al-Si(2wt%)) มาเป็นเป้าถูกติดไว้กับขั้วคาโทด ขั้นตอนต่อมาจึงนำแผ่นซิลิคอน หนา 100) วางลงบนขั้วแอโนด แล้วดูดอากาศออกจากห้องสปัตเตอร์จนกระทั่งเหลือความดันต่ำกว่า  $5 \times 10^{-7}$  bar (การดูดอากาศในห้องสปัตเตอร์มีการดูดอากาศอยู่ 2 ช่วง ช่วงแรกจะใช้ rotary pump ดูดอากาศจนได้ความดันที่  $2 \times 10^{-3}$  bar และช่วงที่ 2 เป็นดูดอากาศโดยใช้ปั๊มสุญญากาศ ( rotary and diffusion pump ) ) เพื่อทำความสะอาดห้องสปัตเตอร์ จากนั้นปล่อยแก๊สอาร์กอนเข้าไปในห้องสปัตเตอร์จนกระทั่งถึงความดัน  $2 \times 10^{-1}$  bar โดยค่อยๆ เพิ่มกำลัง RF ขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเกิดพลาสมาขึ้นในห้องสปัตเตอร์ จากนั้น ปรับความดันให้ได้  $2 \times 10^{-3}$  bar ปรับกำลัง RF จนได้ค่าที่จะทำการสปัตเตอร์ ทำการพรี-สปัตเตอร์ (pre-sputter) โดยปล่อยให้ระบบอยู่ในเงื่อนไขที่จะทำการสปัตเตอร์เป็นเวลา 5 นาที เพื่อทำความสะอาดผิวหน้าของ Al-Si หลังจากนั้นจึงเปิดชัตเตอร์ออกเพื่อเริ่มทำการสปัตเตอร์ตามความหนาของฟิล์มโลหะที่ต้องการ เมื่อได้ความหนาตามต้องการแล้วจึงปิดชัตเตอร์ และรอให้ฟิล์มโลหะเย็นตัวด้วยระบบหล่อเย็น (water cooling) เป็นเวลาประมาณ 30 นาที แล้วจึงเปิดห้องสปัตเตอร์ [10] นำฟิล์มโลหะที่เคลือบเสร็จเรียบร้อยแล้วออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



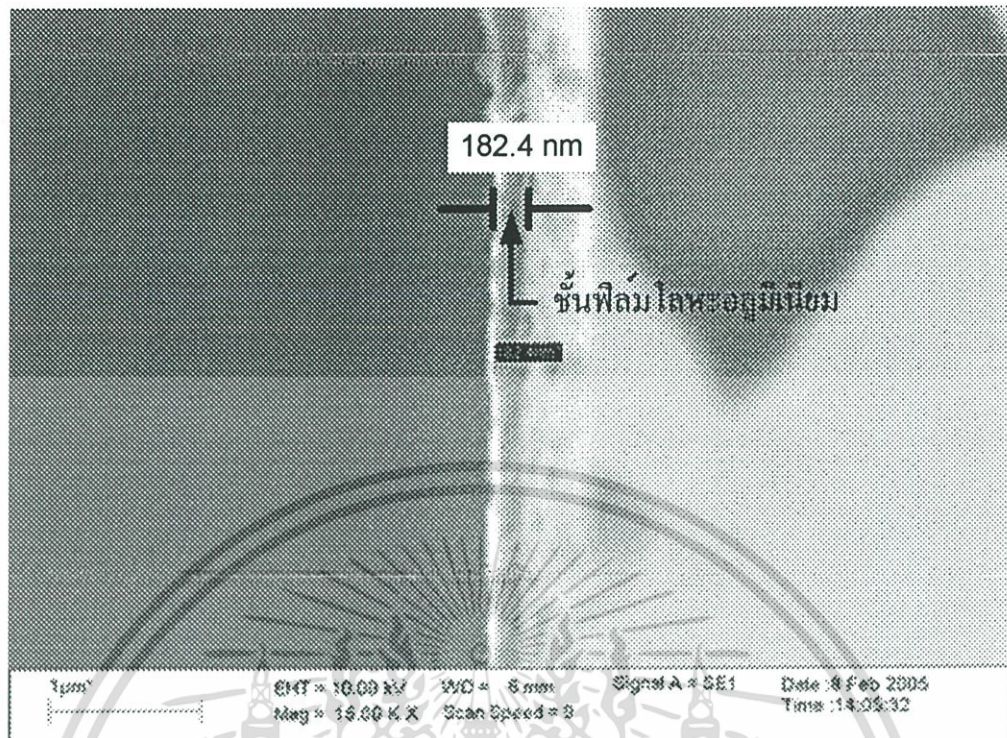
รูปที่ 4.1 फिल्मโลหะอลูมิเนียมที่ได้จากการสปีดเตอร์

จากลักษณะของฟิล์มโลหะอลูมิเนียมซิลิคอนที่ได้จากการสปีดเตอร์จะสังเกตว่ามีลักษณะของฟิล์มโลหะเป็นมันวาวเหมือนกระจก ดังแสดงในรูปที่ 4.1 หลังจากนั้นจึงนำฟิล์มโลหะที่ได้มาทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางไฟฟ้าคือ อัตราการเกิดฟิล์มโลหะด้วยวิธีการสปีดเตอร์ ความเรียบของฟิล์มโลหะ สภาพความต้านทานของฟิล์มโลหะ และ การทำให้เกิดลวดลายลงบนฟิล์มโลหะ

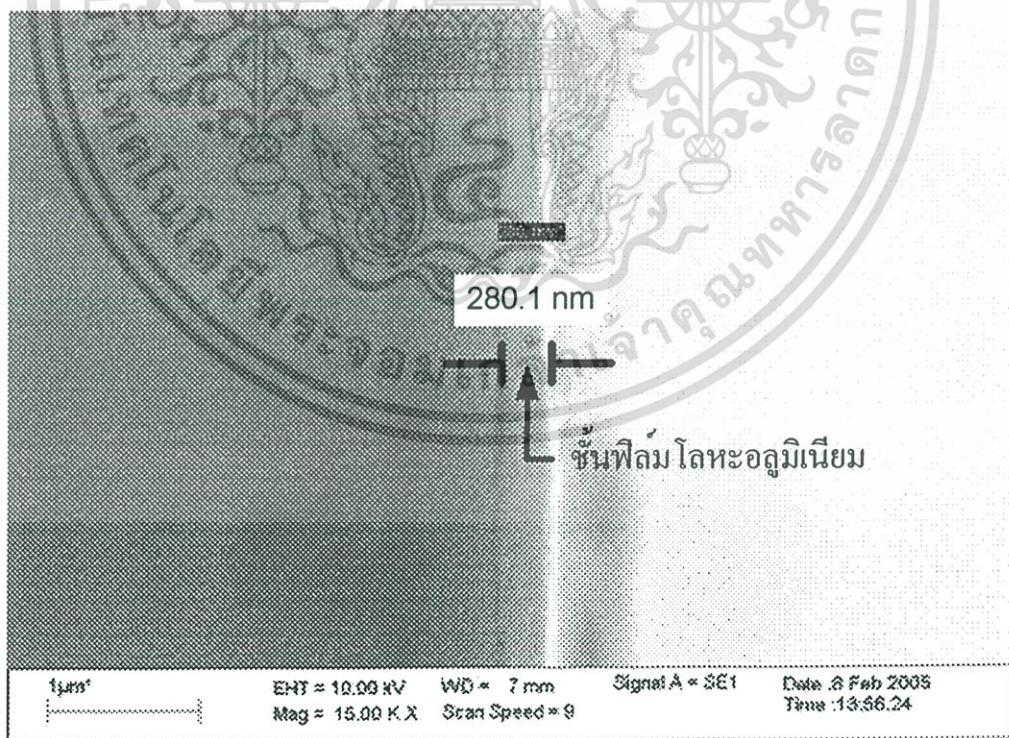
#### 4.1.1 อัตราการเกิดฟิล์มโลหะด้วยวิธีการสปีดเตอร์

ในการทดลองนี้จะทำการสร้างฟิล์มโลหะด้วยเงื่อนไขของการสปีดเตอร์โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงกำลังงานในการสปีดเตอร์ที่กำลังงานค่าต่างๆกันตั้งแต่ 100, 150 และ 200 วัตต์ โดยให้ความดันภายในห้องสปีดเตอร์อยู่ที่  $2 \times 10^{-3}$  bar และใช้เวลาในการสปีดเตอร์เป็นเวลา 30 นาทีเท่ากันทั้ง 3 ตัวอย่าง [10] ซึ่งจะได้อัตราการเกิดฟิล์มโลหะดังแสดงในรูปที่ 4.2, 4.3 และ 4.4 เป็นรูปฟิล์มโลหะอลูมิเนียมซิลิคอนของภาพตัดขวางระหว่างฟิล์มโลหะกับฐานรองซิลิคอนที่มีซิลิคอนไดออกไซด์เคลือบอยู่ ถ่ายด้วยเครื่อง SEM หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่ากล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (scanning electron microscope) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์พื้นผิวและศึกษาโครงสร้างของวัสดุ มีจุดเด่นอยู่ 2 ประการ คือ สามารถให้รูปที่มีความชัดลึกสูง (high depth of field) และสามารถให้กำลังแยกแยะเชิงระยะสูง (high -special resolution) สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดเพื่อตรวจสอบภาคตัดขวางของลวดลาย เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด แสดงดังรูปที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

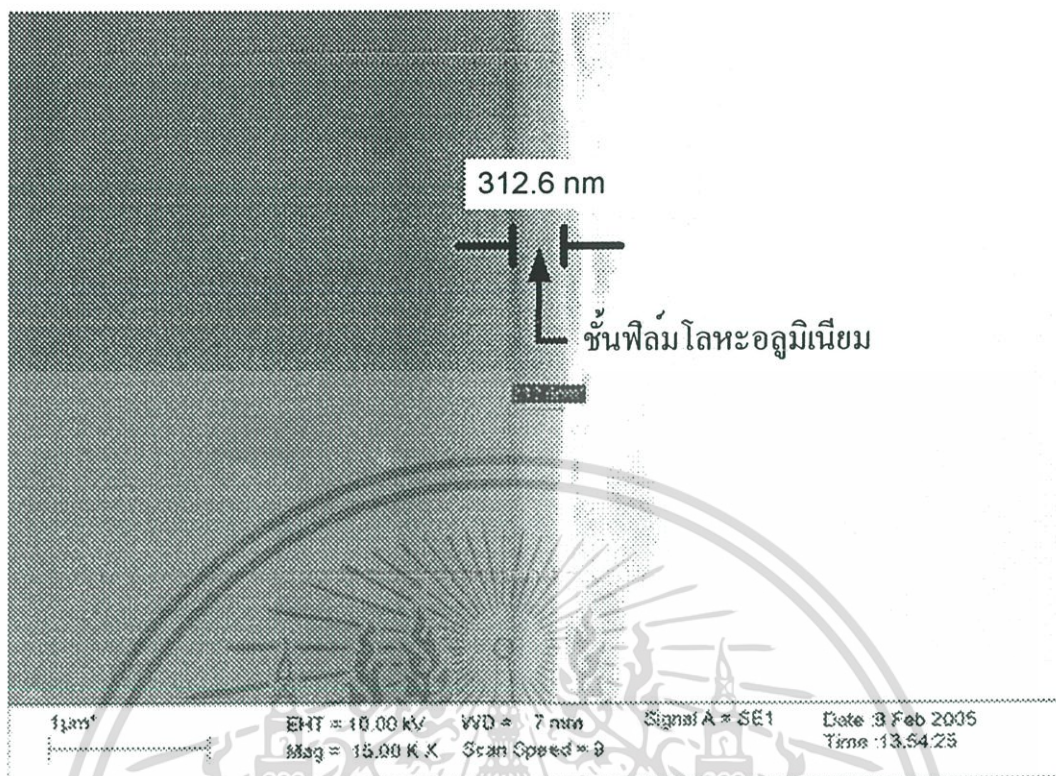


รูปที่ 4.2 ภาพตัดขวางชั้นฟิล์มโลหะตามเงื่อนไขของสเปคเตอร์ที่ กำลังงานไฟฟ้า 100 W เวลา 30 นาที

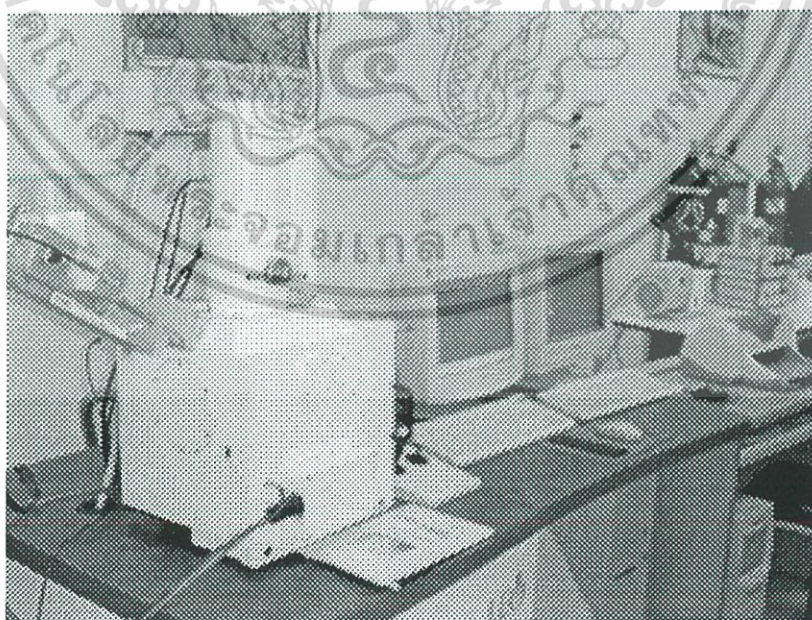


รูปที่ 4.3 ภาพตัดขวางชั้นฟิล์มโลหะตามเงื่อนไขของสเปคเตอร์ที่ กำลังงานไฟฟ้า 150 W เวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



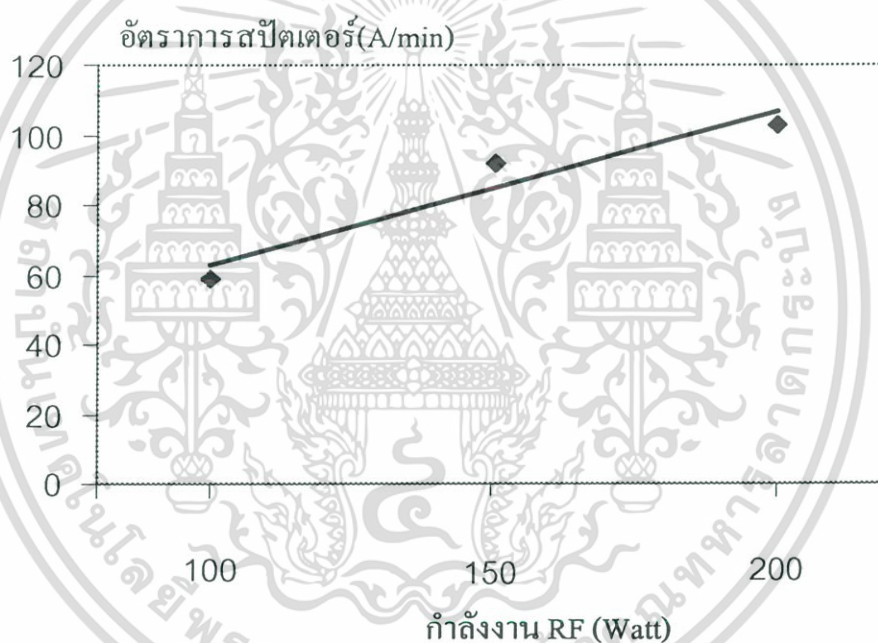
รูปที่ 4.4 ภาพตัดขวางชั้นฟิล์มโลหะตามเงื่อนไขสเปคเตอร์ที่ กำลังงานไฟฟ้า 200 W เวลา 30 นาที



รูปที่ 4.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่แสดงด้านบนจะสังเกตว่าเมื่อให้กำลังงานเข้าไปที่ห้องสปีดเตอร์ค่าต่างๆกัน 3 ค่า อัตราการเกิดฟิล์มโลหะที่เกิดขึ้นจะไม่เท่ากัน สังเกตจากรูปที่ 4.2 กับรูปที่ 4.4 อัตราการเกิดฟิล์มโลหะจะมีค่าต่างกันเกือบเท่าหนึ่งโดยความหนาของฟิล์มโลหะในรูปที่ 4.2 อ่านได้จากเครื่อง SEM มีค่าเท่ากับ  $0.18 \mu\text{m}$  และในรูปที่ 4.4 มีความหนาของชั้นฟิล์มโลหะมีค่าเท่ากับ  $0.31 \mu\text{m}$  จากอัตราการเกิดฟิล์มดังกล่าวกับค่ากำลังที่เปลี่ยนแปลงภายในห้องสปีดเตอร์พอจะสรุปได้ว่าเมื่อให้กำลังงาน RF เพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการเกิดของฟิล์มโลหะอลูมิเนียมซิลิคอนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เมื่อนำอัตราการเกิดฟิล์มโลหะที่ได้กับการเพิ่มของกำลังงานไฟฟ้าในห้องสปีดเตอร์ (ที่อัตราการเกิดฟิล์มโลหะใน 1 นาที) มาสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงาน RF และอัตราการเกิดฟิล์มโลหะ จะได้ในรูปที่ 4.6



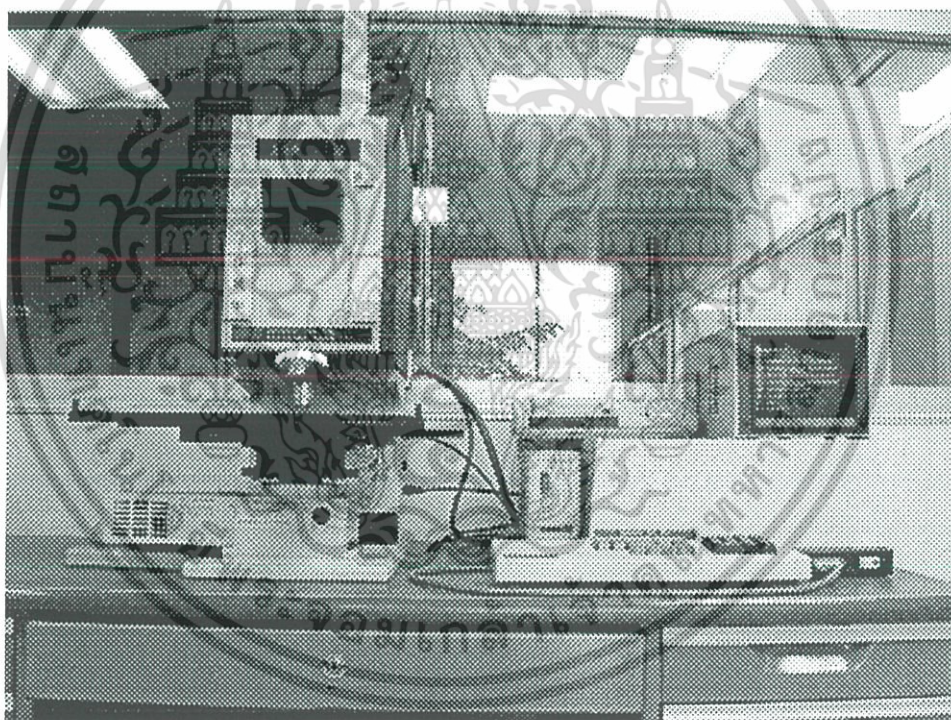
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงาน RF และอัตราการสปีดเตอร์

จากรูปที่ 4.6 จะสังเกตได้ว่าอัตราการเกิดฟิล์มโลหะด้วยวิธีการสปีดเตอร์กับการเพิ่มกำลังงาน RF ที่ใช้ในการสปีดเตอร์จะมีลักษณะที่เข้าใกล้ กราฟเชิงเส้นมาก โดยกำลังงาน RF ที่ 100 W จะได้อัตราการเกิดฟิล์มโลหะ 60 Å ต่อ นาที เมื่อกำลังงาน RF เป็น 150W จะได้อัตราการเกิดฟิล์มโลหะ 90 Å ต่อ นาที และที่ กำลังงาน RF เป็น 200W จะได้อัตราการเกิดฟิล์มโลหะ 100 Å ต่อ นาที จากลักษณะของกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงาน RF และอัตราการเกิดฟิล์มโลหะที่เป็นเชิงเส้นพอที่จะบอกได้ว่าการสร้างฟิล์มโลหะด้วยวิธีการสปีดเตอร์สามารถควบคุมความหนาของฟิล์มโลหะได้ง่าย ถ้าใช้เงื่อนไขของการสปีดเตอร์ที่กล่าวมาแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 ความเรียบของฟิล์มโลหะ Al-Si

ในการทดลองนี้เป็นการสร้างฟิล์มโลหะด้วยวิธีการสปัตเตอร์ โดยจะกำหนดให้ใช้แผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ ที่ทำความสะอาดและทำการเคลือบชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เรียบร้อยแล้วมา 4 ตัวอย่าง โดยในแต่ละแผ่นตัวอย่างจะกำหนดให้ใช้ความดันที่จุดทำงานภายในห้องสปัตเตอร์แตกต่างกันออกไปทั้งหมด 4 ค่าคือเริ่มตั้งแต่  $2-5 \times 10^{-3}$  bar และใช้กำลัง RF คงที่ 100 W ทำการวัดความเรียบของฟิล์มโลหะ Al-Si โดยใช้เครื่อง TFM-120 ดังแสดงในรูปที่ 4.7 เป็นเครื่องที่ใช้วัดความเรียบของฟิล์ม มีหลักการทำงานคือเครื่องจะส่งคลื่นแสงความยาวคลื่น 400 - 800 นาโนเมตร ไปที่แผ่นฟิล์มแล้วสะท้อนกลับมาที่หัววัด สำหรับการวัดความเรียบของฟิล์มนั้นจะต้องมีตัวอย่างมาตรฐานฟิล์มอลูมิเนียมก่อนเพื่อวัดเป็นตัวอ้างอิงแล้วนำฟิล์มที่ได้จากสปัตเตอร์มาวัดเทียบกัน โดยเครื่องจะบอกความเรียบออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ (%) แสดงดังตารางที่ 1 [10]



รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายเครื่องมือวัดความเรียบของฟิล์มโลหะ TFM-120

จากตารางที่ 1 จะสังเกตว่าที่ความดันบรรยากาศตั้งแต่  $2-5 \times 10^{-3}$  bar ที่กำลังงาน RF 100 W จะได้ค่าความเรียบของฟิล์มโลหะมีค่าเท่ากับ 100% เมื่อเทียบกับตัวอย่างมาตรฐานของฟิล์มโลหะอลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขการสปีดเตอร์ฟิล์ม Al-Si และค่า Reflectance (%)

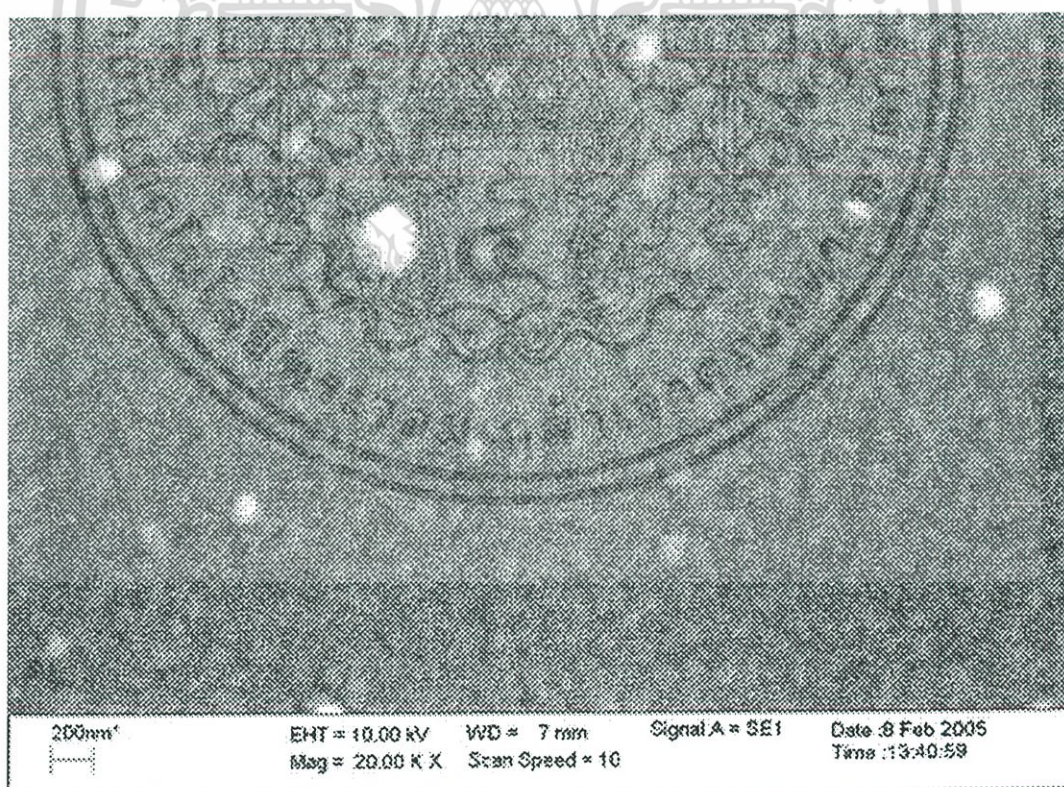
ความดันบรรยากาศ(bar)	Reflectance (%)
$2 \times 10^{-3}$	100
$3 \times 10^{-3}$	100
$4 \times 10^{-3}$	100
$5 \times 10^{-3}$	100

ปัญหาที่เกิดขึ้นในการสร้างฟิล์มโลหะด้วยวิธีการสปีดเตอร์ก็คือจะต้องควบคุมอุณหภูมิที่หัวอาโนด (เป็นหัวที่ยึดติดกับฐานรองซิลิคอนเวเฟอร์) ไม่ให้อุณหภูมิเกิน  $40^{\circ}\text{C}$  โดยใช้ระบบหล่อเย็นเข้ามาช่วยและจะต้องเพิ่มในส่วนของแผ่นวงแหวน สแตนเลส เพื่อให้แผ่นวงแหวนสแตนเลส กดทับลงไปบนแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ ทำให้แผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ ยึดติดกับพื้นผิวของแผ่นโลหะที่เป็นหัวอาโนดช่วยให้แผ่นซิลิคอนเวเฟอร์เย็นตัวได้ง่ายขึ้น ทำให้อุณหภูมิบนแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ไม่เกิน  $40^{\circ}\text{C}$  แสดงในรูปที่ 4.8 จากรูป จะสังเกตเห็นว่าวงแหวนสแตนเลสจะเป็นตัวช่วยกดทับแผ่นเวเฟอร์แต่เพียงมุมใดมุมหนึ่งของแผ่นเวเฟอร์ ซึ่งในส่วนที่ถูกกดทับด้วยวงแหวนสแตนเลสจะไม่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มโลหะอลูมิเนียมซิลิคอนหรืออาจจะกล่าวได้ว่าโดยทั่วไปจะเป็นส่วนที่ไม่ได้ถูกใช้งาน และ รูปที่ 4.9 เป็นฟิล์มโลหะอลูมิเนียมซิลิคอนที่ถ่ายด้วยเครื่อง SEM เป็นภาพถ่ายด้านบนด้วยอัตราขยาย 20000 เท่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อทำตามเงื่อนไขการสปีดเตอร์ที่อุณหภูมิบนแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ถูกควบคุมด้วยระบบ หล่อเย็นมีค่าต่ำกว่า  $40^{\circ}\text{C}$  จะทำให้ฟิล์มโลหะเป็นมันวาวเหมือนกระจก เมื่อถ่ายจากเครื่อง SEM จะสังเกตเห็นว่า เม็ดเกรนซ์ของฟิล์มโลหะมีการเรียงตัวที่เป็นระเบียบและความสม่ำเสมอของเกรนซ์บนผิวหน้าของฟิล์มโลหะก็ค่อนข้างเป็นระเบียบด้วย จากหลักการหล่อเย็นดังกล่าว โดยกำหนดให้อุณหภูมิการหล่อเย็น ต่ำกว่า  $40^{\circ}\text{C}$  นั้นมีความสำคัญมากในการสร้างฟิล์มโลหะอลูมิเนียมซิลิคอนด้วยวิธีการสปีดเตอร์ ถ้าต้องการฟิล์มที่มีคุณภาพสูงจะต้องให้อุณหภูมิภายในหัวอาโนดมีค่าไม่เกิน  $40^{\circ}\text{C}$  เพราะจะทำให้การเรียงตัวของเม็ดเกรนซ์โลหะเป็นไปได้ดีที่สุด และฟิล์มที่ได้ออกมาจะมีคุณภาพสูงตามต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

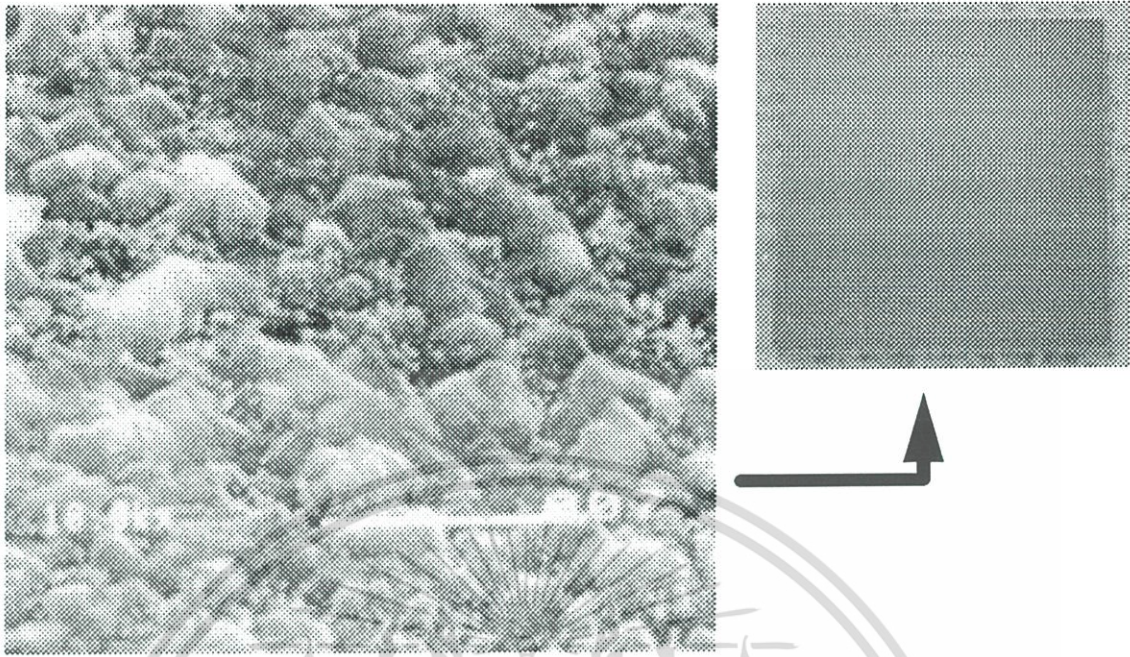


รูปที่ 4.8 รูปถ่ายภายในห้องสปีดเตอร์ ที่แก้ปัญหาอุณหภูมิของแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์เย็นตัว



รูปที่ 4.9 ฟิล์มโลหะอลูมิเนียมที่ทำการถ่ายจากเครื่องด้วย SEM อัตราขยาย 20000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



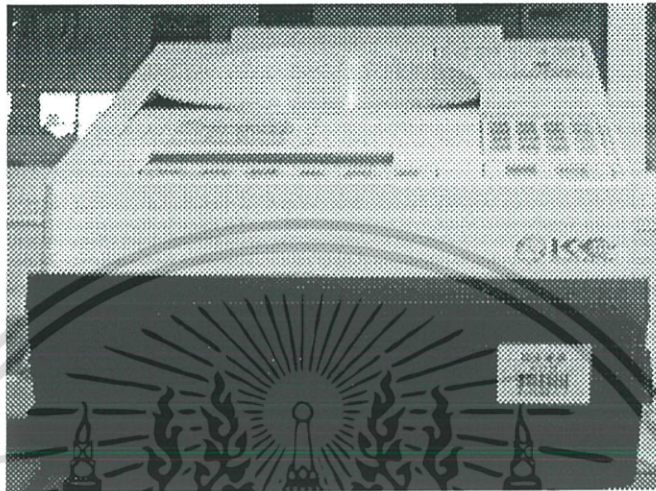
รูปที่ 4.10 फिल्मโหละอลูมิเนียม ที่สร้างที่ความดัน  $2 \times 10^{-3}$  bar ถ่ายด้วย SEM อัตราขยาย 10000 เท่า ที่ชั่วอาโนดมีอุณหภูมิสูง  $50^{\circ}\text{C}$

จากเงื่อนไขของการสปีเตอร์ เมื่อเราทำการทดลอง โดยกำหนดให้ระบบหล่อเย็นที่ชั่วอาโนดมีค่ามากกว่า  $50^{\circ}\text{C}$  ลักษณะของฟิล์มที่ได้มีสีขาวขุ่น เมื่อทำการวัดค่าความเรียบของฟิล์มโหละมีค่าประมาณ 70 % ซึ่งนับว่ามีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับฟิล์มโหละที่ทำตามเงื่อนไขของการสปีเตอร์เดิม ที่กำหนดให้อุณหภูมิชั่วอาโนดมีค่าต่ำกว่า  $40^{\circ}\text{C}$  ความเรียบของฟิล์มโหละที่วัดได้เป็น 100 % เมื่อนำฟิล์มโหละที่มีเงื่อนไขของระบบหล่อเย็นที่ชั่วอาโนดมีค่ามากกว่า  $50^{\circ}\text{C}$  มาทำการถ่ายภาพด้านบนด้วยเครื่อง SEM อัตราขยาย 10000 เท่า ในรูปที่ 4.10 จะสังเกตเห็นว่า เม็ดเกณฑ์ ของฟิล์มโหละเกิดการเรียงตัวไม่ดีเท่าที่ควรและบริเวณพื้นผิวของฟิล์มโหละขณะที่ถ่ายด้วยเครื่อง SEM จะเกิดพื้นผิวของ ฟิล์มไม่สม่ำเสมอ ซึ่งนับว่าเป็นฟิล์มโหละที่มีคุณภาพต่ำเมื่อเทียบกับฟิล์มโหละที่ทำตามเงื่อนไขของการสปีเตอร์และถูกควบคุมอุณหภูมิชั่วอาโนดมีค่าต่ำกว่า  $40^{\circ}\text{C}$

#### 4.1.3 สภาพความต้านทานของฟิล์มโหละอลูมิเนียมซิลิคอน

ทำการทดลองตรวจสอบคุณสมบัติสภาพความต้านทานของฟิล์มโหละอลูมิเนียมซิลิคอน โดยใช้เงื่อนไขในการสปีเตอร์ คือใช้กำลังงานในการ สปีเตอร์ค่าต่างกัน 3ค่า ที่ 100 W, 150 W และ 200 W โดยกำหนดค่าความดันคงที่ไว้ที่  $2 \times 10^{-3}$  bar ระยะเวลาในการสปีเตอร์เป็นเวลา เอกสาร 30 นาที ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 2 [10] โดยใช้เครื่องวัดสภาพความต้านทาน (four point) ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

probe) โดยมีหลักการทำงานวัดความนำไฟฟ้าของฟิล์มโลหะโดยการวัดกระแสที่ไหลผ่านฟิล์มโลหะและวัดค่าแรงดันตกคร่อมระหว่างปลายทั้งสองข้างแล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าความต้านทานแผ่นดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายเครื่องวัดสภาพความต้านทาน

ตารางที่ 4.2 สภาพความต้านทานของฟิล์มโลหะ Al-Si

กำลังงาน RF (Watt)	ความต้านทานแผ่น ( $\Omega/\square$ )
100	0.256
150	0.277
200	0.286

จากตารางที่ 2 สังเกตเห็นว่าเมื่อให้กำลังงาน RF ที่ 100 W ในการสร้างฟิล์มโลหะแล้วนำฟิล์มโลหะที่ได้มาทำการวัดสภาพความต้านทานจะได้สภาพความต้านทานแผ่นเท่ากับ  $0.256 \Omega/\square$  และเมื่อทำการเพิ่มกำลังงาน RF เป็น 150 W ทำให้ได้สภาพความต้านทานแผ่น  $0.277 \Omega/\square$  ถ้าเราเพิ่มกำลังงาน RF เพิ่มขึ้นอีกเป็น 200 W จะได้ความต้านทานแผ่นเป็น  $0.286 \Omega/\square$  จากผลของความต้านทานแผ่นกับกำลังงาน RF ที่เปลี่ยนแปลงไป สรุปได้ว่า เมื่อกำลังงาน RF เพิ่มมากขึ้น จะทำให้ความต้านทานแผ่นเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้ก็เพราะว่า เมื่อกำลังงาน RF เพิ่มขึ้นจะทำให้ความร้อนบริเวณแผ่นเวเฟอร์เพิ่มขึ้นด้วยซึ่งเป็นผลให้เกิดการเรียงตัวของอะตอมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

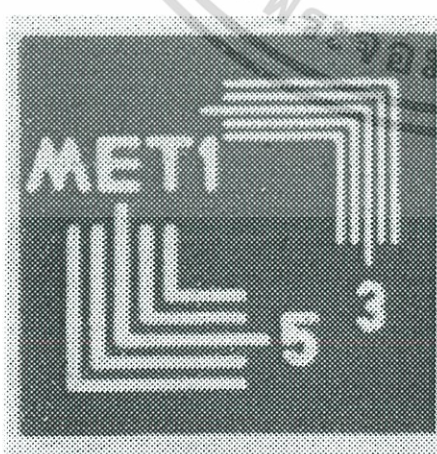
ภายในโลหะไม่ดีเท่าที่ควรเป็นผลทำให้สภาพความต้านทานแผ่นของโลหะเพิ่มขึ้น ซึ่งในการทดลองนี้กำลังงานที่ดีที่สุดที่ทำให้สภาพความต้านทานแผ่นน้อยก็คือที่ 100 W

#### 4.1.4 การทำให้เกิดลวดลายฟิล์มโลหะ Al-Si

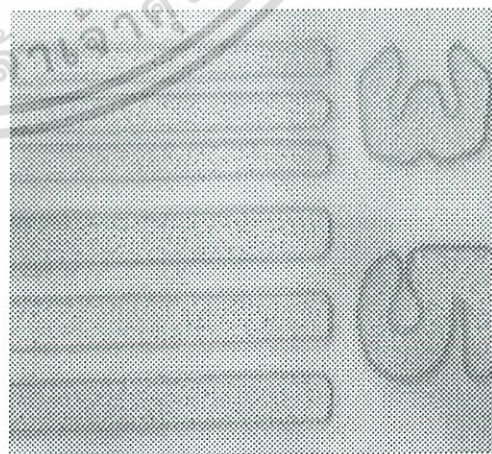
เมื่อได้ฟิล์มโลหะอลูมิเนียมซิลิคอนมาแล้ว ในการทดลองนี้เราได้นำฟิล์มโลหะที่ได้มาสร้างลวดลายโลหะลงบนฟิล์มโลหะ โดยในการสร้างฟิล์มโลหะจะเป็นการสร้างลวดลายลง บนโลหะก่อนในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี เมื่อเกิดลวดลายบนโลหะเรียบร้อยแล้วจึงนำมากัดด้วยสารละลายซึ่งเรียกวิธีการกัดแบบนี้ว่าการกัดแบบเปียก ( wet etching )

เริ่มจากกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี เตรียมแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ซึ่งเคลือบแผ่นฟิล์มโลหะเรียบร้อยแล้วมาเคลือบสารไวแสงชนิดบวก MPF เบอร์ S1818 ได้ความหนามากกว่า  $1.5\mu\text{m}$  ขึ้นตอนต่อมานำ กระจกแม่สีกต้นแบบกับแผ่นเวเฟอร์ที่เคลือบน้ำยาไวแสงแล้วมาฉายแสงด้วยเครื่องปรับข้อแม่สีกและทำการขึ้นลวดลายบนโลหะด้วยการจุ่มแผ่นเวเฟอร์ลงใน น้ำยาขึ้นลวดลาย 300 MIF ได้เป็นลวดลายบนฟิล์มโลหะหลังจากนั้นนำมาอบเพื่อให้น้ำยาไวแสงยึดติดกับแผ่นเวเฟอร์ไม่ให้หลุดล่อนได้ง่ายด้วยอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสก่อนที่จะทำการกัดลวดลายโลหะ

จากการศึกษากระบวนการกัดฟิล์มโลหะอลูมิเนียมซิลิคอน และลวดลาย โลหะอลูมิเนียมซิลิคอนเมื่อขึ้นลวดลายบนฟิล์มฟิล์มโลหะเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อมาคือการเตรียมสารละลายที่ใช้คือ  $\text{H}_3\text{PO}_4 : \text{HNO}_3 : \text{CH}_3\text{COOH} : \text{H}_2\text{O}$  มีอัตราส่วนโดยปริมาตร 80 : 5 : 5 : 10 แล้วนำสารละลายที่ได้มาให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิในการกัดประมาณ 40 องศาเซลเซียส แล้วนำแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ที่ขึ้นลวดลายแล้วมาจุ่มลงในสารละลายโดยมี อัตราการกัดโดยประมาณ 100 อังสตรอม/วินาที ก็จะได้ลวดลายโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 [10]



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.12 ลวดลายฟิล์มโลหะ Al-Si หลังการกัดสองด้วยกล้องจุลทรรศน์ อัตราขยาย 400 เท่า

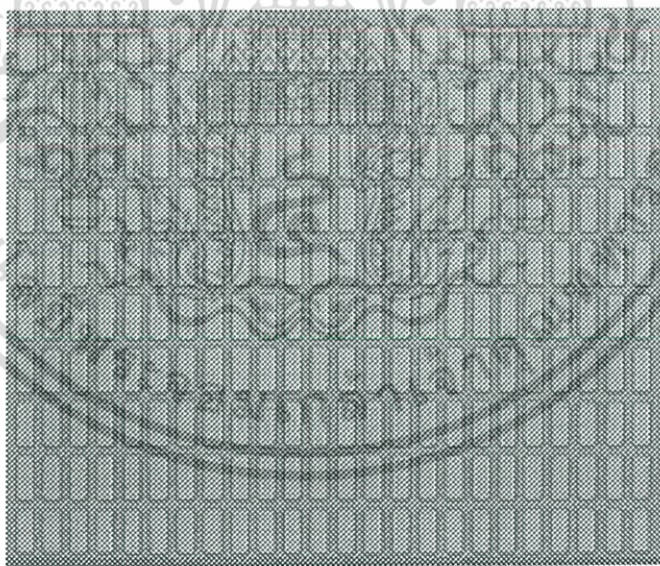
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณภาพของการกัดฟิล์มโลหะอลูมิเนียมซิลิคอน ด้วยเงื่อนไขกำหนดกับสารละลายที่ใช้ได้ ความคมชัดของลวดลายที่กัดได้ ดังในรูปที่ 12 จากรูปแสดงคุณภาพลวดลายของฟิล์มโลหะ มีความคมชัดต่อเนื่องเป็นอย่างดี ลวดลายเส้นเล็กสุดที่สามารถทำได้คือ 3 ไมครอน

#### 4.2 การเชื่อมต่อทางไฟฟ้าของรอยต่อระหว่างโลหะกับซิลิคอนแบบ 1 ชั้น

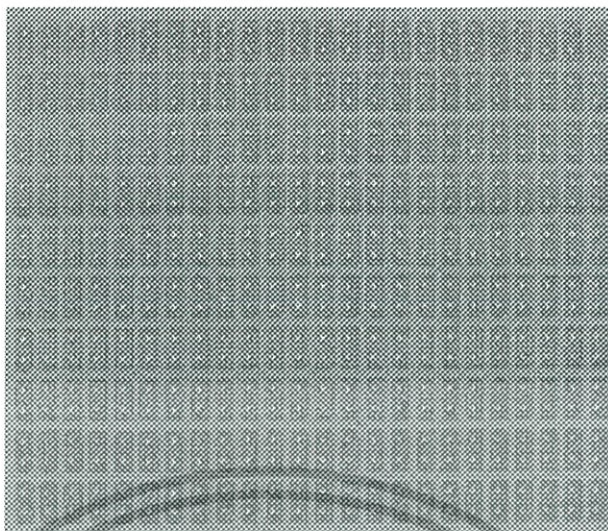
จากความเข้าใจเกี่ยวกับความต้านทานภายในโลหะแบบ 2 รอยต่อ เมื่อเราได้ทำการจำลองความต้านทานแบบ 2 รอยต่อมาทำการออกแบบเป็น contact chain โดยมี contact ทั้งหมด 480 contact กับ 240 chain ต่ออนุกรมกันทั้งหมดได้ถูกอธิบายไว้ในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.3

หลังจากนั้นได้นำ contact chain ที่ออกแบบไว้มาทำการสร้างจริงดังแสดงในรูปที่ 4.13 เริ่มจากการนำแผ่น ซิลิคอนเวเฟอร์ ที่ทำความสะอาดเรียบร้อยแล้วมาทำการสร้างซิลิคอนไดออกไซด์ ด้วยกระบวนการ thermal oxidation ตามเงื่อนไขของการออกซิเดชัน เพื่อให้ได้ความหนาของซิลิคอนไดออกไซด์ 500 nm ผ่านกระบวนการ โฟโตลิโทกราฟี [10],[19-21] เพื่อขึ้นลวดลายในแมสก์ที่ 1 (แมสก์ ได้ป) หลังจากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการกัด (etching) เพื่อลอกชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ขึ้นลวดลายเรียบร้อยแล้ว เพื่อเปิดช่องที่จะทำการได้ป



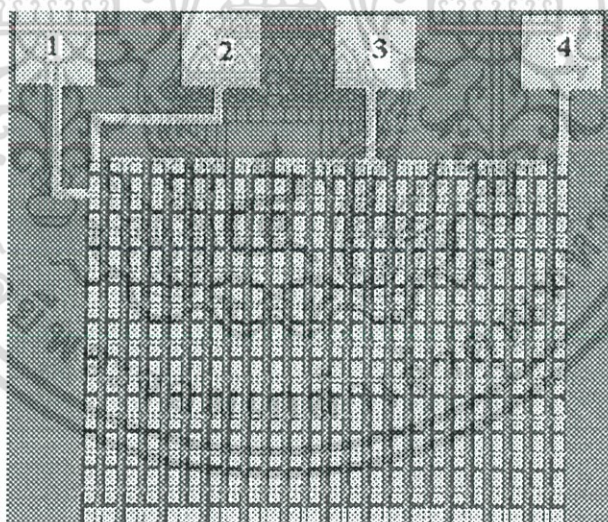
รูปที่ 4.13 การเปิด ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เพื่อทำการแพร่สารเจือ

หลังจากทำการเปิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ขั้นตอนต่อมาทำการแพร่สารเจือเข้าไปในแผ่นเวเฟอร์ ที่ทำการเปิดช่องไว้เพื่อทำให้บริเวณภายในช่องที่แพร่สารเจือเกิดขึ้นของสารกึ่งตัวนำที่มีความเข้มข้นสูง หลังจากนั้นทำการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บางๆเคลือบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่อนุญาตให้สามารถใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ทับลงบนแผ่น ซิลิคอนเวเฟอร์ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 เปิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อทำเป็นช่อง contact

ขั้นตอนต่อมา เปิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อสร้างเป็น ช่อง contact แล้วทำการสร้างฟิล์มโลหะอลูมิเนียมเคลือบลงไปบนแผ่นเวเฟอร์ ด้วยวิธีการสปัตเตอร์ แล้วจึงสร้างลวดลายโลหะในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี ได้เป็นลวดลายของ contact chain ดังแสดงในรูปที่ 4.15



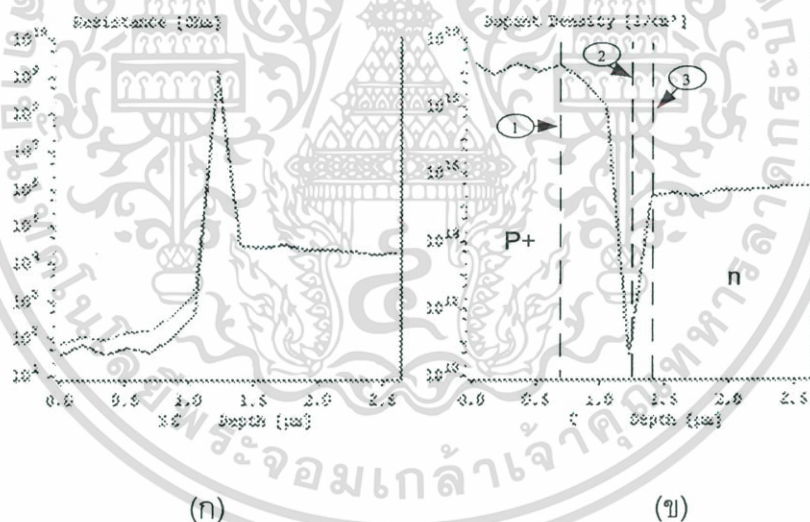
รูปที่ 4.15 Contact chain ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์ ถ่ายจากกล้องไมโครสโคป

จากรูปที่ 4.15 ที่แสดงภาพถ่ายของ contact chain จะสังเกตว่าในวิทยานิพนธ์ได้ทำการออกแบบ contact chain ไว้ทั้งหมด 240 chain กับ 480 contact และ pad ที่ต่อออกมากับอุปกรณ์ภายนอกมีอยู่ 4 pad โดยในแต่ละ pad เป็นดังนี้ ระหว่าง pad 1 กับ pad 2 มี 1chain กับ 2 contact ระหว่าง pad 2 กับ pad 3 มี 140 chain กับ 280 contact และระหว่าง pad 2 กับ pad 4 มี 240 chain กับ 480 contact ทั้งนี้ที่ต้องสร้าง contact chain จำนวนมากก็เพราะว่าเพื่อถ้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องการทราบค่าเฉลี่ยที่แน่นอนของความต้านทานภายในรอยสัมผัส และทดสอบจุดเชื่อมต่อกันภายในวงจรรวมด้วย

4.2.1 ค่าความลึกระหว่างรอยต่อกับสารกึ่งตัวนำ p<sup>+</sup> กับฐานรองชนิด n

ในกระบวนการสร้าง contact chain ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น เมื่อทำการเปิดแมสก์แรกเสร็จแล้วจึงต้องทำการแพร่สารเจือความเข้มข้นสูงเข้าไปทั้งแผ่นซึ่งในขั้นตอนนี้ จะมีแผ่นในการทดลอง 2 แผ่น ที่ใช้ในการแพร่สารเจือ ซึ่งแผ่นแรกจะเป็นแผ่นตัวอย่าง และแผ่นที่สองจะเป็นแผ่นจริงที่เปิดลดลายแมสก์แรกเรียบร้อยแล้ว ในที่นี้ได้ทำการแพร่สารเจือ โบรอน(Boron) ไปบนฐานรองชนิด n เพื่อทำให้เกิดเป็นสารกึ่งตัวนำ p<sup>+</sup> ขึ้นบนฐานรองชนิด n นำแผ่นตัวอย่างที่ทำการแพร่สารเจือเรียบร้อยแล้วตามเงื่อนไขเดียวกันกับแผ่นจริงมาทำการวัดค่าความลึกด้วยการวัดพิกต์ ความต้านทานทำให้ทราบค่าความลึกของรอยต่อและอัตราความหนาแน่นของสารเจือ ดังแสดงในรูปที่ 4.16 โดยใช้เครื่องมือการวัดการกระจายความต้านทาน(Spreading Resistance Measurement system) ดังแสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.16 ความลึกของรอยต่อของสารเจือ p<sup>+</sup>

(ก) ความต้านทานต่อค่าความลึก

(ข) ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือต่อค่าความลึก

จากรูปที่ 4.16 (ข) จะเห็นได้ว่าที่รอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำ p<sup>+</sup> และฐานรองชนิด n ณ.

จุดที่ 1 เป็นจุดที่เริ่มต้นที่มีการเปลี่ยนแปลงของเส้นกราฟอ่านค่าจากกราฟได้ 0.65 μm ส่วนในจุด

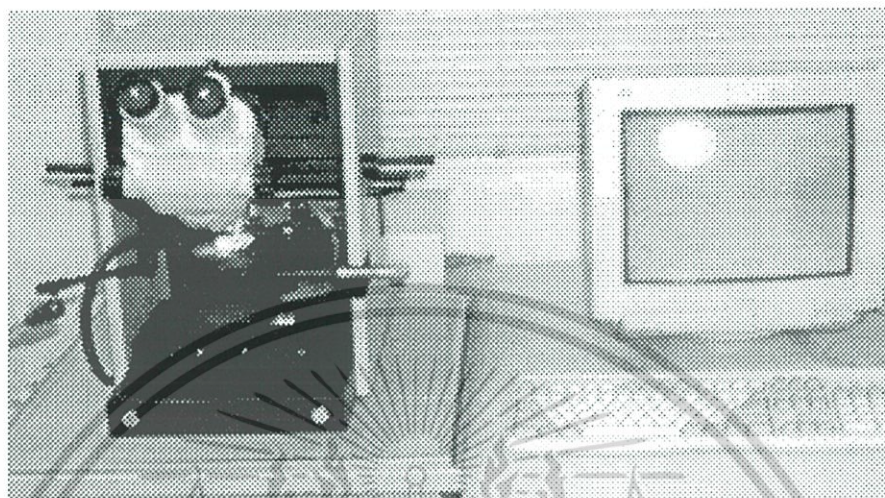
ที่ 2 เป็นส่วนที่กราฟตกมาถึงจุดต่ำสุดคือ 1.25 μm และจุดที่ 3 ทำการอ่านค่าจากกราฟได้

1.45 μm เมื่อนำค่าที่อ่านได้จากจุดที่ 1 มาลบออกจากจุดที่ 3 จะทำให้ได้ค่าความลึกของสารกึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอน เมื่อผู้รู้เห็นประโยชน์ของการนำเอกสารนี้ไปใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวนำ  $p^+$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $0.8 \mu\text{m}$  และค่าความหนาแน่นของการได้ปสารเจือ  $p^+$  ที่อ่านได้จากกราฟบนพื้นผิวมีค่า  $10^{19}$  อะตอม



รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายเครื่องมือการวัดการกระจายความต้านทาน

#### 4.2.2 ผลของการซินเตอร์กับรอยสัมผัสโอห์มมิก

จากผลของรอยสัมผัสโอห์มมิกที่ดีจะต้องมีความต้านทานต่ำแต่เนื่องจากผิวของสารกึ่งตัวนำมักจะมีชั้นของออกไซด์บางๆปกคลุมอยู่ระหว่างชั้นของโลหะและชั้นสารกึ่งตัวนำจึงถูกแยกจากชั้นฉนวนออกไซด์ในกรณีเช่นนี้จะทำให้อรอยสัมผัสที่ค่าความต้านทานสูงนั้นไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งานเพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว หลังจากสร้างชั้นโลหะบนผิวซิลิคอนที่มีความเข้มสูงบริเวณที่เป็นรอยสัมผัสแล้วรอยสัมผัสที่จะถูกนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงค่าหนึ่งเพื่อให้อะตอมของโลหะสามารถแพร่ผ่านออกไซด์บางและเข้าไปในชั้นสารกึ่งตัวนำได้ จะทำให้อรอยสัมผัสโอห์มมิกที่ดีมีค่าความต้านทานต่ำ วิธีการเช่นนี้ถูกเรียกว่า "การแอนนیل" (annealing) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การซินเตอร์ (sintering) [18,12]

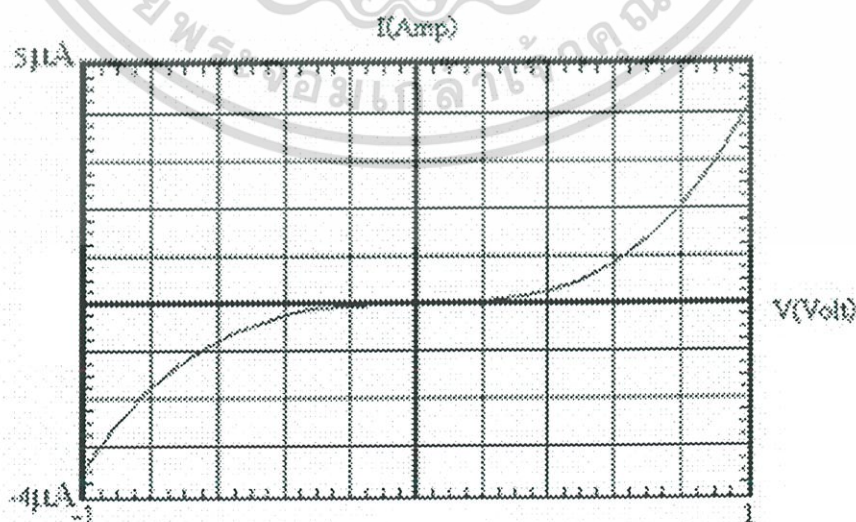
แต่เนื่องจากในปัจจุบันความลึกของชั้นพีเอ็นมีความลึกน้อยกว่า 1 ไมครอนเมื่อมีการแอนนیلเข้าไปอะตอมของอลูมิเนียมที่แพร่ลึกเข้าไปในส่วน  $p^+$  และ  $n^+$  มักไม่สม่ำเสมอทำให้เกิดมีส่วนลึกตื้นไม่เท่ากัน เกิดเป็นปลายแหลมเล็กหรือเรียกว่า "สไปค์" (spiking) ซึ่งส่วนที่เป็นสไปค์อาจลึกลงไปถึงบริเวณรอยสัมผัสพีเอ็นที่มีขนาดตื้นเหล่านี้ได้ ทำให้เกิดความเสียหายชั้นบริเวณรอยสัมผัสเพราะถูกลัดวงจร

การซินเตอร์เป็นการให้ความร้อนที่พอเหมาะ กับโลหะอลูมิเนียมเพื่อให้โลหะมีการยึดติดกับพื้นผิวสารกึ่งตัวนำได้ดีและทำให้ลดการเกิดช่องว่างระหว่างรอยสัมผัสให้น้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองจะใช้อุณหภูมิในการซินเตอร์ ที่ต่างกันทำให้ทราบว่าการซินเตอร์ นั้นมีผลต่อกราฟเชิงเส้นของกระแสและแรงดันอย่างมากโดยเฉพาะการกำหนดอุณหภูมิในการซินเตอร์ จะต้องให้อุณหภูมิที่พอเหมาะซึ่งถ้าให้อุณหภูมิที่ มากเกินไปก็อาจจะทำให้เกิดปรากฏการทะลุผ่านรอยต่อพีเอ็นที่เรียกว่าสไปค์ (spike) แต่ถ้าให้อุณหภูมิต่ำก็จะทำให้เกิดรอยต่อโอห์มมิกที่ไม่ดีดังแสดงในรูปที่ 4.18, 4.19, 4.20 และ 4.21 ซึ่งใช้อุณหภูมิในการซินเตอร์ที่ค่าต่างๆกันไปโดยกำหนดเวลาในการซินเตอร์ที่ 30 นาที

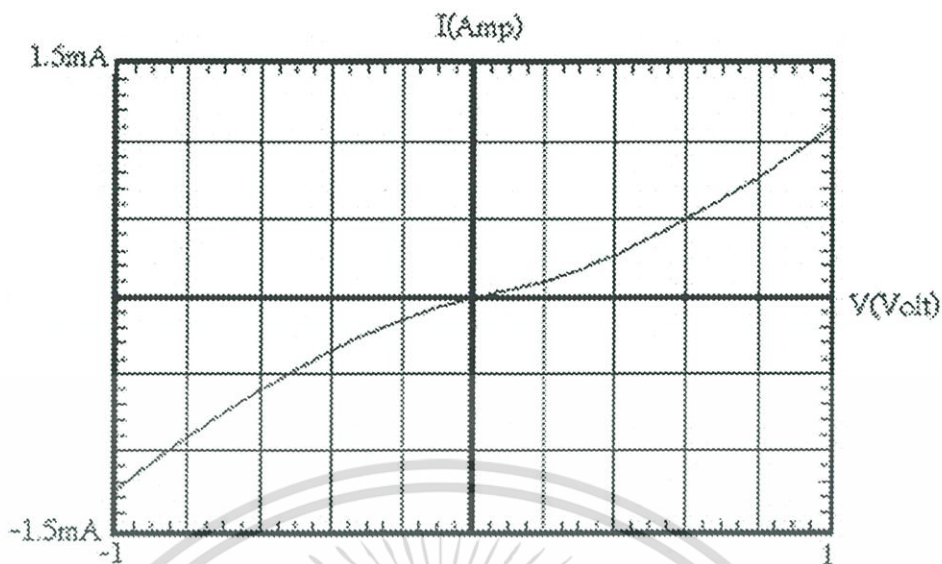
จากกราฟแสดงคุณลักษณะกระแสและแรงดันในกราฟต่างๆที่แสดงให้เห็น ในรูปที่ 4.18 เมื่อให้อุณหภูมิในการซินเตอร์ที่  $320^{\circ}\text{C}$  จะพบว่า กราฟคุณลักษณะของกระแสและแรงดัน ที่ได้ยังไม่มีความเป็นเชิงเส้น ด้วยเหตุที่ว่าอุณหภูมิของการซินเตอร์ยังมีค่าน้อยอยู่จึงทำให้ รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำยังไม่เกิดเป็นรอยสัมผัสที่สมบูรณ์ซึ่งอาจจะเกิดจาก ระหว่างรอยสัมผัสดังกล่าวยังมีชั้นของออกไซด์บางชั้นอยู่ ส่งผลให้รอยสัมผัสนี้ยังไม่เป็นโอห์มมิก กราฟที่ได้จึงมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง ( ในความเป็นจริงกราฟคุณลักษณะของกระแสและแรงดันจะต้องเป็นเชิงเส้น ) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความต้านทานระหว่าง รอยสัมผัสมีค่าสูงมาก จากการทดลองเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไปเรื่อยๆจะพบว่าความชันของกราฟที่แสดงในรูปที่ 4.19, 4.20 เริ่มที่จะมีกราฟคุณลักษณะของกระแสและแรงดันที่มีความเป็นเชิงเส้นเรื่อยๆและค่าความต้านทานระหว่างรอยสัมผัสมีค่าลดน้อยลง จนเมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิในการซินเตอร์ ที่  $400^{\circ}\text{C}$  กราฟแสดงคุณลักษณะของกระแสและแรงดันมีความเป็นเชิงเส้นตลอดทั้งกราฟ ดังแสดงในรูปที่ 4.21 ซึ่งก็ตรงกับคุณสมบัติของรอยต่อแบบโอห์มมิก และมีความต้านทานรอยสัมผัสที่ต่ำและนำกระแสได้ทั้งสองทิศทาง ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงใช้อุณหภูมิการซินเตอร์ที่  $400^{\circ}\text{C}$  [8]



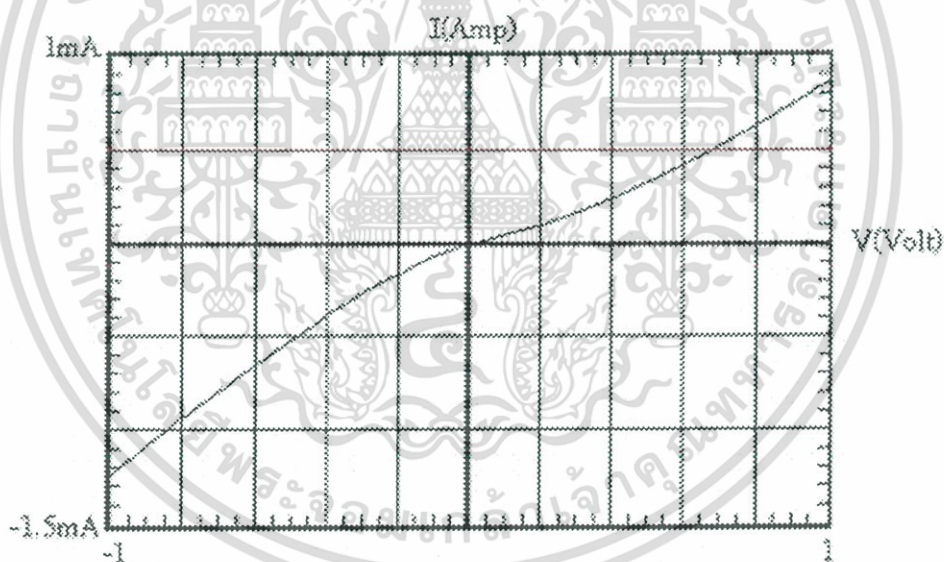
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงคุณลักษณะกระแสและแรงดัน ที่อุณหภูมิซินเตอร์  $320^{\circ}\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



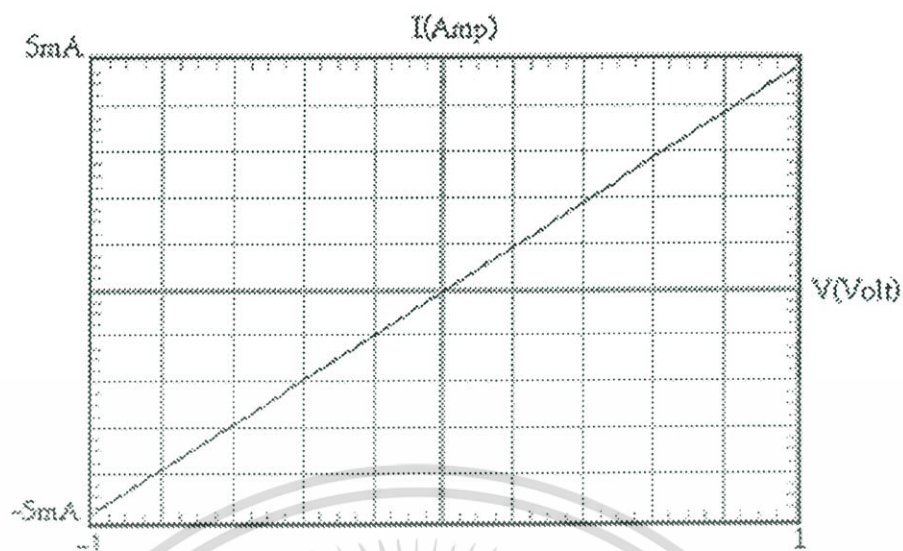
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงคุณลักษณะกระแสและแรงดัน ที่อุณหภูมิซินเตอร์ 350 °C



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงคุณลักษณะกระแสและแรงดัน ที่อุณหภูมิซินเตอร์ 380 °C

จากปรากฏการณ์ทะลุผ่านรอยต่อสไปค์ (spike) ได้ทำการทดลองสร้างฟิล์มโลหะเป็นแบบ contact chain โดยใช้โลหะ 2 ชนิด ชนิดแรกใช้โลหะอลูมิเนียมที่มีซิลิกอนผสมอยู่ 2% โดยน้ำหนัก (Al-Si(2wt%)) และชนิดที่สองเป็นอลูมิเนียมบริสุทธิ์ (Al) ทำการซินเตอร์ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 400-500 °C ใช้เวลาในการ ซินเตอร์ 30 นาทีผลที่ได้แสดงใน ตารางที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 กราฟคุณลักษณะกระแสและแรงดันของรอยต่อ Al/p<sup>+</sup> อุณหภูมิซินเตอร์ 400 °C

ตารางที่ 4.3 การซินเตอร์ที่อุณหภูมิสูงขึ้นกับโลหะอลูมิเนียมสองชนิด

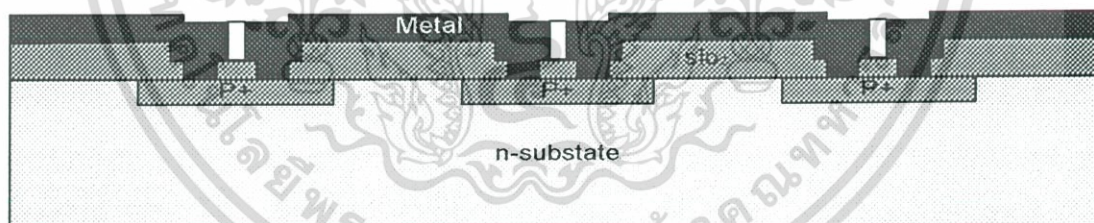
อุณหภูมิ (°C)	Al-Si(2wt%)	Al
400	ไม่เกิดสไปค์	ไม่เกิดสไปค์
500	ไม่เกิดสไปค์	ไม่เกิดสไปค์
600	ไม่เกิดสไปค์	เกิดสไปค์

จากตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่าเมื่อให้อุณหภูมิในการซินเตอร์ที่ 400 °C กับโลหะทั้งสองชนิด จะยังไม่เกิดสไปค์ซึ่งนับได้ว่าเป็นอุณหภูมิที่พอเหมาะสำหรับทำให้โลหะอลูมิเนียมยึดติดกับพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ ส่วนในอุณหภูมิซินเตอร์ที่ 500 °C จะยังไม่เกิดการทะลุผ่านรอยต่อสไปค์ของโลหะอลูมิเนียมทั้งสองชนิดและเมื่อให้อุณหภูมิซินเตอร์ที่ 600 °C พบว่าที่โลหะอลูมิเนียมบริสุทธิ์ จะเกิดปรากฏการทะลุผ่านรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำแต่ในโลหะอลูมิเนียมที่มีซิลิคอนผสม 2% จะยังไม่เกิดสไปค์ ซึ่งบอกได้ว่าซิลิคอนที่ผสมอยู่ 2% ในอลูมิเนียมเป็นตัวช่วยลดปัญหาการทะลุผ่านรอยต่อได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.3 ความต้านทานภายในรอยสัมผัสของ contact chain

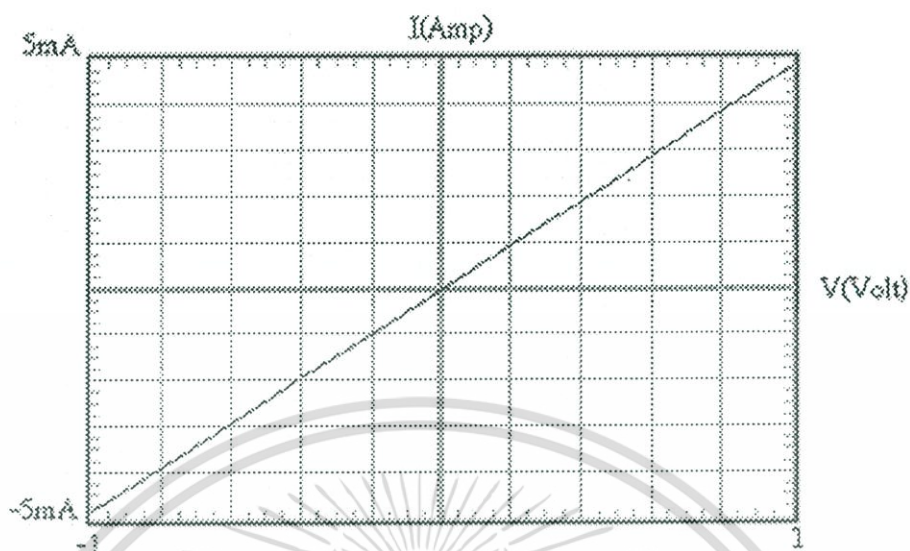
เมื่อเราทำการออกแบบ contact chain เรียบร้อยแล้ว ในหัวข้อนี้จะทำการทดลอง โดยการป้อนแหล่งจ่ายแรงดันและกระแสเข้าไปใน contact chain โดยใช้อุปกรณ์การวัดที่เรียกว่า เครื่องวัดและทดสอบอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (semiconductor / component test system) หลักการทำงานของเครื่องวัดคือ เครื่องจะทำการจ่ายกระแสผ่านหัวเข็ม จากหัวเข็มที่ 1 ผ่านเข้าไปใน อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ และไหลผ่านหัวเข็มที่ 2 เข้าไปในเครื่องมือวัดโดยที่เครื่องวัดจะทำการประมวลผลและส่งผลออกมายังโปรแกรมที่ทำหน้าที่แสดงผลออกทางหน้าจอคอมพิวเตอร์และได้ผล ที่แสดงออกมาเป็น กราฟแสดงคุณลักษณะของกระแสและแรงดัน ซึ่งในการทดลองนี้เราได้ทำการ สร้าง contact chain โดยออกแบบให้มีจำนวน contact chain ที่ 480 contact กับ 240 chain ซึ่ง จะมีจุดต่อในการวัดทั้งหมด 4 pad [18] โดยในแต่ละ pad เป็นดังนี้ ระหว่าง pad 1 กับ pad 2 มี 1chain กับ 2 contact ระหว่าง pad 2 กับ pad 3 มี 140 chain กับ 280 contact และระหว่าง pad 2 กับ pad 4 มี 240 chain กับ 480 contact ซึ่งในการวัดจะต้องทำการวัดเป็นคู่ๆไปเช่น ป้อนแหล่งจ่ายกระแสและแรงดันระหว่าง pad ที่ 1 กับ pad ที่ 2 และในรูปที่ 4.22 แสดงให้เห็นถึง โครงสร้างพื้นฐานของ contact chain ที่เป็นภาพตัดขวางของ contact chain ที่มีโครงสร้างภายใน ประกอบไปด้วย แผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ที่มีฐานรองเป็นชนิด n และในส่วนของสารเจือ โบรมอนที่ทำการโด๊ปเป็นสารกึ่งตัวนำ ชนิด p<sup>+</sup> และ ชั้นลวดลายโลหะ ทั้งหมดนี้ถูกแสดงให้เห็นในภาพที่ 4.22



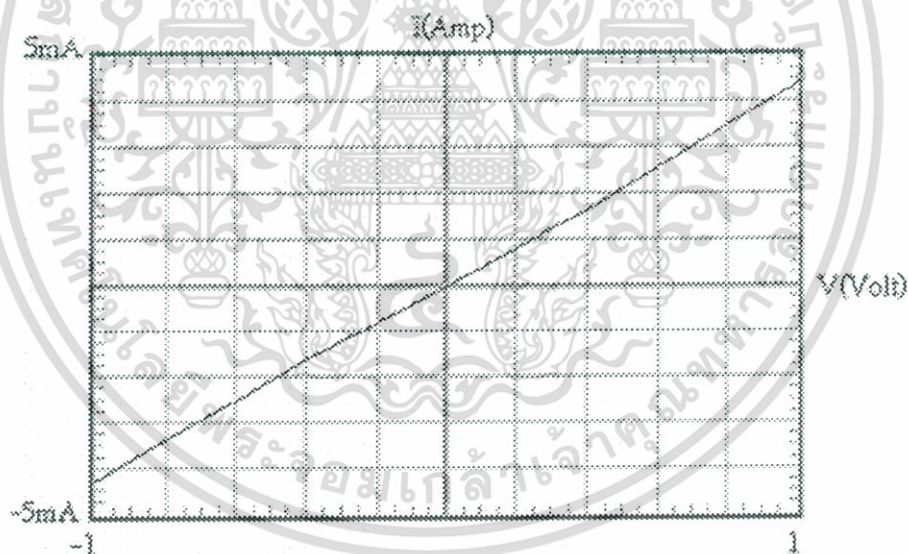
รูปที่ 4.22 ภาพตัดขวาง ของ contact chain

จากรูปที่ 4.15 เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าผ่านจุดที่ 1 และจุดที่ 2 โดยมีจำนวน 1 chain กับ 2 contact จะได้กราฟคุณลักษณะของ กระแสและแรงดันดังรูปที่ 4.23 และเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้า ผ่านจุดที่ 3 และจุดที่ 2 โดยมีจำนวน 140 chain กับ 280 contact จะได้กราฟคุณลักษณะของ กระแสและแรงดันดังรูปที่ 4.24 หลังจากนั้นทำการวัด contact chain โดยการป้อนแรงดันไฟฟ้า ผ่านจุดที่ 2 และจุดที่ 4 โดยมีจำนวน 240 chain กับ 480 contact ทำให้ได้กราฟคุณลักษณะของ กระแสและแรงดันดังแสดงในรูปที่ 4.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) จำนวน contact chain ที่ 1 chain กับ 2 contact ของ  $p^+/Al$

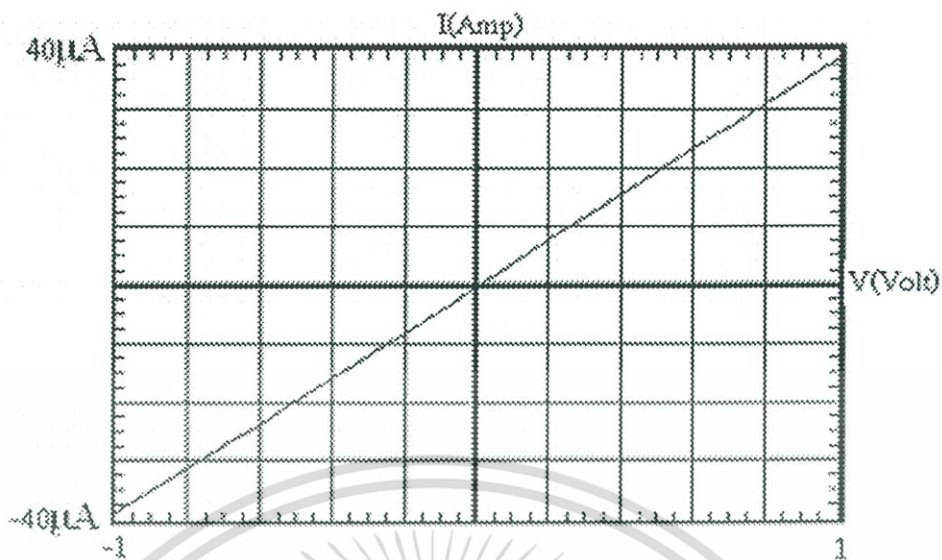


(ข) จำนวน contact chain ที่ 1 chain กับ 2 contact ของ  $n^+/Al$

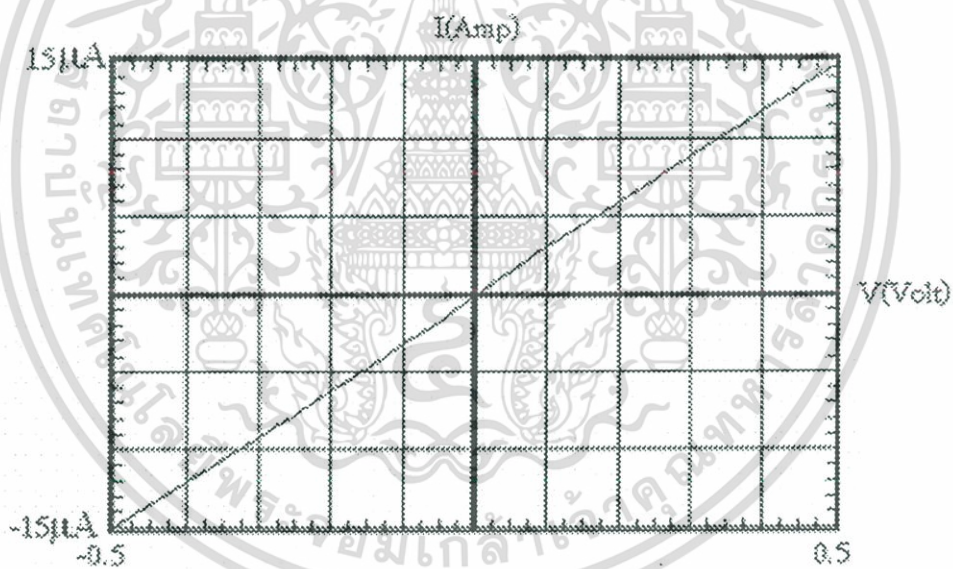
รูปที่ 4.23 กราฟคุณลักษณะกระแสและแรงดัน 2รอยต่อ

จากรูปที่ 4.23 เมื่อทำการวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้าของกระแสและแรงดันระหว่างจุดที่ 1 กับจุดที่ 2 โดยมีจำนวน 2 contact กับ 1 chain จะได้กราฟคุณลักษณะของกระแสและแรงดันมีความเป็นเชิงเส้นทั้งหมด ไม่ว่าจะ เป็นกราฟของ  $p^+/Al$  และ  $n^+/Al$  จากกราฟจะสังเกตเห็นว่าความชันของ  $p^+/Al$  จะสูงกว่า  $n^+/Al$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) จำนวน contact chain ที่ 140 chain กับ 280 contact ของ  $p^+/Al$

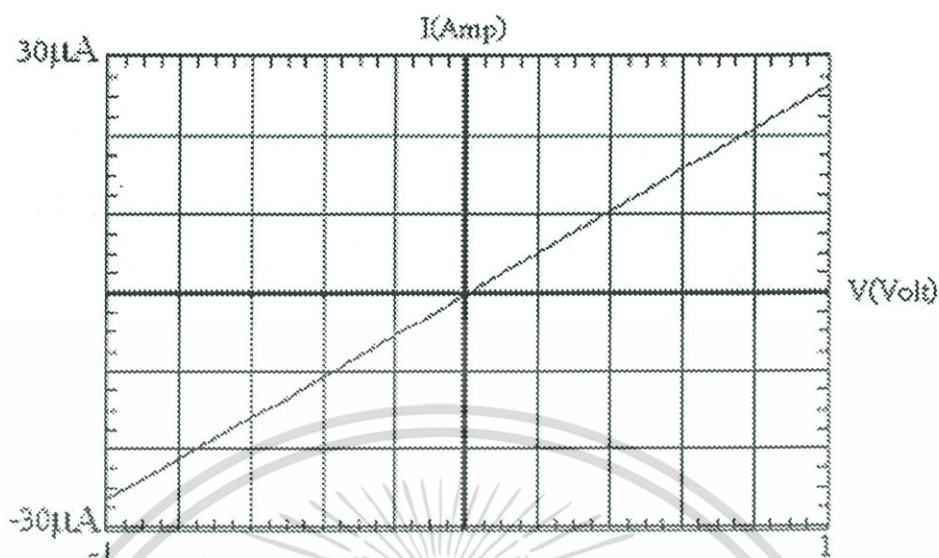


(ข) จำนวน contact chain ที่ 140 chain กับ 280 contact ของ  $n^+/Al$

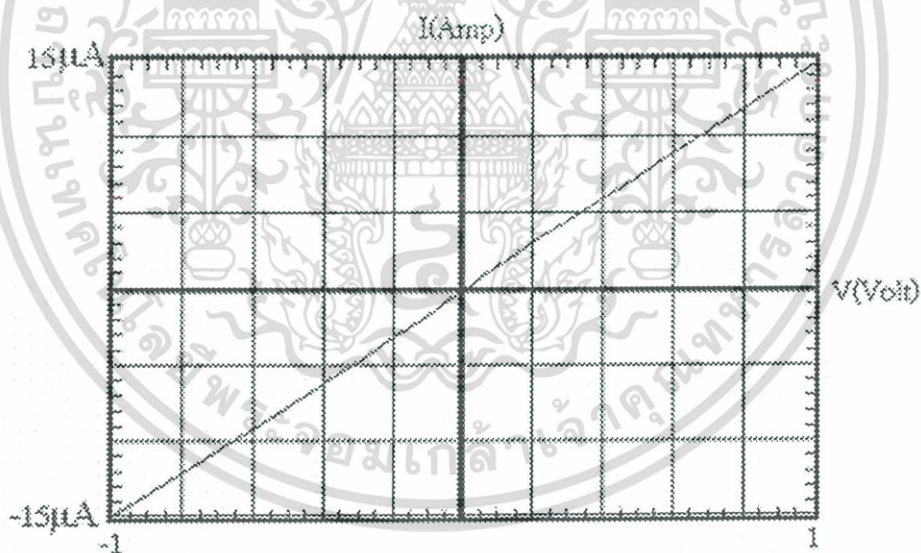
รูปที่ 4.24 กราฟคุณลักษณะกระแสและแรงดัน 280 รอยต่อ

จากรูปที่ 4.24 เมื่อทำการวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้าของกระแสและแรงดันระหว่างจุดที่ 2 กับจุดที่ 3 โดยมีจำนวน 280 contact กับ 140 chain จะได้กราฟคุณลักษณะของกระแสและแรงดันมีความเป็นเชิงเส้นทั้งหมด ไม่ว่าจะ เป็นกราฟของ  $p^+/Al$  และ  $n^+/Al$  จากกราฟจะสังเกตเห็นว่าความชันของ  $p^+/Al$  จะสูงกว่า  $n^+/Al$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



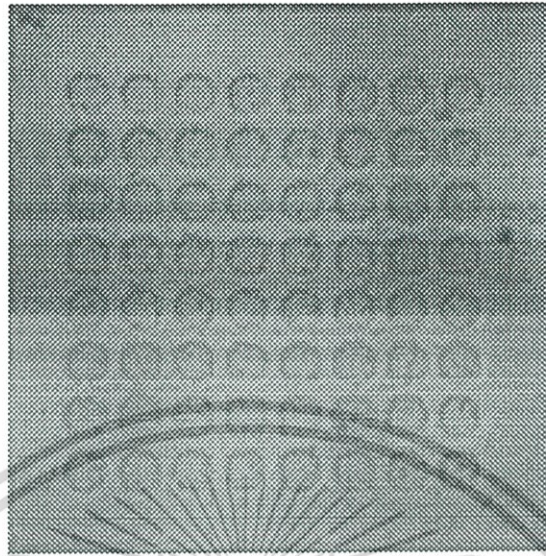
(ก) จำนวน contact chain ที่ 240 chain กับ 480 contact ของ  $p^+/Al$



(ข) จำนวน contact chain ที่ 240 chain กับ 480 contact ของ  $n^+/Al$

รูปที่ 4.25 กราฟคุณลักษณะกระแสและแรงดัน 480 รอยต่อ

จากรูปที่ 4.25 เมื่อทำการวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้าของกระแสและแรงดันระหว่างจุดที่ 2 กับจุดที่ 4 โดยมีจำนวน 480 contact กับ 240chain จะได้กราฟคุณลักษณะของกระแสและแรงดันมีความเป็นเชิงเส้นทั้งหมด ไม่ว่าจะ เป็นกราฟของ  $p^+/Al$  และ  $n^+/Al$  จากกราฟจะสังเกตเห็นว่าความชันของ  $p^+/Al$  จะสูงกว่า  $n^+/Al$  เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 ภาพถ่ายด้านบนของ pad แบบ contact ขนานเพื่อลดความต้านทานในรอยสัมผัส

ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของจำนวน contact chain กับค่าความต้านทาน  $R_T$ ,  $R_{CT}$  และ  $r_C$  ของ  $p^+/Al$

จำนวน Chain	จำนวน Contact	$R_T(\Omega)$	$R_{CT}(\Omega)$	$R_C(\Omega)$	$r_C(\Omega\text{-cm}^2)$
1	2	200	18	9	$1.76 \times 10^{-6}$
140	280	28.1k	2.62k	9.35	$1.83 \times 10^{-6}$
240	480	48.25k	4.57k	9.52	$1.86 \times 10^{-6}$

จากตารางที่ 4.4 เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าผ่านจุดที่ 1 กับจุดที่ 2 จะได้ความต้านทานรวมระหว่างจุดที่ 1 กับจุดที่ 2 ที่อ่านจากกราฟแสดงคุณลักษณะของกระแสและแรงดันในรูปที่ 4.23 (ก) มีค่า 200  $\Omega$  ซึ่งความต้านทานรวมจะประกอบไปด้วยผลของความต้านทานภายใน contact สอง contact รวมกับความต้านทานภายในเนื้อสาร ซึ่งจะทำให้ทราบค่าความต้านทานภายใน 1 contact มีค่าเป็น 9  $\Omega$  เมื่อนำค่าของความต้านทานภายใน 1 contact เข้าไปแทนในสมการที่เอกสาร (2.6.11) ซึ่งเป็นสมการภายในรอยสัมผัสแบบ 2 รอยต่อ ทำให้ทราบค่าความต้านทานจำเพาะที่ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายในรอยสัมผัส  $r_c$  (specific contact resistance) มีค่าเท่ากับ  $1.7 \times 10^{-6} \Omega\text{-cm}^2$  ในลักษณะเดียวกันเมื่อทำการอ่านค่าจากกราฟคุณลักษณะของกระแสและแรงดันผ่านจุดที่ 2 กับจุดที่ 3 และจุดที่ 2 กับจุดที่ 4 ในรูปที่ 4.24 และ 4.25 ได้ความต้านทานจำเพาะภายในรอยสัมผัส  $r_c$  มีค่าเป็น  $1.83 \times 10^{-6} \Omega\text{-cm}^2$  และ  $1.86 \times 10^{-6} \Omega\text{-cm}^2$  จากความต้านทานจำเพาะภายใน รอยสัมผัสทั้งหมดที่วัดได้สามารถสรุปได้ว่า จำนวน contact เพิ่มขึ้นหรือลดลงจะไม่ส่งผลให้ความต้านทานจำเพาะภายในรอยสัมผัสเพิ่มขึ้นและลดลงตามจำนวน contact ด้วย [22]

ตารางที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของจำนวน contact chain กับค่าความต้านทาน  $R_T$ ,  $R_{CT}$  และ  $r_c$  ของ  $n^+/\text{Al}$

จำนวน Chain	จำนวน Contact	$R_T (\Omega)$	$R_{CT} (\Omega)$	$R_c (\Omega)$	$r_c (\Omega\text{-cm}^2)$
1	2	220	80	40	$7.86 \times 10^{-6}$
140	280	32.5k	12.9k	46	$9.03 \times 10^{-6}$
240	480	57.25k	23.65k	49.2	$9.66 \times 10^{-6}$

$R_{CT}$  คือ ความต้านทานรอยสัมผัสรวม เช่น 1 chain กับ 2 contact จะมีค่า  $R_{CT} (\Omega)$  เท่ากับ  $2 R_c$

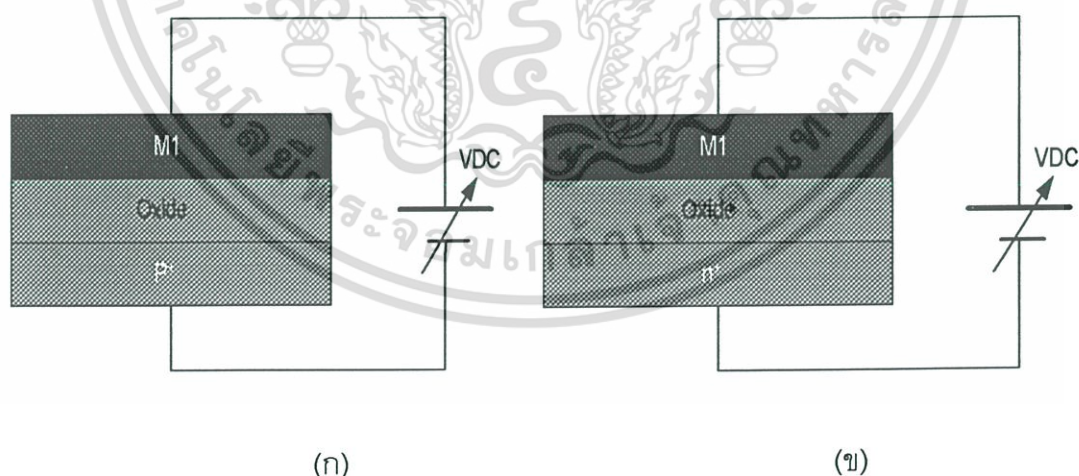
จากตารางที่ 4.5 จะเป็นการหาความต้านทานจำเพาะภายในรอยสัมผัสในลักษณะเดียวกับ ตารางที่ 4 แต่เป็นรอยสัมผัสระหว่าง สารกึ่งตัวนำ  $n^+$  กับโลหะอลูมิเนียม จากความสัมพันธ์ของตารางดังกล่าวสามารถบอกได้ว่ารอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ  $p^+$  จะมีความต้านทานมากกว่ารอยสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำ  $p^+$  กับโลหะ เมื่อต้องการความต้านทานภายในรอยสัมผัสที่มีค่าน้อยไม่ว่าจะเป็นรอยสัมผัสระหว่าง  $p^+$  หรือ  $n^+$  กับโลหะจึงจำเป็นต้องสร้างเส้นทางเดินกระแสหลายทางเป็นรอยสัมผัสแบบขนานหรืออีกในหนึ่งก็คือการสร้าง contact ขนานกันหลายๆ contact ที่เรียกว่า Multicontact เพื่อลดความต้านทานภายในรอยสัมผัสให้น้อยที่สุด [21] ทั้งนี้เนื่องมาจาก contact ต่อขนานกันหลายๆ contact จะเสมือนกับว่ามีตัวต้านทานค่าหนึ่งต่อขนานกันไปตามจำนวนของ contact นั้นเอง (หนึ่ง contact เปรียบเสมือน ตัวต้านทาน 1 ตัว)

ดังแสดงในรูปที่ 4.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.4 ค่าความจุไฟฟ้ากับความสัมพันธ์ของซิลิคอนไดออกไซด์ระหว่างโลหะอลูมิเนียมกับสารกึ่งตัวนำ

ในการทดลองนี้ได้ทำการสร้างตัวเก็บประจุหรือที่เรียกตามสัญลักษณ์โดยทั่วไปว่า “ C ” (capacitor) ขึ้นมาเพื่อจะหาความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) ระหว่างชั้นโลหะอลูมิเนียมกับสารกึ่งตัวนำ  $p^+$  โดยมีชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ชั้นอยู่ระหว่างกลางของชั้นโลหะอลูมิเนียมกับสารกึ่งตัวนำ  $p^+$  และ สร้าง C ระหว่างชั้นโลหะอลูมิเนียมกับสารกึ่งตัวนำ  $n^+$  โดยมีชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ชั้นอยู่ระหว่างกลางของชั้นโลหะอลูมิเนียมกับสารกึ่งตัวนำ  $n^+$  ขึ้นมาเพื่อจะหาความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) ดังแสดงในรูปที่ 4.27 (ก,ข) เมื่อเริ่มทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าจากเครื่องวัดทางไฟฟ้าซึ่งทำหน้าที่วัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวงจรถ่ายและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยเครื่องจะทำการป้อนแรงดันผ่านตัวเก็บประจุและวัดผลออกมาเป็นค่าความจุไฟฟ้าซึ่งจะแสดงผลออกมาทางจอมอนิเตอร์ ระบบเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าประกอบด้วย HP4156B precision semiconductor parameter analyzer , HP 4284A precisios LCR meter และ HP E5250A low leakage switch main frame โดย HP4156B จะทำหน้าที่เกี่ยวกับการวัดกระแสและแรงดัน HP 4284A ทำหน้าที่วัดค่าความจุไฟฟ้าซึ่งในการทดลองที่นี้จะใช้ตัวนี้เป็นตัวหลักและ HPE515A เป็น metric switch สลับหน้าที่การทำงานระหว่าง HP4156Bและ HP4284 A โดยระบบเครื่องมือวัดทั้งหมดจะถูกควบคุมโดยคอมพิวเตอร์โดยผ่านโปรแกรม interactive characteristic



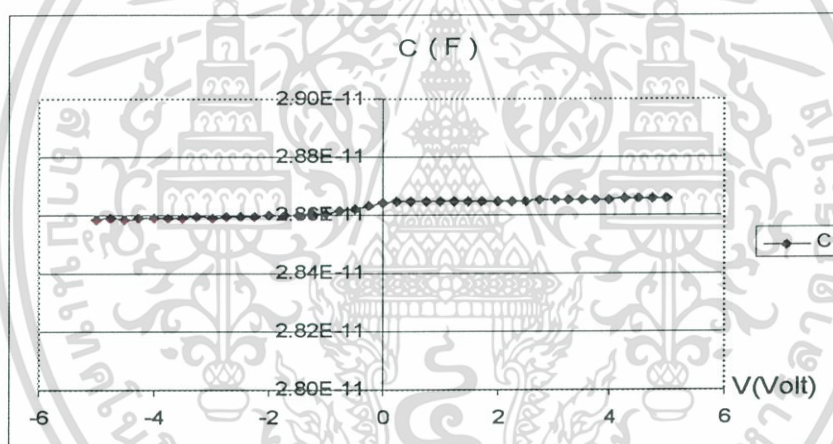
รูปที่ 4.27 ภาพการวัดตัวเก็บประจุเพื่อหาค่าความจุไฟฟ้า

(ก) วัดค่าความจุไฟฟ้าระหว่าง ชั้นโลหะกับ  $p^+$

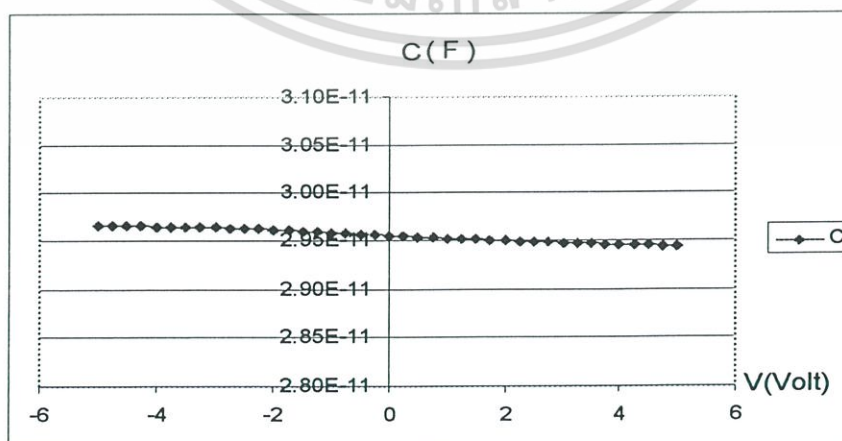
(ข) วัดค่าความจุไฟฟ้าระหว่าง ชั้นโลหะกับ  $n^+$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.27 เมื่อทำการป้อนค่าของแรงดันไฟฟ้าให้เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0-5 V และทำการวัดผลของค่าความจุไฟฟ้า กับค่าโดยกราฟที่ 4.28 เป็นการวัดค่าความจุไฟฟ้า ระหว่างชั้นโลหะอลูมิเนียมกับสารกึ่งตัวนำ  $p^+$  และรูปที่ 4.29 เป็นการวัดค่าความจุไฟฟ้า ระหว่างชั้นโลหะอลูมิเนียมกับสารกึ่งตัวนำ  $n^+$  กับค่าของแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไปนำมาพล็อตเป็นกราฟจะได้ลักษณะของกราฟเป็นดังรูปที่ 4.28, 4.29 จากกราฟจะสังเกตเห็นว่าที่เมื่อแรงดันที่ป้อนให้กับ C เพิ่มขึ้นกับผลของค่าความจุไฟฟ้า ที่วัดได้จะสังเกตเห็นว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกันในทุกๆค่าเช่น จากรูปที่ 4.28 เมื่อแรงดันที่ป้อนให้กับตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้นเป็น 1 V จะได้ผลของค่าความจุไฟฟ้าเป็น 28.4 pF และเมื่อเพิ่มแรงดันให้กับตัวเก็บประจุเป็น 4 V ทำให้ได้ผลของค่าความจุไฟฟ้าเป็น 28.7 pF เมื่อทำการอ่านค่าความจุไฟฟ้าจากเครื่อง HP 4284 A จากตัวเก็บประจุระหว่างชั้นโลหะอลูมิเนียมกับสารกึ่งตัวนำ  $p^+$  ได้ค่าความจุไฟฟ้า 28.7 pF และ จากตัวเก็บประจุระหว่างชั้นโลหะอลูมิเนียมกับสารกึ่งตัวนำ  $n^+$  ได้ค่าความจุไฟฟ้า 29.2 pF



รูปที่ 4.28 กราฟคุณลักษณะของ ความจุไฟฟ้าต่อ แรงดันของตัวเก็บประจุระหว่าง  $p^+/Al$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับอาจารย์ทางวิชาการที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนด้านการค้า  
รูปที่ 4.29 กราฟคุณลักษณะของ ความจุไฟฟ้าต่อ แรงดันของตัวเก็บประจุระหว่าง  $n^+/Al$   
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.28 และ 4.29 สามารถบอกได้ว่า ความสัมพันธ์ของตัวเก็บประจุกับค่าความจุไฟฟ้าจะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามแรงดันที่ให้กับตัวเก็บประจุกล่าวคือ ไม่ว่าจะการลดลงหรือเพิ่มขึ้นของแรงดันที่ให้กับตัวเก็บประจุจะไม่ทำให้ค่าความจุไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง (ค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าคงที่) แต่ปัจจัยที่ทำให้ค่าความจุไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงก็คือ ความหนาของชั้นฉนวนซิลิคอนไดออกไซด์ ถ้าชั้นฉนวนซิลิคอนไดออกไซด์มีความหนามากจะทำให้ค่าความจุของตัวเก็บประจุลดลงในทางกลับกันถ้าชั้นฉนวนซิลิคอนไดออกไซด์มีความหนาน้อยลงทำให้ค่าความจุของตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้นจากความสัมพันธ์ดังกล่าวพอจะสรุปเป็นสมการได้ดังสมการที่ 4.1

$$C = \frac{\epsilon_{ox} A}{t_{ox}} \quad (4.1)$$

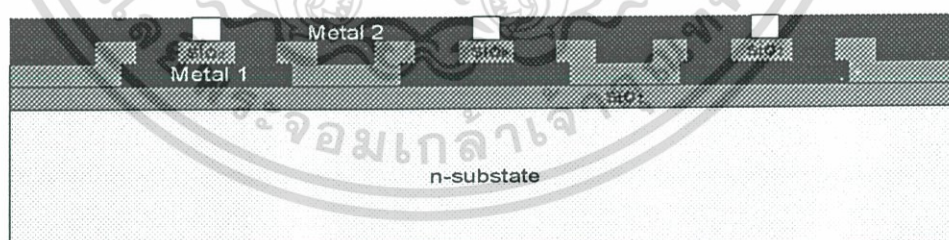
โดยที่ A คือ พื้นที่ของตัวเก็บประจุ

$t_{ox}$  คือ ความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

$\epsilon_{ox}$  คือ ค่า Permittivity ของ ออกไซด์ ( $8.85 \times 10^{-14}$  F/cm<sup>2</sup>)

### 4.3 การเชื่อมต่อทางไฟฟ้าของโลหะแบบ 2 ชั้น

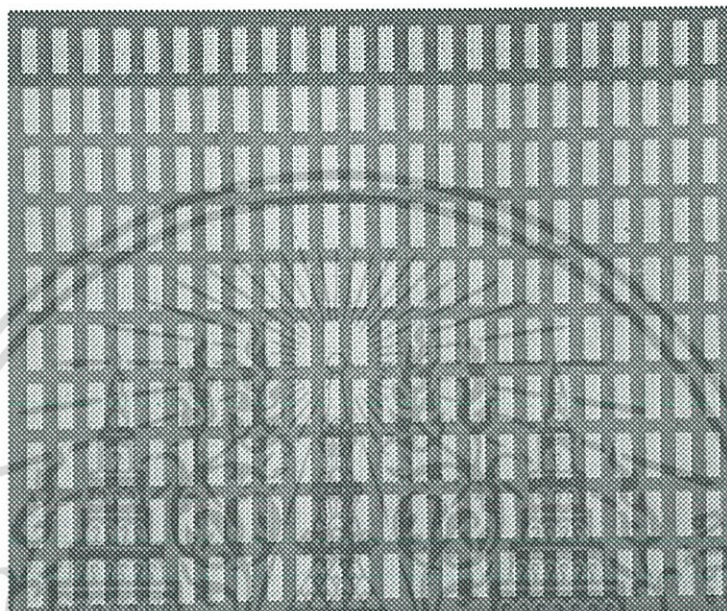
การสร้างขั้วโลหะสัมผัสที่ใช้สำหรับต่อออกไปสู่อุปกรณ์ภายนอก โดยทั่วไปในเทคโนโลยีวงจรรวมจะมีการสร้างขั้วโลหะและลวดลายโลหะเป็นหลายชั้นเพื่อประโยชน์ในการเพิ่มพื้นที่และเส้นทางนำกระแสให้กับวงจรรวม ซึ่งจะทำให้ความต้านทานภายในรอยสัมผัสลดลงและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับวงจรรวม ในวิทยานิพนธ์นี้จะมีการสร้างลวดลายโลหะแบบ 2 ชั้นเพื่อช่วยลดปัญหาดังกล่าว ซึ่งได้ทำการสร้างจริงโดยมีลักษณะของโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 4.30 [23]



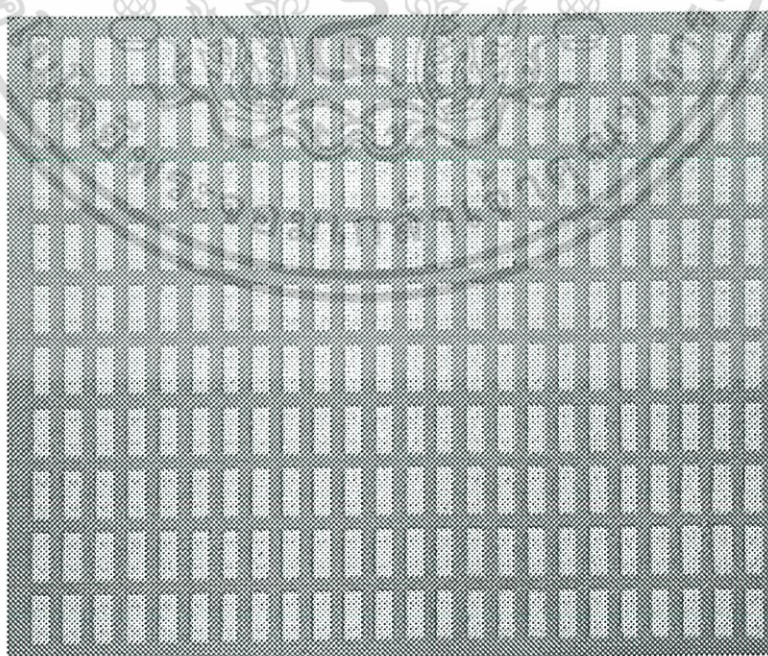
รูปที่ 4.30 ภาพตัดขวางลวดลายโลหะแบบ 2 ชั้นในแบบ contact chain ที่สมบูรณ์

นำแผ่น ซิลิคอนเวเฟอร์ที่ทำความสะอาดเรียบร้อยแล้วมาสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการ Thermal Oxidation ที่ความหนา 500 nm ชั้นตอนต่อมาเป็นการสร้างชั้นฟิล์มโลหะด้วยกระบวนการสปัตเตอร์แล้วสร้างลวดลายโลหะด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี ทำการกัดด้วยสารละลาย  $H_3PO_4:HNO_3:CH_3COOH:H_2O$  สร้างเป็นลวดลายโลหะแสดงในรูปที่ 4.31 แล้วเอ็กซเรย์เป็นเอกซเรย์ที่ส่งวนเวสสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า เปรียบเทียบความหนาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ มาสร้างชั้น ซิลิคอนไดออกไซด์ ด้วยวิธีการสปัตเตอร์ เนื่องจากต้องสร้างชั้น ซิลิคอนไดออกไซด์ลงบนฟิล์มอลูมิเนียมจึงจำเป็นต้องใช้วิธีการดังกล่าวเพราะว่าการสร้างชั้น ซิลิคอนไดออกไซด์วิธีนี้จะใช้อุณหภูมิที่ต่ำและไม่มีผลกระทบกับชั้นของฟิล์มโลหะอลูมิเนียม และ ชั้นตอนต่อมาจึงเป็นกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี เพื่อเปิดรู contact hole ดังแสดงในรูปที่ 4.32



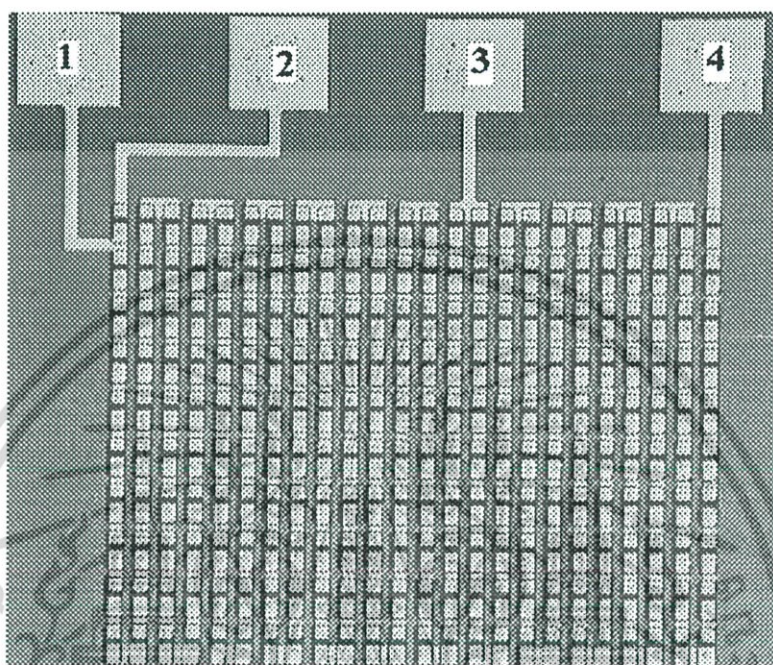
รูปที่ 4.31 การกัดลวดลายโลหะโดยใช้สารละลาย  $\text{H}_3\text{PO}_4:\text{HNO}_3:\text{CH}_3\text{COOH}:\text{H}_2\text{O}$



รูปที่ 4.32 เปิดช่อง contact hole

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนต่อมาหลังจากเปิดรู contact hole และทำการเคลือบฟิล์มโลหะชั้นที่ 2 ด้วยวิธีการ สปีดเตอร์ จึงเข้าสู่กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีเพื่อสร้างลวดลายโลหะชั้นที่ 2 ขั้นตอนต่อมาเป็นการกัดลวดลายโลหะด้วยสารละลายสร้างเป็น contact chain แบบ 2 ชั้นที่สมบูรณ์ดังรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 Contact chain แบบ 2 ชั้นที่สมบูรณ์

จากรูปที่ 4.33 ที่แสดงภาพถ่ายของ contact chain จะสังเกตว่าในวิทยานิพนธ์ได้ทำการ ออกแบบ contact chain ไว้ทั้งหมด 240 chain กับ 480 contact และ pad ที่ต่อออกมากับ อุปกรณ์ภายนอกมีอยู่ 4 pad โดยในแต่ละ pad เป็นดังนี้ ระหว่าง pad 1 กับ pad 2 มี 1 chain กับ 2 contact ระหว่าง pad 2 กับ pad 3 มี 140 chain กับ 280 contact และระหว่าง pad 2 กับ pad 4 มี 240 chain กับ 480 contact ทั้งนี้ที่ต้องสร้างลวดลายโลหะแบบ 2 ชั้นในแบบของ contact chain จำนวนมากก็เพราะว่าเพื่อต้องการทราบค่าเฉลี่ยที่แน่นอนของความต้านทานของ Via contact ระหว่างโลหะชั้นที่ 1 กับโลหะชั้นที่ 2 และทดสอบจุดเชื่อมต่อภายในวงจรรวมด้วย

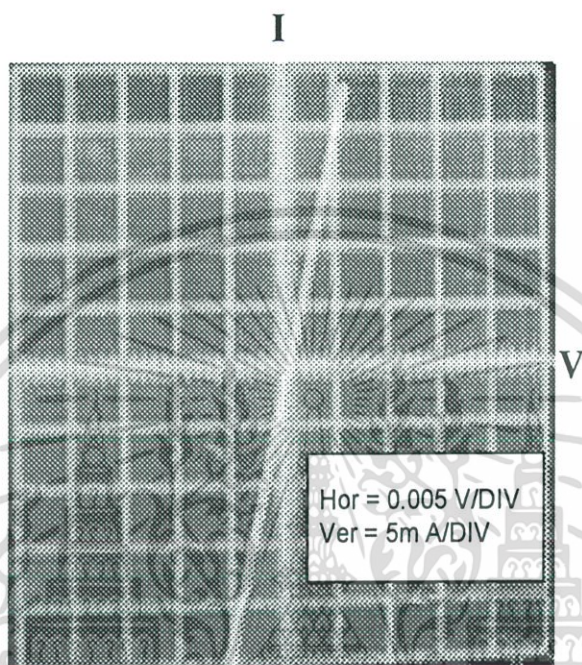
#### 4.3.1 ความต้านทานภายในที่ via hole ระหว่างโลหะชั้นที่ 1 กับ โลหะชั้นที่ 2

จากรูปที่ 4.33 เป็น contact chain แบบโลหะ 2 ชั้น ในการทดลองนี้จะทำการวัด คุณสมบัติของกระแสและแรงดันระหว่าง โลหะชั้นที่ 1 กับโลหะชั้นที่ 2 เพื่อหาความต้านทาน ระหว่าง via contact เมื่อเราป้อนแรงดันไฟฟ้าผ่านจุดที่ 1 และจุดที่ 2 ซึ่งมีจำนวนของ 1 chain กับ 2 contact ทำให้ได้กราฟคุณสมบัติกระแสและแรงดันเป็นดังรูปที่ 4.34 [23]

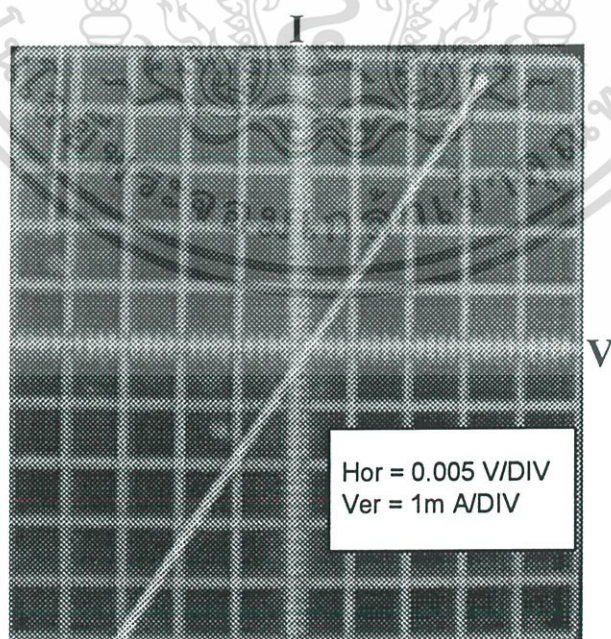
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนต่อมาได้ทำการเปลี่ยนจุดวัดใหม่โดยวัดระหว่างจุดที่ 2 กับจุดที่ 3 มีจำนวน chain ทั้งหมด 140 chain กับ 280 contact ทำให้ได้กราฟคุณลักษณะของกระแสและแรงดันดังแสดงในรูปที่ 4.35 และทำการเปลี่ยนจุดเป็นระหว่างจุดที่ 2 และจุดที่ 4 มี 240 chain กับ 480 contact ได้กราฟคุณลักษณะของกระแสและแรงดันดังแสดงในรูปที่ 4.36

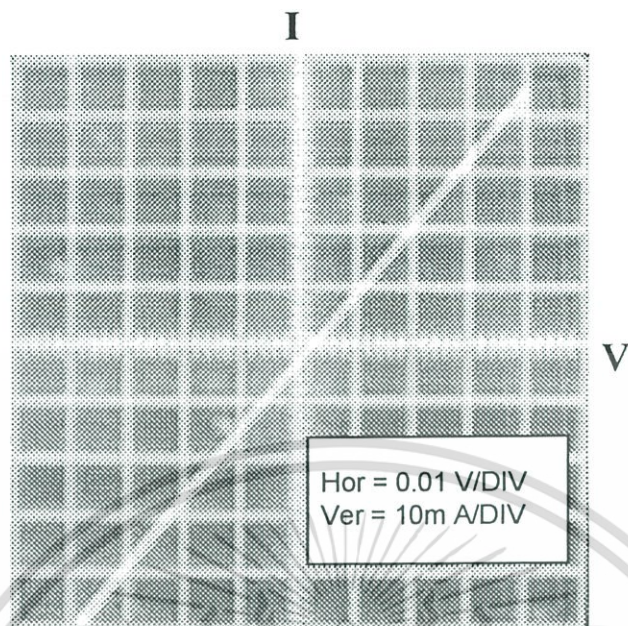


รูปที่ 4.34 กราฟแสดงคุณลักษณะของกระแสและแรงดัน ของ 1 chain 2 contact



รูปที่ 4.35 กราฟแสดงคุณลักษณะของกระแสและแรงดัน ของ 140 chain 280 contact

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยกระทรวงมหาดไทยเพื่อใช้ในการดำเนินงานการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 กราฟแสดงคุณลักษณะของกระแสและแรงดัน ของ 240 chain 480 contact

จากความสัมพันธ์ของกราฟแสดงคุณลักษณะของกระแสและแรงดันทั้งสามภาพทำให้ทราบถึงความต้านทานของ contact chain ที่ทำการวัดจากจุดต่างๆที่ซึ่งอ่านได้จากกราฟ จะแสดงให้เห็นในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ความต้านทานระหว่างโลหะ 1 กับโลหะชั้นที่ 2 ของ contact chain

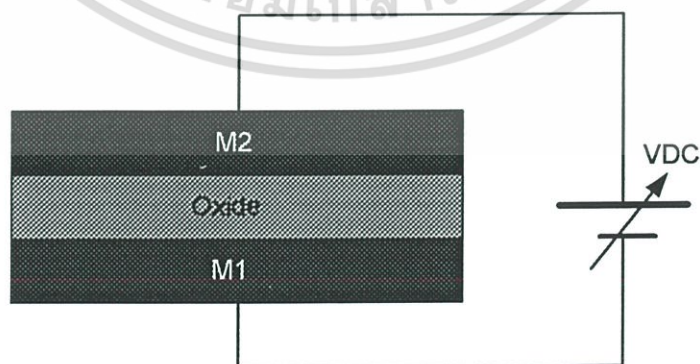
Chain	Contact	Resistance( $\Omega$ )
1	2	$25 \times 10^{-3}$
140	280	$450 \times 10^{-3}$
240	480	1

จากตารางที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานภายใน via contact ระหว่างโลหะชั้นที่ 1 กับ โลหะชั้นที่ 2 จะมีค่าที่ต่ำมาก ซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้จริงตามในการเชื่อมต่อวงจรรวมเพื่อเพิ่มเส้นทางการเดินกระแสให้กับวงจรรวม โดยเมื่อทำการวัดจากจำนวน contact chain ที่ 2 contact ได้ความต้านทานระหว่าง โลหะชั้นที่ 1 กับโลหะชั้นที่ 2 มีค่าเท่ากับ  $25 \text{ m}\Omega$  เมื่อทำการวัดโดยเพิ่มค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวน contact เป็น 280 contact ได้ความต้านทานระหว่าง โลหะชั้นที่ 1 กับโลหะชั้นที่ 2 เป็น  $450\text{ m}\Omega$  และเมื่อเพิ่มจำนวน contact จนถึง 480 contact ได้ความต้านทานระหว่างโลหะชั้นที่ 1 กับชั้นที่ 2 เท่ากับ  $1\Omega$  เหตุที่จำนวน contact เพิ่มขึ้น และทำให้ความต้านทานเพิ่มขึ้นก็เพราะว่าการเรียงร้อยของความต้านทานภายใน via hole มีการต่อกันในแบบอนุกรมจึงทำให้ความต้านทานภายใน contact เพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนของ contact เพิ่ม

#### 4.3.2 ค่าความจุไฟฟ้ากับความสัมพันธ์ของซิลิคอนไดออกไซด์ระหว่างโลหะอลูมิเนียมชั้นที่ 1 กับ โลหะอลูมิเนียมชั้นที่ 2

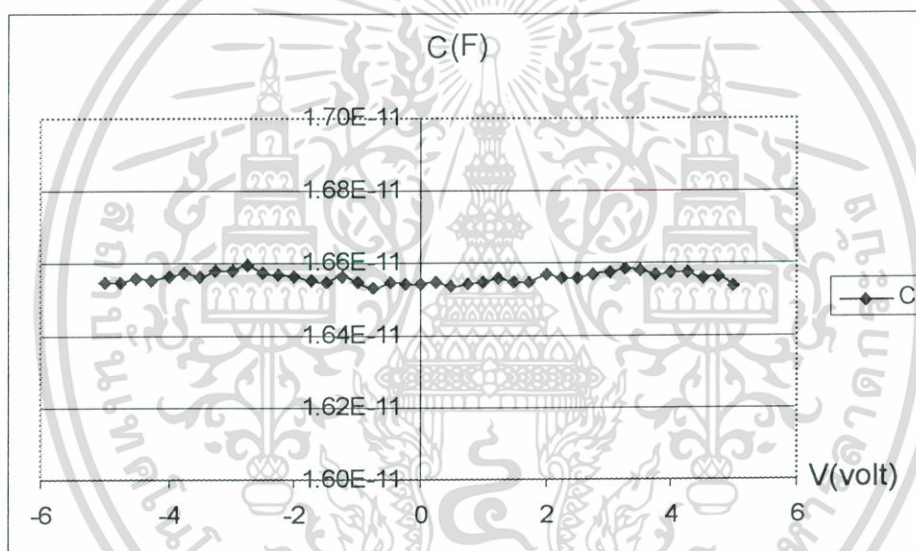
ในการทดลองนี้จะมีลักษณะการทดลองคล้ายกับหัวข้อที่ 4.2.4 คือเป็นการสร้างตัวเก็บประจุ ขึ้นมาเพื่อจะหาความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) ระหว่างชั้นโลหะอลูมิเนียมชั้นที่ 1 กับโลหะอลูมิเนียมชั้นที่ 2 โดยมีชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ชั้นอยู่ระหว่างกลางของชั้น โลหะอลูมิเนียมชั้นที่ 1กับโลหะอลูมิเนียมชั้นที่ 2 เพื่อจะหาความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้างแสดงในรูปที่ 4.37 โดยเริ่มจากการวัดค่าความจุไฟฟ้าจากเครื่องวัดทางไฟฟ้าซึ่งทำหน้าที่วัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวงจรรวมและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยเครื่องจะทำการป้อนแรงดันผ่านตัวเก็บประจุและวัดผลออกมาเป็นค่าความจุไฟฟ้าซึ่งจะแสดงผลออกมาทางจอมอนิเตอร์ ระบบเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าประกอบด้วย HP4156B precision semiconductor parameter analyzer , HP 4284A precisiios LCR meter และ HP E5250A low leakage switch main frame โดย HP4156B จะทำหน้าที่เกี่ยวกับการวัดกระแสและแรงดัน HP 4284A ทำหน้าที่วัดค่าความจุไฟฟ้าซึ่งในการทดลองที่นี้จะใช้ตัวนี้เป็นตัวหลักและ HPE515A เป็น metric switch สลับหน้าที่การทำงานระหว่าง HP4156Bและ HP4284 A โดยระบบเครื่องมือวัดทั้งหมดจะถูกควบคุมโดยคอมพิวเตอร์โดยผ่านโปรแกรม interactive characteristic



รูปที่ 4.37 ภาพแสดงการวัดตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.36 เมื่อทำการป้อนค่าของแรงดันไฟฟ้าให้เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0-5 V และทำการวัดผลของค่าความจุไฟฟ้ากับค่าโดยกราฟที่ 4.38 เป็นการวัดค่าความจุไฟฟ้าระหว่างชั้นโลหะอลูมิเนียมชั้นที่ 1 กับ ชั้นโลหะอลูมิเนียมชั้นที่ 2 กับค่าของแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไปนำมาพล็อตเป็นกราฟจะได้ลักษณะของกราฟเป็นดังรูปที่ 4.38 จากกราฟจะสังเกตเห็นว่าที่เมื่อแรงดันที่ป้อนให้กับ C เพิ่มขึ้นกับผลของค่าความจุไฟฟ้า ที่วัดได้จะสังเกตเห็นว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกันในทุกๆ ค่าเช่น จากรูปที่ 4.38 เมื่อแรงดันที่ป้อนให้กับตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้นเป็น 1V จะได้ผลของค่าความจุไฟฟ้าเป็น 16.4 pF และเมื่อเพิ่มแรงดันให้กับตัวเก็บประจุเป็น 4 V ทำให้ได้ผลของค่าความจุไฟฟ้าเป็น 16.5 pF เมื่อทำการอ่านค่าความจุไฟฟ้าจากเครื่อง HP 4284 A จากตัวเก็บประจุระหว่างชั้นโลหะอลูมิเนียมชั้นที่ 1 กับ โลหะอลูมิเนียมชั้นที่ 2 ได้ค่าความจุไฟฟ้า 16.5 pF



รูปที่ 4.38 กราฟคุณลักษณะของ ความจุไฟฟ้าต่อ แรงดันของตัวเก็บประจุระหว่าง AI 1/AI 2

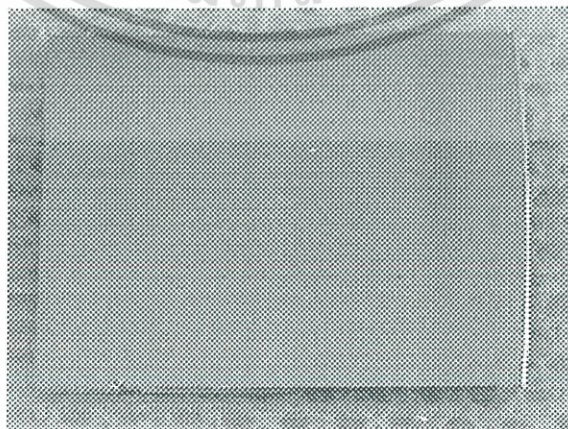
จากรูปที่ 4.38 สังเกตจากกราฟคุณลักษณะของความจุไฟฟ้าต่อแรงดันที่ป้อนให้กับตัวเก็บประจุระหว่าง AI 1/ AI 2 สามารถบอกได้ว่า ความสัมพันธ์ของตัวเก็บประจุกับค่าความจุไฟฟ้าจะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามแรงดันที่ให้กับตัวเก็บประจุกล่าวคือ ไม่ว่าจะการลดลงหรือเพิ่มขึ้นของแรงดันที่ให้กับตัวเก็บประจุจะไม่ทำให้ค่าความจุไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง (ค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าคงที่) แต่ปัจจัยที่ทำให้ค่าความจุไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงก็คือ ความหนาของชั้นฉนวนซิลิคอนไดออกไซด์ ถ้าชั้นฉนวนซิลิคอนไดออกไซด์มีความหนาจะทำให้ค่าความจุของตัวเก็บประจุลดลงในทางกลับกัน ถ้าชั้นฉนวนซิลิคอนไดออกไซด์มีความหนาน้อยลงทำให้ค่าความจุของตัวเก็บประจุมีค่าเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.12 ผลของกระบวนการสร้างฟิล์มโลหะด้วยวิธีการระเหยในสุญญากาศ

การสร้างฟิล์มโลหะด้วยวิธีการระเหยในสุญญากาศเริ่มจากภายใน chamber จะมีความดันบรรยากาศปกติจะถูกดูดอากาศออกโดยใช้ mechanical pump จนความดันภายใน chamber ได้ประมาณ  $10^{-3}$  Bar จะวัดความดันที่จุดนี้โดย gessler's Tube จากนั้นเมื่อแรงดันภายใน chamber ได้ประมาณ  $10^{-3}$  Bar แล้วทำการเปิดระบบของ diffusion pump เพื่อให้ diffusion pump ทำการช่วยลดแรงดันใน chamber ลงอีกจนได้ค่าประมาณ  $10^{-6}$  Bar จึงเริ่มกระบวนการเคลือบฟิล์มโลหะ โดยในการวัดความดันที่เป็นความดันต่ำจะต้องใช้ Ionization Gauge เป็นตัววัด เมื่อความดันภายในครอบแก้วลดลงจนถึงค่าประมาณ  $10^{-6}$  Bar ตามต้องการ หลังจากนั้นจึงให้แรงดันและกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดที่เป็นไส้ทำมาจากทังสเตน

เมื่อไส้ถูกทำให้ร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าจำนวนมากที่ไหลผ่านทำให้ลวดอุณหภูมิเย็นที่วางอยู่บนไส้เกิดการหลอมเหลว ซึ่งลวดอุณหภูมิเย็นจะไหลมารวมกันเป็นจุดเดียว ซึ่งในขั้นตอนนี้จะต้องค่อยเพิ่มแรงดันให้กับไส้ไปเรื่อยๆจนกว่าอุณหภูมิของโลหะอุณหภูมิเย็นจะเลยจุดหลอมเหลวและระเหยเป็นไอฟุ้งกระจายไปเคลือบแผ่นผลึกซิลิคอนที่วางอยู่ใน chamber เมื่อนำฟิล์มโลหะที่เป็นอุณหภูมิเย็นบริสุทธิ์มาทำการวัดคุณสมบัติของฟิล์มโลหะคือค่าความเรียบของฟิล์มโลหะ (Reflectance(%)) มีค่าเป็น 100% เทียบกับตัวอย่างฟิล์มมาตรฐาน และสภาพความต้านทานของฟิล์มโลหะที่วัดจากเครื่องวัดสภาพความต้านทานประมาณ  $0.38 \Omega/\square$  โดยมีความหนาอยู่ที่ประมาณ 500 nm (ใส่โลหะ 7 เส้น) ซึ่งทั้งนี้การควบคุมความหนาของการสร้างฟิล์มโลหะแบบนี้จะเป็นไปได้ยากเพราะจะขึ้นอยู่กับระยะเวลาการเปิด shutter และ จำนวนใส่โลหะที่ต้องการจะเคลือบด้วย ทั้งนี้ฟิล์มโลหะอุณหภูมิเย็นที่ใช้เป็นฟิล์มโลหะอุณหภูมิเย็นบริสุทธิ์ซึ่งอาจจะทำให้เกิดผลของการทะลุผ่านรอยต่อ(spiking) ได้ง่ายกว่าแบบโลหะอุณหภูมิเย็นที่มีซิลิคอนผสมอยู่ 2% โดยน้ำหนัก จากรูปที่ 4.39 เป็นการเคลือบฟิล์มโลหะอุณหภูมิเย็นบริสุทธิ์ ที่มีลักษณะของฟิล์มเป็นมันวาวเหมือนกระจก

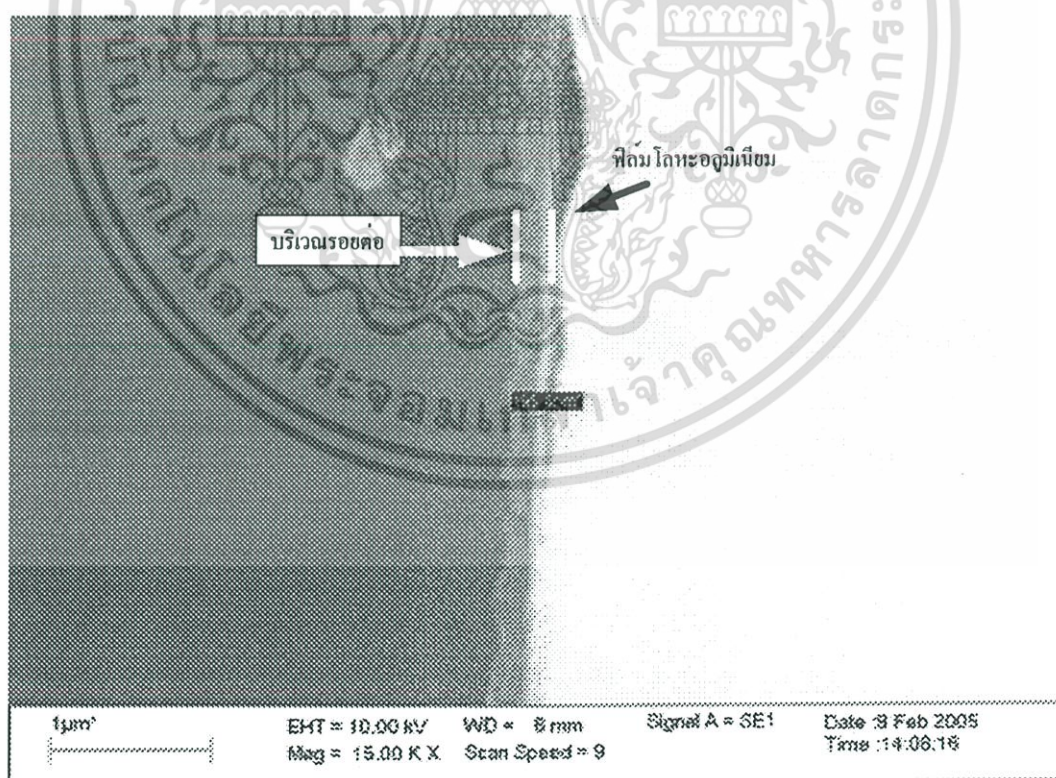


เอกสารนี้เป็นเอกสาร **รูปที่ 4.39** ฟิล์มโลหะอุณหภูมิเย็นบริสุทธิ์ ด้วยวิธีการระเหยในสุญญากาศ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพตัดขวางที่ถ่าย SEM ในรูปที่ 4.40 จะสังเกตเห็นว่ารูปที่เกิดจากการสร้างฟิล์มโลหะด้วยวิธีการระเหยในสุญญากาศนั้นจะมีความเรียบของฟิล์มที่รอยต่อระหว่างโลหะกับพื้นผิวซิลิคอนไดออกไซด์ไม่สม่ำเสมอ สาเหตุส่วนหนึ่งที่ทำให้การเรียงตัวของเกณฑ์ในฟิล์มโลหะไม่สม่ำเสมอก็คือเพราะว่าในการสร้างฟิล์มโลหะด้วยวิธีการระเหยในสุญญากาศเกิดจากการระเหยของใส่อลูมิเนียมแบบฟุ้งกระจายทำให้การเรียงตัวของ เม็ดเกณฑ์บริเวณผิวหน้าเวเฟอร์ไม่เป็นระเบียบ เมื่อเทียบกับการสร้างฟิล์มด้วยวิธีการสปัตเตอร์ที่มีพื้นผิวของฟิล์มที่รอยต่อจะมีความสม่ำเสมอของ เม็ดเกณฑ์ที่ฟิล์มโลหะอลูมิเนียมดีกว่าดังแสดงในรูปที่ 4.4

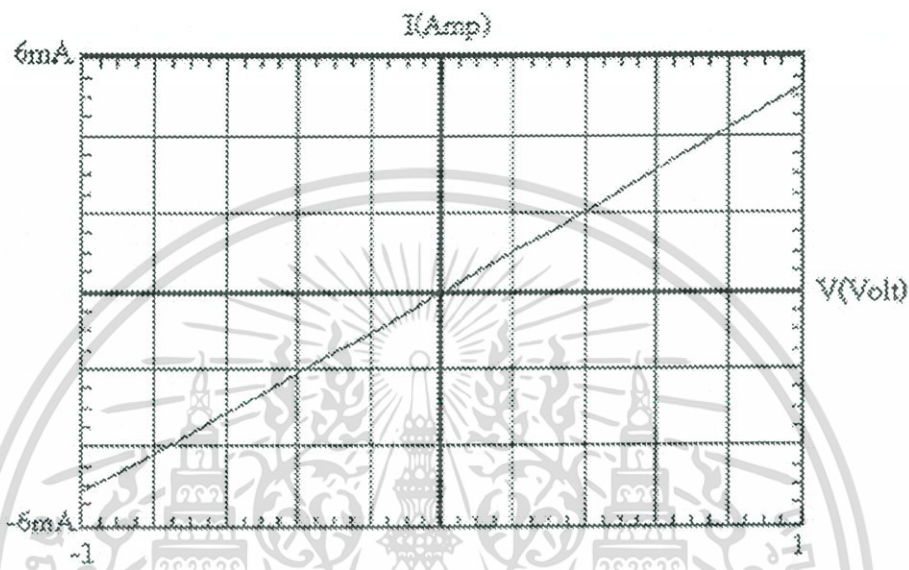
นำฟิล์มโลหะอลูมิเนียมบริสุทธิ์มาทำการสร้างเป็นชั้นฟิล์มโลหะในโครงสร้างของ contact chain ตามโครงสร้างในหัวข้อที่ 4.2.3 โดยเปลี่ยนโลหะจากอลูมิเนียมซิลิคอนมาเป็นอลูมิเนียมบริสุทธิ์ โดยที่ contact chain จะถูกออกแบบให้มีจำนวน contact chain ที่ 480 contact กับ 240 chain ซึ่งจะมีจุดต่อในการวัดทั้งหมด 4 pad โดยในแต่ละ pad เป็นดังนี้ ระหว่าง pad 1 กับ pad 2 มี 1chain กับ 2 contact ระหว่าง pad 2 กับ pad 3 มี 140 chain กับ 280 contact และระหว่าง pad 2 กับ pad 4 มี 240 chain กับ 480 contact ซึ่งในการวัดจะต้องทำการวัดเป็นคู่ๆไป เช่น ป้อนแหล่งจ่ายกระแสและแรงดันระหว่าง pad ที่ 1 กับ pad ที่ 2



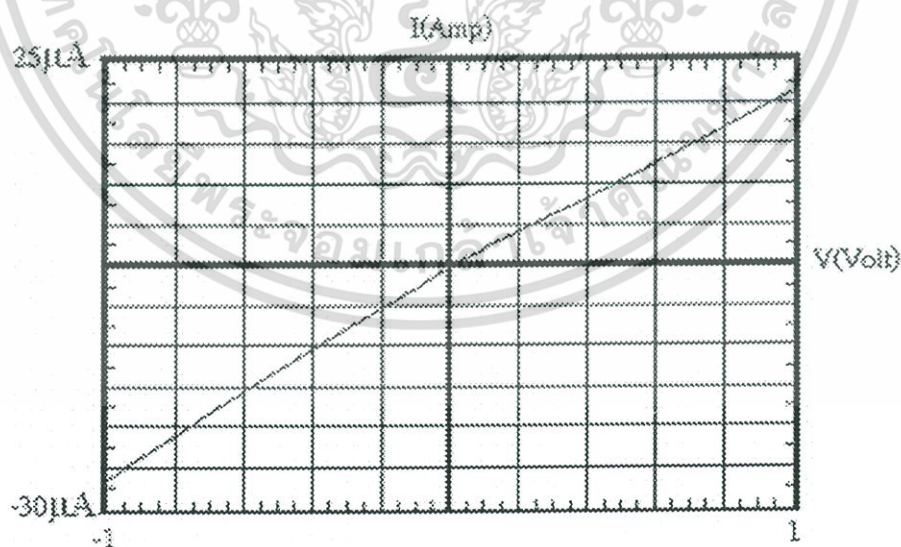
รูปที่ 4.40 ภาพตัดขวางของฟิล์มอลูมิเนียมบริสุทธิ์ ถ่ายด้วยเครื่อง SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.15 เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าผ่านจุดที่ 1 และจุดที่ 2 โดยมีจำนวน 1 chain กับ 2 contact จะได้กราฟคุณลักษณะของ กระแสและแรงดันดังรูปที่ 4.41 หลังจากนั้นทำการวัด contact chain โดยการป้อนแรงดันไฟฟ้าผ่านจุดที่ 2 และจุดที่ 4 โดยมีจำนวน 240 chain กับ 480 contact ทำให้ได้กราฟคุณลักษณะของกระแสและแรงดันดังแสดงในรูปที่ 4.42



รูปที่ 4.41 กราฟคุณลักษณะกระแสและแรงดัน 2 รอยต่อ ของ  $p^+ / Al$



รูปที่ 4.42 กราฟคุณลักษณะกระแสและแรงดัน 480 รอยต่อ ของ  $p^+ / Al$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของจำนวน contact chain กับค่าความต้านทาน  $R_T$ ,  $R_{CT}$  และ  $r_c$  ของ  $p^+/Al$

จำนวน Chain	จำนวน Contact	$R_T(\Omega)$	$R_{CT}(\Omega)$	$R_C(\Omega)$	$r_c(\Omega\text{-cm}^2)$
1	2	214	32	16	$3.14 \times 10^{-6}$
140	280	30k	4.52k	16.2	$3.17 \times 10^{-6}$
240	480	51.6k	7.92k	16.5	$3.23 \times 10^{-6}$

จากตารางที่ 4.6 เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าผ่านจุดที่ 1 กับจุดที่ 2 จะได้ความต้านทานรวมระหว่างจุดที่ 1 กับจุดที่ 2 ที่อ่านจากกราฟแสดงคุณลักษณะของกระแสและแรงดันในรูปที่ 4.35 มีค่า 214  $\Omega$  ซึ่งความต้านทานรวมจะประกอบไปด้วยผลของความต้านทานภายใน contact สอง contact รวมกับความต้านทานภายในเนื้อสาร ซึ่งจะทำให้ทราบค่าความต้านทานภายใน 1 contact มีค่าเป็น 16  $\Omega$  เมื่อนำค่าของความต้านทานภายใน 1 contact เข้าไปแทนในสมการที่ (2.6.11) ซึ่งเป็นสมการภายในรอยสัมผัสแบบ 2 รอยต่อ ทำให้ทราบค่าความต้านทานจำเพาะภายในรอยสัมผัส  $r_c$  (specific contact resistance) มีค่าเท่ากับ  $3.14 \times 10^{-6} \Omega\text{-cm}^2$  ในลักษณะเดียวกันเมื่อทำการอ่านค่าจากกราฟคุณลักษณะของกระแสและแรงดันผ่านจุดที่ 2 กับจุดที่ 3 และจุดที่ 2 กับจุดที่ 4 ในรูปที่ 4.36 ได้ความต้านทานจำเพาะภายในรอยสัมผัส  $r_c$  ค่าเป็น  $3.17 \times 10^{-6} \Omega\text{-cm}^2$  และ  $3.23 \times 10^{-6} \Omega\text{-cm}^2$  จากความต้านทานจำเพาะภายในรอยสัมผัสทั้งสามตัวอย่างที่ได้ทำการวัดแล้วทำให้เราทราบว่า contact จึงจะเพิ่มขึ้นหรือลดลง จะไม่มีผลกับความต้านทานจำเพาะภายในรอยสัมผัสซึ่งจะมีค่าเท่าเดิมเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ถูกจัดทำขึ้นมาเพื่อศึกษากระบวนการสร้างวงจรรวมระดับ 5 ไมโครเมตรที่ สจล. ซึ่งจะเป็นการศึกษาทดลองวิจัยและวิเคราะห์ผลการทดลองในส่วนของกระบวนการโลหะสำหรับเทคโนโลยีวงจรรวมระดับ 5 ไมโครเมตร โดยจะเริ่มทำการวิจัยตั้งแต่การสร้างฟิล์มโลหะที่ใช้เทคโนโลยีการสร้างฟิล์มโลหะของคุณวิจัยอิเล็กทรอนิกส์ มีอยู่ 2 แบบด้วยกัน คือ วิธีการระเหยในสุญญากาศและวิธีการสปัตเตอร์

ศึกษาการสร้างฟิล์มโลหะด้วยวิธีการสปัตเตอร์ซึ่งใช้เป้าโลหะเป็นวัสดุโลหะอลูมิเนียมที่มีซิลิคอนผสมอยู่ 2% (Al-si(2wt%)) โดยน้ำหนัก ด้วยเงื่อนไขของการสปัตเตอร์ ที่ความดันในห้องสปัตเตอร์  $5 \times 10^{-7}$  บาร์ และความดันขณะทำการสปัตเตอร์  $2 \times 10^{-3}$  บาร์ ใช้กำลังงาน RF 100 W 프리-สปัตเตอร์ (pre-sputter) เพื่อทำความสะอาดผิวหน้าเป้าโลหะ 5 นาที และทำการสปัตเตอร์ตามเงื่อนไขของความหนาที่ต้องการ

ฟิล์มโลหะที่ได้นำมาศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางไฟฟ้าของฟิล์มโลหะ จากเงื่อนไขการสปัตเตอร์กำหนดให้ความดันการสปัตเตอร์คงที่  $2 \times 10^{-3}$  บาร์ โดยใช้กำลังงาน RF ต่างกันเป็น 100, 150, 200 วัตต์ จากเงื่อนไขดังกล่าวศึกษาอัตราการเกิดของฟิล์มโลหะด้วยวิธีการสปัตเตอร์ พบว่าเมื่อกำลังงาน RF เพิ่มขึ้นอัตราการเกิดของฟิล์มโลหะจะเพิ่มขึ้นด้วยการทดลองต่อมาศึกษาความเรียบของฟิล์มโลหะโดยใช้เงื่อนไขของความดันที่แตกต่างกันออกไปตั้งแต่  $2-5 \times 10^{-3}$  บาร์ และใช้กำลัง RF คงที่ 100 W ทำให้ทราบว่าความเรียบของฟิล์มโลหะเป็น 100 % ทั้งสามเงื่อนไข เมื่อเทียบกับตัวอย่างมาตรฐานของฟิล์มโลหะ สรุปได้ว่าวิธีการสปัตเตอร์มีความราบเรียบของฟิล์มโลหะสูง

ฟิล์มโลหะถูกนำมาศึกษาคุณสมบัติของสภาพความต้านทานของฟิล์มโลหะอลูมิเนียมซิลิคอน ด้วยเงื่อนไขในการสปัตเตอร์โดยใช้กำลังงานในการ สปัตเตอร์ค่าต่างกัน 3 ค่า ที่ 100 W, 150 W และ 200 W โดยกำหนดค่าความดันคงที่ไว้ที่  $2 \times 10^{-3}$  บาร์ ระยะเวลาในการสปัตเตอร์เป็นเวลา 30 นาที การวัดสภาพความต้านทานตามเงื่อนไขของการสปัตเตอร์ดังกล่าวเห็นได้ว่าเมื่อกำลังงาน RF เพิ่มมากขึ้น จะทำให้ความต้านทานแผ่นเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้ก็เพราะว่า เมื่อกำลังงาน RF เพิ่มขึ้นจะทำให้ความร้อนบริเวณแผ่นเวเฟอร์เพิ่มขึ้นด้วยซึ่งเป็นผลให้เกิดการเรียงตัวของเม็ดเกณฑ์ภายในโลหะไม่ดีเท่าที่ควรเป็นผลทำให้สภาพความต้านทานแผ่นของโลหะเพิ่มขึ้น

ต่อมทำการศึกษการทำให้เกิดลวดลายของฟิล์มโลหะอลูมิเนียมซิลิคอน เริ่มจากการสร้างลวดลายโลหะลงบนฟิล์มอลูมิเนียมซิลิคอนด้วยกระบวนการ โฟโตลิโทกราฟี แล้วทำการกัดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] สุรศักดิ์ เนียมเจริญและคณะวิจัย. "การพัฒนาเทคโนโลยี กระบวนการสร้างวงจรรวมแบบ ซีมอส ระดับ 5 ไมครอน." รายงานความก้าวหน้าโครงการวิจัย พัฒนา และ วิศวกรรม สาขาเทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์, พฤษภาคม 2546.
- [2] Hong X. *Introduction to Semiconductor Manufacturing Technology*. New Jersey: Prentice Hall. 2001.
- [3] David J . Elliott. *Integrated Circuit Fabrication Technology*. United States : McGraw-Hill. 1989.
- [4] Peter V. Zant. *Microchip Fabrication*. Forth Edition. United States : McGraw - Hill. 2000.
- [5] Jaeger, C Richard . *Introduction to Microelectronic Fabrication*. New Jersey : Addison-Wesley, 1988.
- [6] Ting C. Y., Crowder B. L. "Electrical Properties of Al/Ti Contact Metallurgy for VLSI Application." *J. Electrochem. Soc* , November 1982. pp 2590-2594 .
- [7] Finetti M., Ostoja P., Solmi S., Soncini G. " Aluminum-Silicon Ohmic Contact on Shallow n<sup>+</sup>/p Junction." *Solid-State Electronics*, pp 255-262 ,March 1980.
- [8] Wasa K., Hayakawa Sh. " Handbook of Sputter Deposition technology : Principle, technology and Application." Noyes Publications, 1992.
- [9] William D., Spoul. " High Rate Reactive Sputtering Process Control " *Surface and Coating Technology*, pp. 73-81, 1987.
- [10] รังสรรค์ เมืองเหลือ, ทรงพล รอดทอง, โสภณ พรหมชัย, เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล. "การพัฒนากระบวนการโลหะสำหรับเทคโนโลยีวงจรรวมซีมอสระดับ 5 ไมครอน ในประเทศไทย." การประชุมวิชาการทางไฟฟ้า ครั้งที่ 26. หน้า 1371-1374, พฤศจิกายน 2546.
- [11] สมเกียรติ ศุภเดช. *เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : แผนกตำราคณะ วิศวกรรมศาสตร์. 2544.
- [12] ทรงพล รอดทอง, รังสรรค์ เมืองเหลือ, โสภณ พรหมชัย, เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล. "การพัฒนากระบวนการโลหะของรอยสัมผัสโหนดสำหรับเทคโนโลยีวงจรรวมซีมอสระดับ 5 ไมโครเมตร ในประเทศไทย." การประชุมวิชาการทางไฟฟ้า ครั้งที่ 27. ปีที่ 27 , หน้า 1330-1334 , พฤศจิกายน 2547.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] ทรงพล รอดทอง, รั้งสรรค์ เมืองเหลือ, โสภณ พรหมชัย, เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล.  
“กระบวนการ โลหะของรอยสัมผัสโอห์มมิก สำหรับเทคโนโลยีวงจรรวมซีมอสระดับ 5 ไมครเมตร ในประเทศไทย.” วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่21, ฉบับที่ 2, หน้า 37-42 , มิถุนายน 2547.
- [14] เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล. **อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ**. กรุงเทพฯ : แผนกตำราคณะวิศวกรรมศาสตร์. 2544.
- [15] S.M. SZE. **Semiconductor device physics and technology**. United States : John – Wiley & Sons. 1985.
- [16] Dieter K. Schroder. **Semiconductor material and device characterization**. United States : John - Wiley & Sons. 1998.
- [17] Runyan W.R. **Semiconductor integrated circuit processing technology**. Texas : Texas instruments. 1990.
- [18] Zhiping Z., Devin K., Eric V.” Optimization of Contact Interface Resistance for CMOS circuit” Georgia Institute of Technology, February, 2001.
- [19] Ramanik D.P., Saxena A.N.. “VLSI Metallization using Aluminium and its Alloys.” Solid State Technology, pp 131-137 , March 1983.
- [20] ชลิดา คุณาเรือง, วีระ เพ็งจันทร์, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, สมเกียรติ ศุภเดช. “กระบวนการ โฟโตลิโธกราฟีบนชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ สำหรับสร้างลวดลายวงจรรวม แบบเทคโนโลยี ซีมอส ขนาด 5 ไมครอน.” วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 21, ฉบับที่ 1, มีนาคม 2547
- [21] การุณ แจ่มออก, กิตติ เสนานูวรรณ์, สุวัฒน์ ไสภิตพันธ์, ภาวัน สยามชัย, อิทธิ ฤทธาภรณ์. “การพัฒนากระบวนการปลูกฟิล์มโลหะหลายชั้นด้วยเทคนิคสปีดเตอรริงสำหรับการสร้างวงจรรวม.”การประชุมวิชาการทางไฟฟ้า ครั้งที่ 26 , ปีที่ 26 , หน้า1391 – 1395, พฤศจิกายน 2546.
- [22] ชลิดา คุณาเรือง, เสกสรร ธิมากุล, วีระ เพ็งจันทร์, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, สมเกียรติ ศุภเดช. กระบวนการสร้างโฟโตมาสก์สำหรับวงจรรวมซีมอส ขนาด 5 ไมครอน.” การประชุมวิชาการทางไฟฟ้า ครั้งที่ 26. ปีที่ 26, หน้า 1365 -1370 , พฤศจิกายน 2546.
- [23] Rodthong S., Muanghuria R., Promchai S. and Phetchakul T.” The Metallization for 5  $\mu\text{m}$  Integrated Circuit Technology in Thailand.” Smart Materials, Chaing Mai, Thailand., December, 2004.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

ภาคผนวก ก ขั้นตอนของกระบวนการสร้างวงจรรวมแบบซีมอสระดับ 5 ไมโครเมตรในประเทศไทยซึ่งมีขั้นตอนทั้งหมด 126 ขั้นตอน

Process No.	Step name	Tool	Object	Technique	Process condition		
1	Wafer preparing						4-6 ohm,(100)n-Type 2inch Si
2	Naming			Numbering			Diamond pencil
3	Cleaning	Acid bench	Hydrophilic	Piranha	H2SO4,H2O2	120 C	5 min
4	Oxidation	Sinko MarkX : B	500 nm	Wet oxidation	Wet O2	1000 C	130 min
5	Resist coating	MIKASA	>1.5 $\mu$ m	Spin coater	MPS1818	RT	
6	Exposure	MA-10	01-Pwell	Contact aligner		RT	
7	Development	Photo bench		Dip	AZMP300	RT	45 s
8	Inspection	NIKON		Inspector			
9	Oxidation etching	Acid bench	Hydrophobic		BHF	RT	
10	Cleaning	Acid bench	Hydrophilic	Piranha	H2SO4,H2O2	120 C	5 min
11	Oxidation	Sinko MarkX : B	50 nm	Dry oxidation	O2	1000 C	57 min
12	Ion implantation	Varian350D	P well		B+		
13	Ashing	PS RIE600W		RIE	O2	RT	5min
14	Cleaning	Acid bench	Hydrophilic	Piranha	H2SO4,H2O2	120 C	5 min
15	Annealing	Sinko MarkX : C		Anneal	N2	1000 C	420 min

16	Oxidation	Sinko MarkX : B	500 nm	Wet oxidation	Wet O2	1000 C	130 min
17	Oxidation etching	Acid bench	Hydrophobic		BHF	RT	
18	Cleaning	Acid bench	Hydrophilic	Piranha	H2SO4,H2O2	120 C	5 min
19	Oxidation	Sinko MarkX : A	50 nm	Dry oxidation	O2	1000 C	57 min( X<+- 10%)
20	Si3N4 CVD	SVG 2403 TMX	100 nm		SiH2C12,NH3	725 C	57 min( X<100nm+- 10%)
21	Resist coating	MIKASA	>1.5 µm	Spin coater	MPS1818	RT	
22	Exposure	MA-10	02-Nch Locos	Contact aligner		RT	
23	Development	Photo bench		Dip	MPdevc,H2O	RT	45 s
24	Inspection	NIKON		Inspector			
25	Si3N4 etching	PS RIE 600W		RIE	CHF3,O2	RT	Stop etching in SiO2 layer
26	Ion implantation	Varian 350D	Nch stop		B+		E=40keV, D=2e13cm-2
27	Ashing	PS RIE600W		RIE	O2	RT	5min
28	Cleaning	Acid bench	Hydrophilic	Piranha	H2SO4,H2O2	120 C	5 min
29	Resist coating	MIKASA	>1.5 µm	Spin coater	MPS1818	RT	
30	Exposure	MA-10	03-Pch LOCOS	Contact aligner		RT	
31	Development	Photo bench		Dip	MPdevc,H2O	RT	45 s
32	Inspection	NIKON		Inspector			
33	Si3N4 etching	PS RIE 600W		RIE	CHF3,O2	RT	Stop etching in SiO2 layer
34	Ion implantation	Varian 350D	Nch stop		P+		E=40keV, D=2e13cm-2
35	Ashing	PS RIE600W		RIE	O2	RT	5min

36	Cleaning	Acid bench	Hydrophilic	Piranha	H2SO4,H2O2	120 C	5 min
37	Annealing	Sinko MarkX : C		Anneal	N2	1000 C	15 min
38	LOCOS Oxidation	Sinko MarkX : B	850 nm	Wet oxidation	Wet O2	1000 C	285 min
39	Oxidation etching	Acid bench		Wet etching	BHF	RT	40s, Time control
40	Si3N4 etching	Acid bench		Wet etching	H3PO4	160 C	50min, With water cooling
41	Inspection	NIKON		Inspector			
42	Oxide etching	Acid bench	Hydrophobic		BHF	RT	1min, control
43	Cleaning	Acid bench	Hydrophilic	Piranha	H2SO4,H2O2	120 C	5 min
44	Oxidation	Sinko MarkX : A	35 nm	Dry oxidation	O2	1000 C	25 min
45	Oxidation etching	Acid bench	Hydrophobic		BHF	RT	45 s
46	Oxidation	Sinko MarkX : A	50 nm	Dry oxidation	O2	1000 C	57 min
47	Poly Si CVD	SVG2403TMX	450nm	LP-CVD	SiH4	620 C	43min
48	P dope	MIKASA	Nm	Spin coating	OCD		Rpm ,s
49	Pre bake 1	Oven			Air	140 C	10 min
50	Pre bake 2	Oven			Air	500 C	30 min
51	Annealing	Sinko MarkX : G		Anneal	N2	1000 C	15 min
52	Oxide etching	Acid bench		Wet etching	BHF	RT	
53	Resist coating	MIKASA	>1.5 $\mu$ m	Spin coater	MPS1818	RT	
54	Exposure	MA-10	04-Gate poly Si	Contact aligner		RT	
55	Development	Photo bench		Dip	MPdevc,H2O	RT	1 min

56	Inspection	NIKON		Inspector			
57	Poly Si etching	PS RIE600W	Gate poly si	RIE	SF6,O2	RT	5min
58	Ashing	PS RIE600W		RIE	O2	RT	5min
59	Cleaning P	Acid bench	Hydrophilic	Piranha	H2SO4,H2O2	120 C	5 min
60	Resist coating	MIKASA	>1.5 µm	Spin coater	MPS1818	RT	
61	Baking	Oven				120 C	30min
62	Back side etching	PS RIE600W	Back side etch	RIE	SF6,O2	RT	
63	Cleaning	Acid bench	Hydrophilic	Piranha	H2SO4,H2O2	120 C	5 min
64	Oxidation	Sinko MarkX : B	70 nm	Wet oxidation	Wet O2	900 C	30 min, poly Si oxide
65	Resist coating	MIKASA	>1.5 µm	Spin coater	MPS1818	RT	
66	Exposure	MA-10	05-NSD	Contact aligner		RT	
67	Development	Photo bench		Dip	MPdevc,H2O	RT	1 min
68	Inspection	NIKON		Inspector			
69	Ion implantation	Varian 350D	NSD		P+		E=40keV, D=2e13cm-2
70	Ashing	PS RIE600W		RIE	O2	RT	10min
71	Cleaning	Acid bench	Hydrophilic	Piranha	H2SO4,H2O2	120 C	5 min
72	Resist coating	MIKASA	>1.5 µm	Spin coater	MPS1818	RT	
73	Exposure	MA-10	PSD	Contact aligner		RT	
74	Development	Photo bench		Dip	MPdevc,H2O	RT	1 min
75	Inspection	NIKON		Inspector			

76	Ion implantation	Varian 350D	06-PSD		B+		E=40keV, D=2e13cm-2
77	Ashing	PS RIE600W		RIE	O2	RT	10min
78	Cleaning	Acid bench	Hydrophilic	Piranha	H2SO4,H2O2	120 C	5 min
79	Oxide CVD	SVG2403TMX	100nm	LP-CVD	SiH4,O2	440 C	42min
80	PSG CVD	SVG2403TMX	400nm	LP-CVD	SiH4,O2,PH3	440 C	Depo rate, BHF rate,FPH3 vs
81	Annealing	Sinko MarkX : C		Anneal	N2	900 C	30 min
82	Resist coating	MIKASA	>1.5 $\mu$ m	Spin coater	MPS1818	RT	
83	Exposure	MA-10	07-Contact hole	Contact aligner		RT	
84	Development	Photo bench		Dip	MPdevc,H2O	RT	1 min
85	Inspection	NIKON		Inspector			
86	Oxide etching	Acid bench	Hydrophobic	Dip	BHF	RT	Contact hole
87	Cleaning	Acid bench	Hydrophilic	Piranha	H2SO4,H2O2	120 C	5 min
88	Al sputtering	ANEL VASPF210A	500nm		Ar	RT	Pre sputtering 5 min
89	Resist coating	MIKASA	>1.5 $\mu$ m	Spin coater	MPS1818	RT	
90	Exposure	MA-10	08-ML1	Contact aligner		RT	
91	Development	Photo bench		Dip	MPdevc,H2O	RT	1 min
92	Inspection	NIKON		Inspector			
93	Wet etching	Acid bench		Wet etching	H3PO4	RT	20% over etching
94	Si nodule etching	PS RIE600W		RIE	SF6,O2	RT	1min
95	Ashing	PS RIE600W		RIE	O2	RT	10min

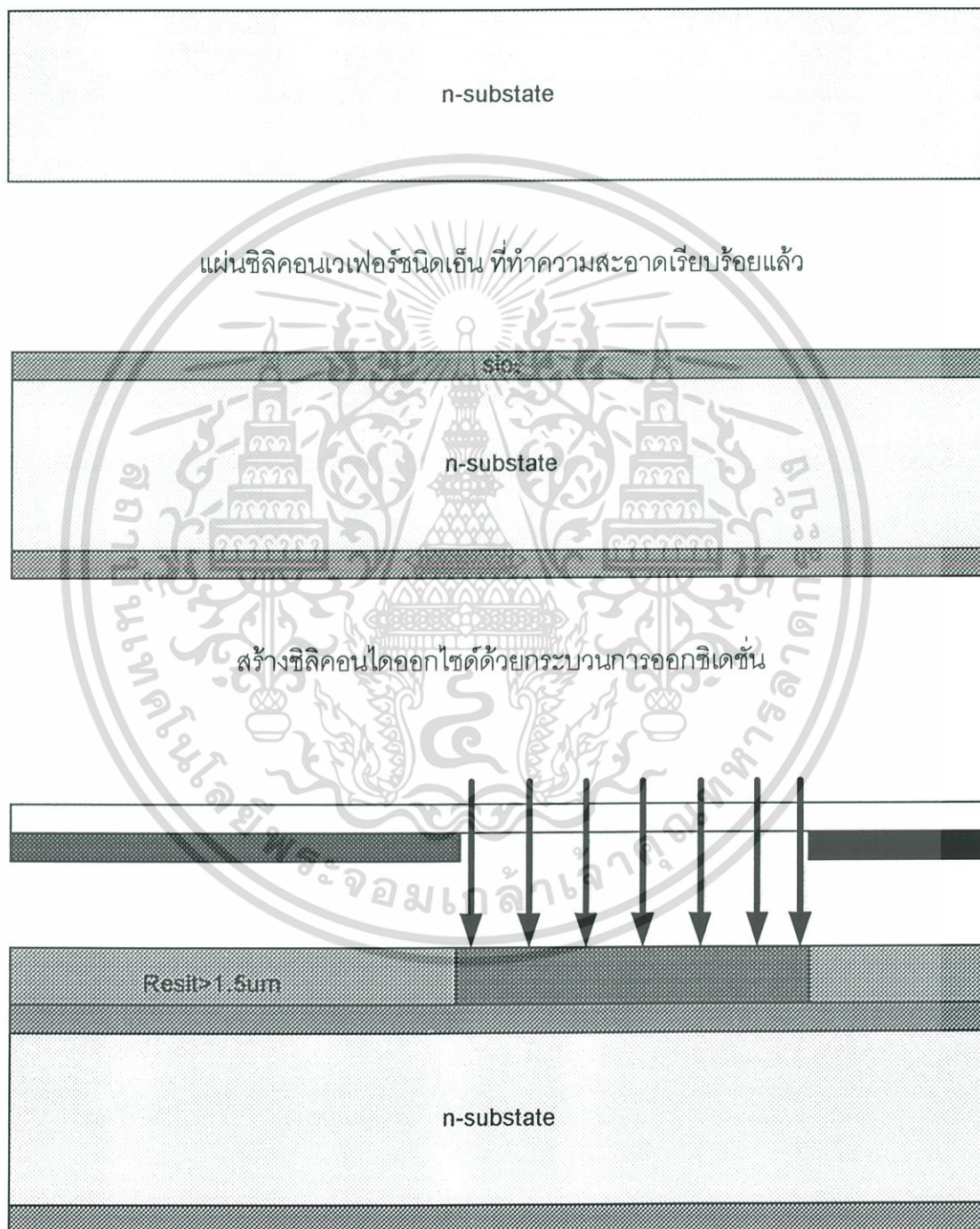
96	cleaning	Wet bench		Wet cleaning	S1165	70 C	
97	Oxide PECVD	PECVD	500nm				400C
98	Resist coating	MIKASA	>1.5 $\mu$ m	Spin coater	MPS1818	RT	
99	Exposure	MA-10	09-Via hole	Contact aligner		RT	
100	Development	Photo bench		Dip	MPdevc,H2O	RT	1 min
101	Inspection	NIKON		Inspector			
102	Oxide etching	PS RIE600W		RIE	CHFS,O2	RT	20% over etching
103	Ashing	PS RIE600W		RIE	O2	RT	10min
104	cleaning	Wet bench		Wet cleaning	S1165	70 C	
105	Pre etching	PS RIE600W	50 nm	RIE	Ar	RT	
106	Al sputtering	ANEL VASPF210A	500nm		Ar	RT	Pre sputtering 5 min
107	Resist coating	MIKASA	>1.5 $\mu$ m	Spin coater	MPS1818	RT	
108	Exposure	MA-10	08-ML1	Contact aligner		RT	
109	Development	Photo bench		Dip	MPdevc,H2O	RT	1 min
110	Inspection	NIKON		Inspector			
111	Wet etching	Acid bench		Wet etching	H3PO4	RT	20% over etching
112	Si nodule etching	PS RIE600W		RIE	SF6,O2	RT	1min
113	Ashing	PS RIE600W		RIE	O2	RT	10min
114	cleaning	Wet bench		Wet cleaning	S1165	70 C	
115	Oxide PECVD	PECVD	500nm				400C

116	Resist coating	MIKASA	>1.5 $\mu\text{m}$	Spin coater	MPS1818	RT	
117	Exposure	MA-10	09-Via hole	Contact aligner		RT	
118	Development	Photo bench		Dip	MPdevc,H2O	RT	1 min
119	Inspection	NIKON		Inspector			
120	Oxide etching	PS RIE600W		RIE	CHFS,O2	RT	20% over etching
121	Ashing	PS RIE600W		RIE	O2	RT	10min
122	cleaning	Wet bench		Wet cleaning	S1165	70 C	
123	H2 anneal	Sinko MarkX : D			H2/N2	400 C	30 min
124	Resist coating	MIKASA	>1.5 $\mu\text{m}$	Spin coater	MPS1818	RT	
125	Oxide etching	Acid bench	Hydrophobic	Dip	BHF	RT	20% over etching
126	cleaning	Wet bench		Wet cleaning	S1165	70 C	5 min + 5 min + rinse

\* พื้นที่แรเงาของตารางเป็นกระบวนการ METELLIZATION

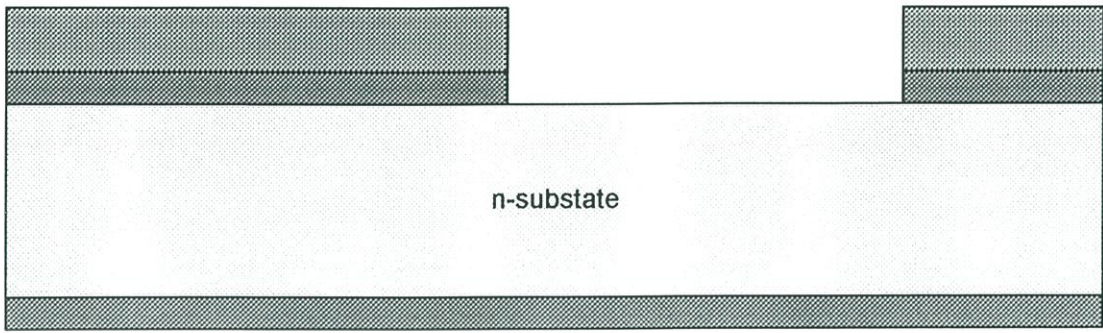
## ภาคผนวก ข

ภาคผนวก ข เป็นกระบวนการสร้างวงจรรวมซีมอสระดับ 5 ไมโครเมตร ที่มีขั้นตอนในการสร้าง 144 ขั้นตอน เพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจจึงแสดงแผนภาพเป็นภาพตัดขวางอย่างง่ายซึ่งมีลักษณะของกระบวนการสร้างวงจรรวมเหมือนภาคผนวก ก ดังต่อไปนี้

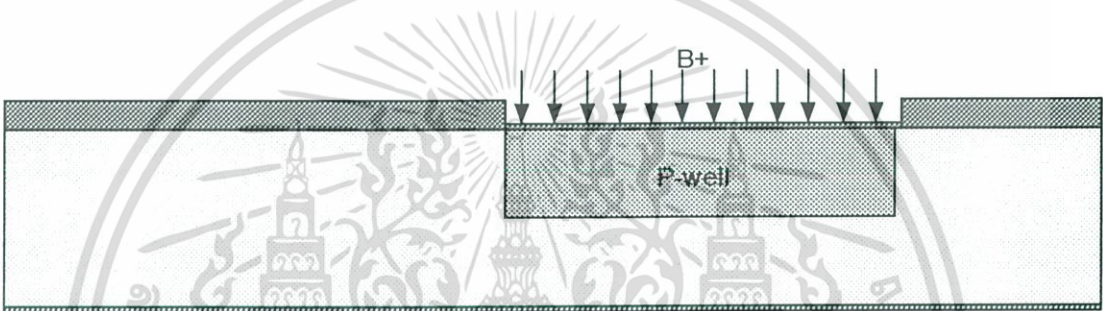


กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี ครั้งที่ 1 เพื่อสร้างลวดลายของ mask 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวน **รูปที่ ข** ภาพตัดขวางของกระบวนการสร้างวงจรรวม CMOS ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



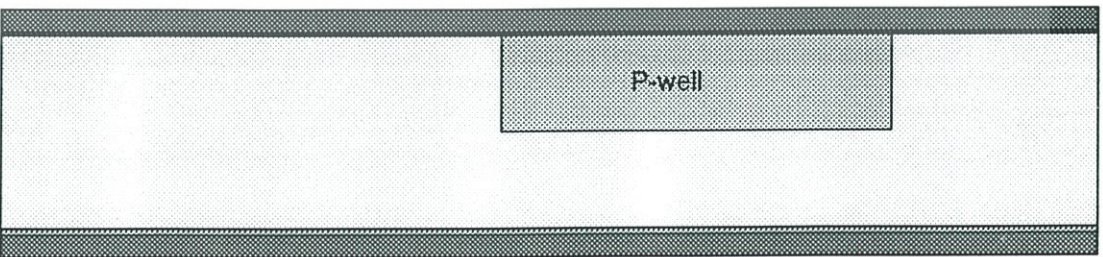
กัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อเปิดชั้น ออกไซด์



แพร่สารเจือโบรอน และทำการขี้บลึก เพื่อสร้างบ่อแยกชนิดพี



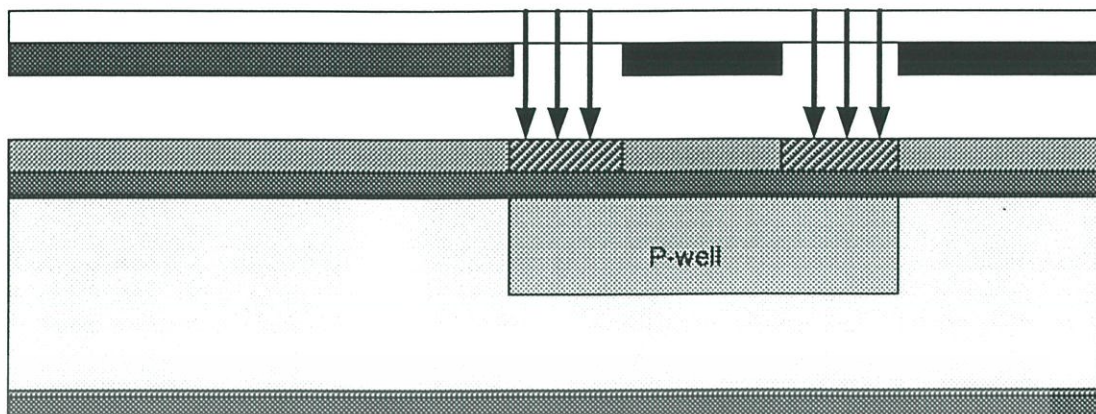
สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ หนา 50nm



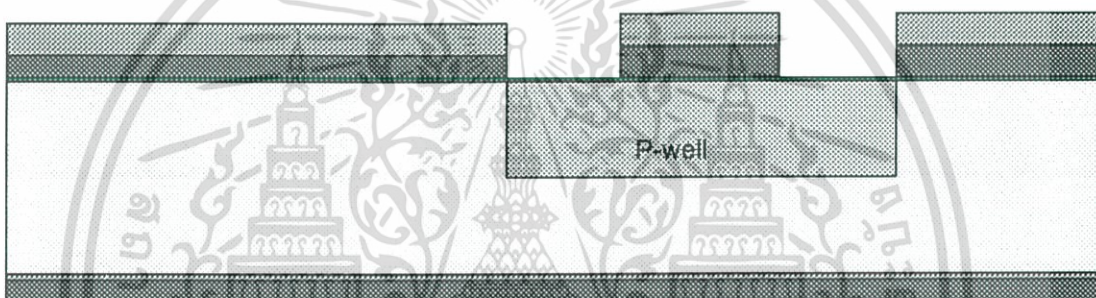
สร้างชั้นซิลิคอนไนไตรด์ หนาประมาณ 100nm

**รูปที่ ๗** ภาพตัดขวางของกระบวนการสร้างวงจรรวม CMOS (ต่อ)

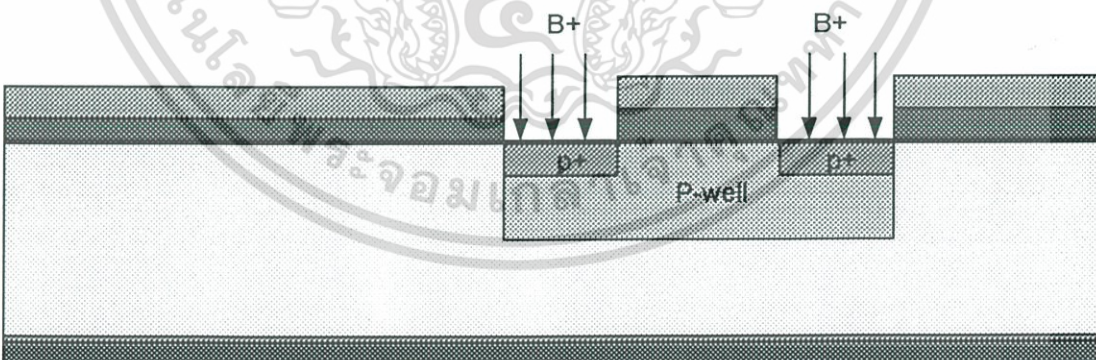
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เอาต์เห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี ครั้งที่ 2



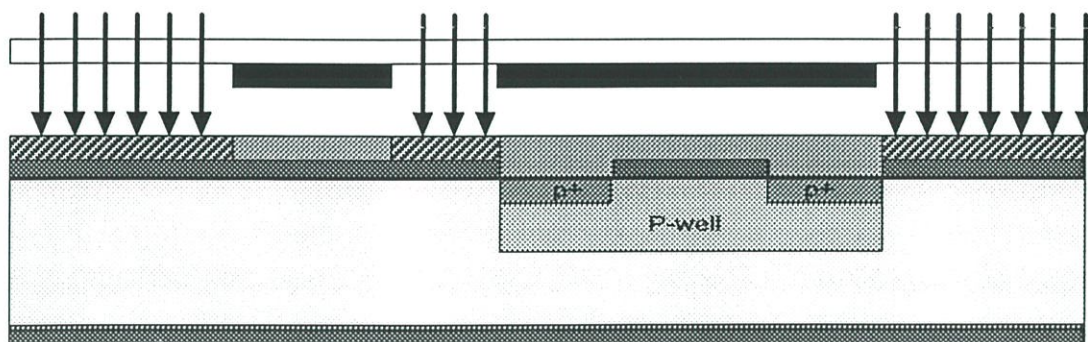
กัดชั้นซิลิคอนในไตรด์ เพื่อเปิดช่อง



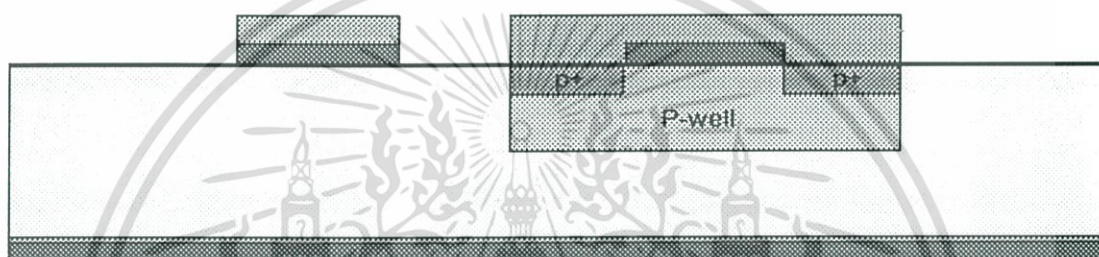
แพร่สารเจือโบรอนสร้าง Nch stop

รูปที่ ข ภาพตัดขวางของกระบวนการสร้างวงจรรวม CMOS (ต่อ)

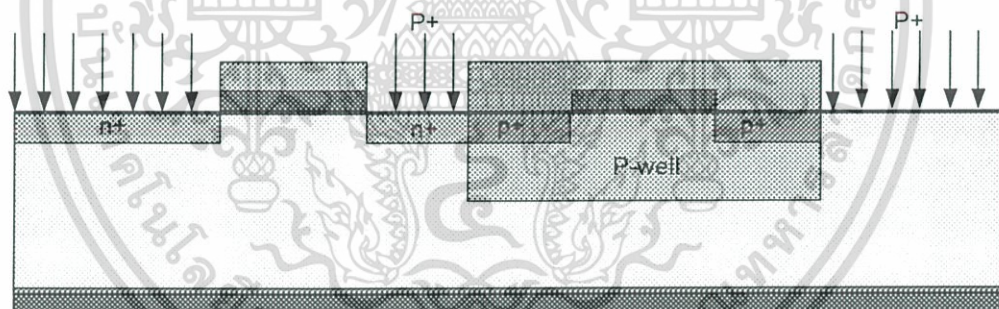
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



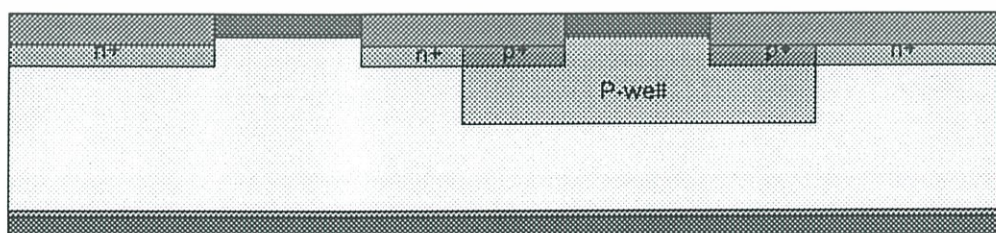
กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี ครั้งที่ 3



กัดชั้นซิลิคอนไนไตรด์ออก



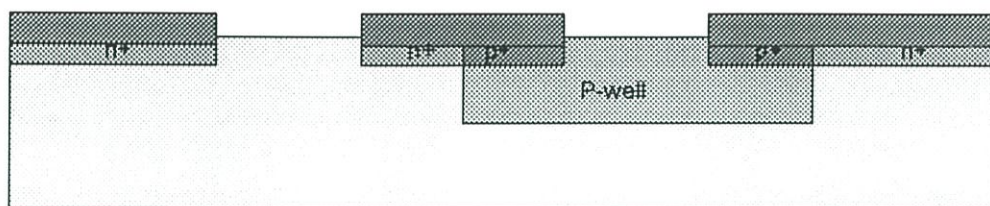
แพร์สารเจือฟอสฟอรัส สร้าง Pch stop



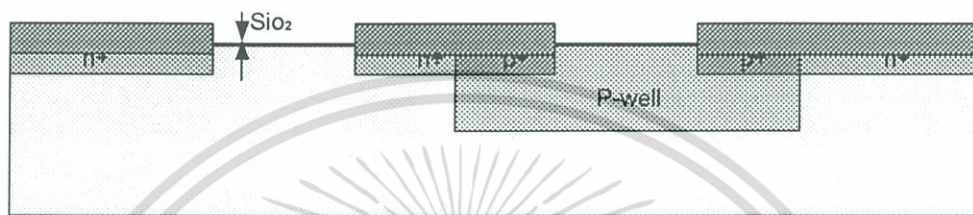
สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

รูปที่ ข ภาพตัดขวางของกระบวนการสร้างวงจรรวม CMOS (ต่อ)

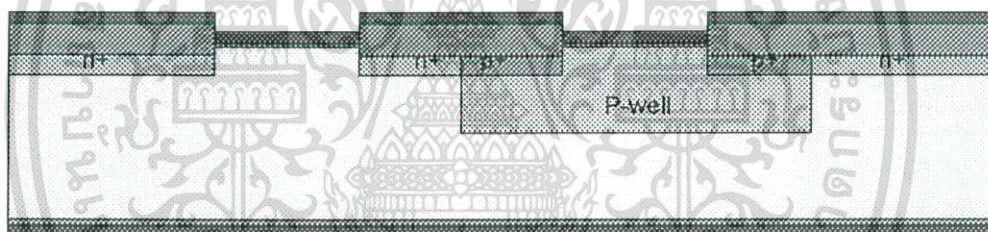
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



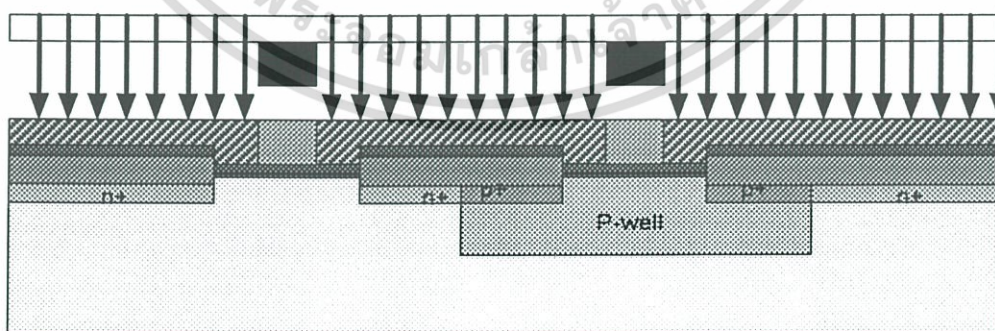
กัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และกัดชั้นซิลิคอนไนไตรด์ออกทั้งหมด



สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ หนาประมาณ 50nm



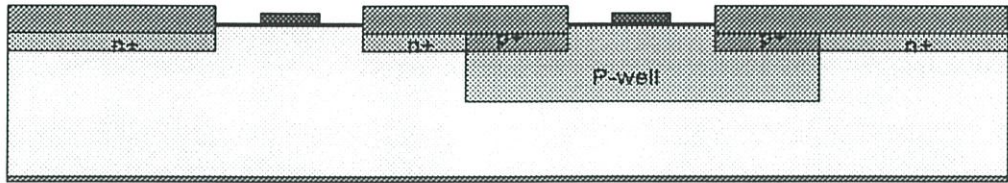
สร้างชั้นฟิล์มซิลิคอน หนา 450nm



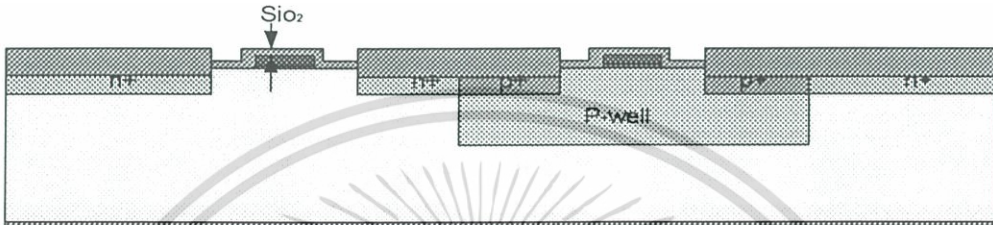
กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีครั้งที่ 4

รูปที่ ข ภาพตัดขวางของกระบวนการสร้างวงจรรวม CMOS (ต่อ)

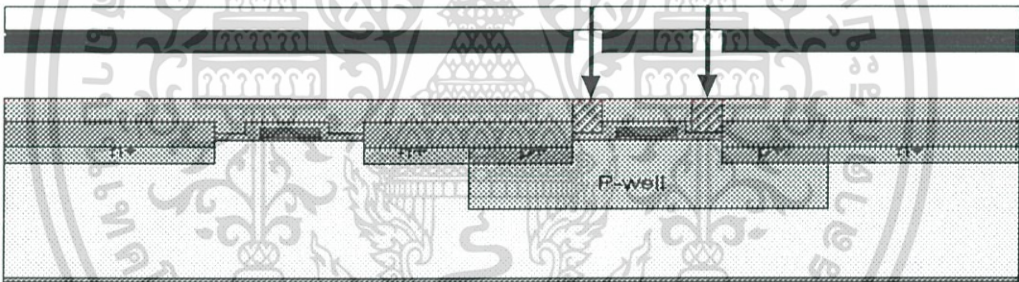
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



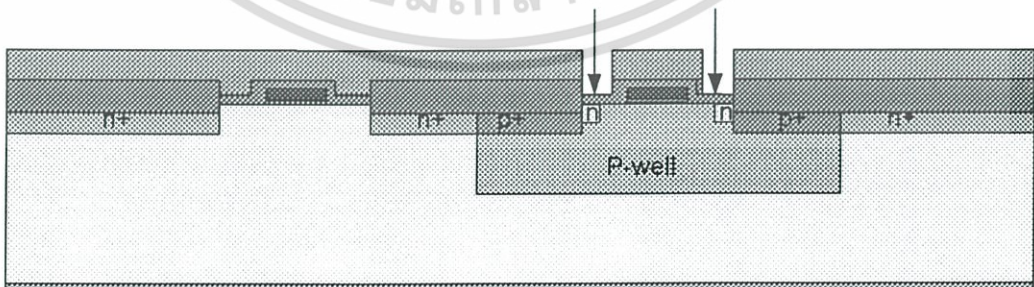
กัดชั้นโพลีซิลิคอนลอกน้ำยาไวแสงออกทำความสะอาด



สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หนา 70nm



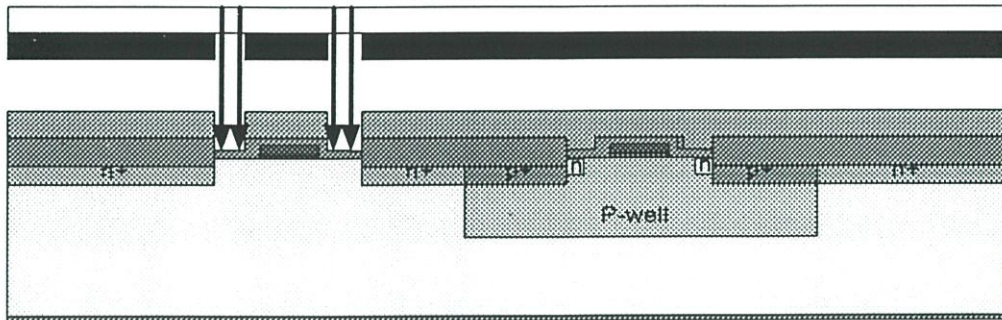
กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีครั้งที่ 5



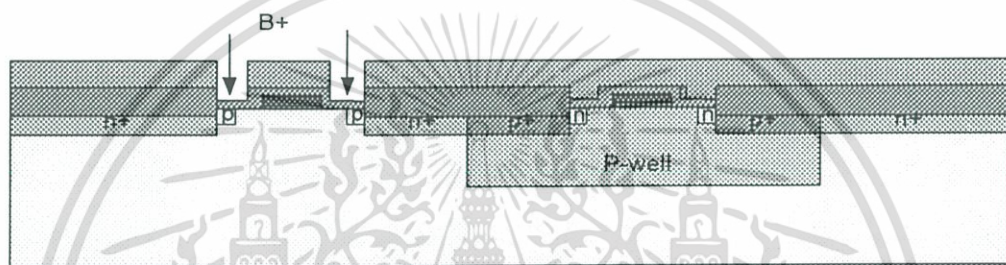
แพร่สารเจือฟอสฟอรัส สร้าง NSD

รูปที่ ข ภาพตัดขวางของกระบวนการสร้างวงจรรวม CMOS (ต่อ)

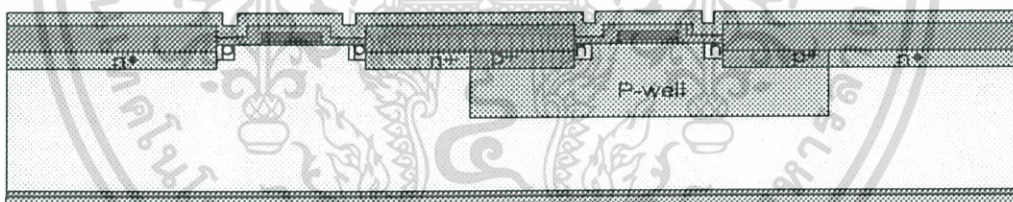
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



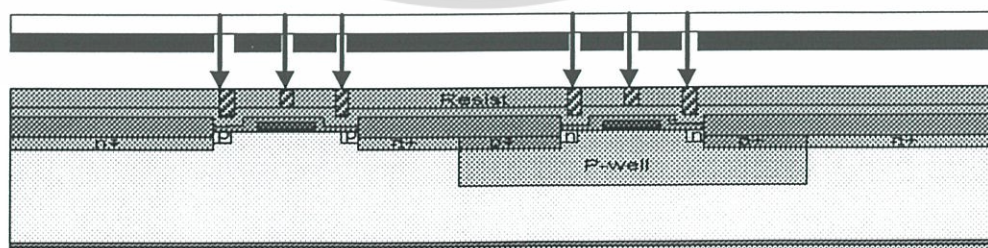
กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีครั้งที่ 6



แพร่สารเจือโบรอน สร้างชั้น PSD



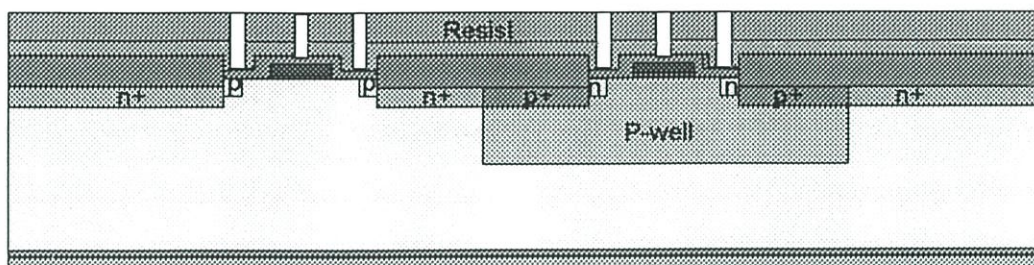
สร้างชั้น ฟอสฟอรัสซิลิเกตกลาส หนา 500 nm



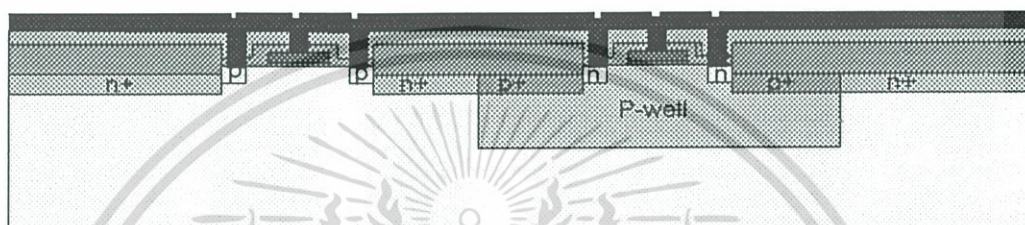
กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีครั้งที่ 7

รูปที่ ข ภาพตัดขวางของกระบวนการสร้างวงจรรวม CMOS (ต่อ)

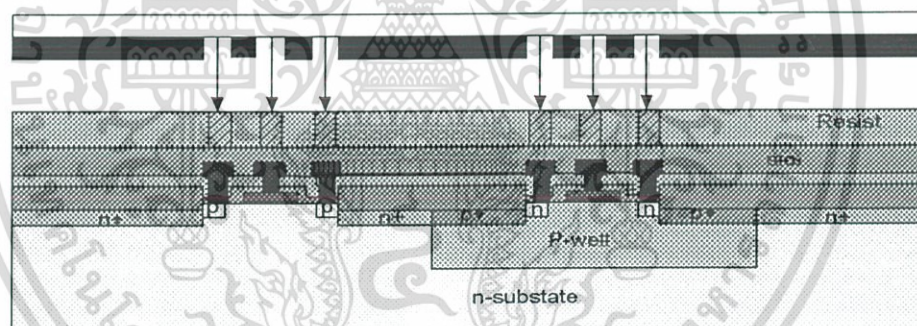
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



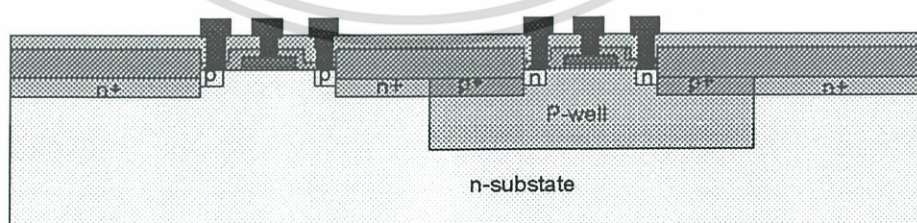
กัดชั้น PSG และชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เพื่อเปิดช่อง



สร้างชั้นอลูมิเนียมหนา 500nm

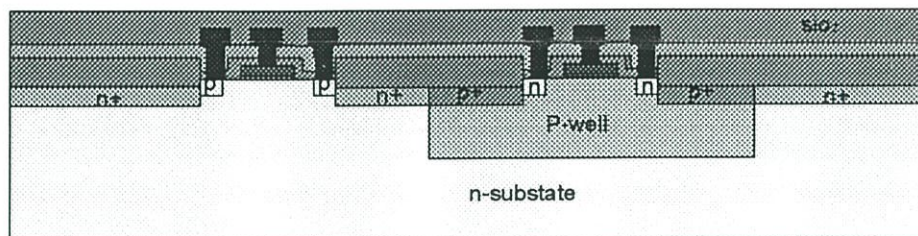


กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีครั้งที่ 8

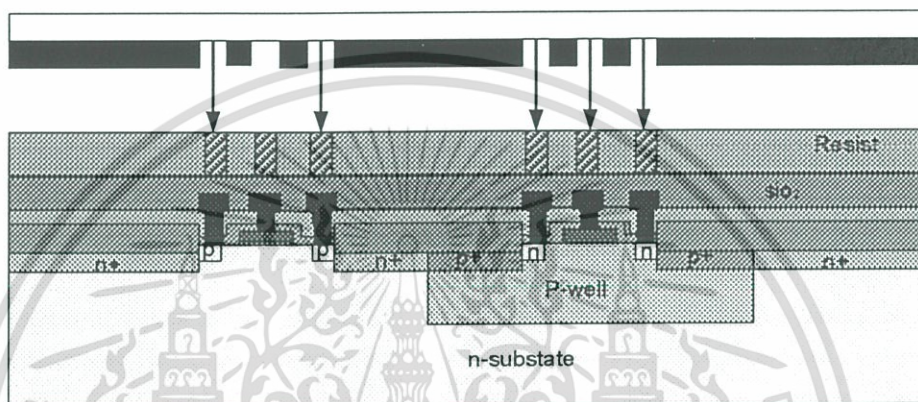


กัดชั้นอลูมิเนียมซิลิคอน เพื่อสร้างเป็นขั้วโลหะ เดรณ เกทและซอส  
รูปที่ ข ภาพตัดขวางของกระบวนการสร้างวงจรรวม CMOS (ต่อ)

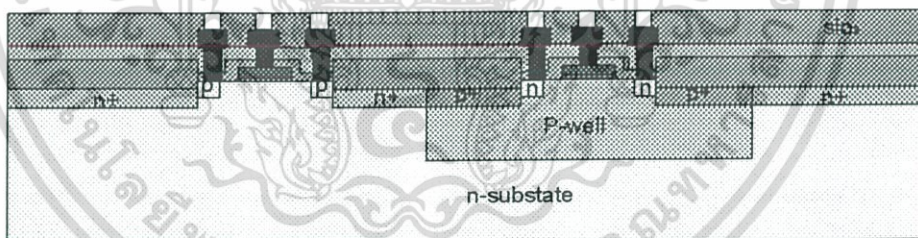
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



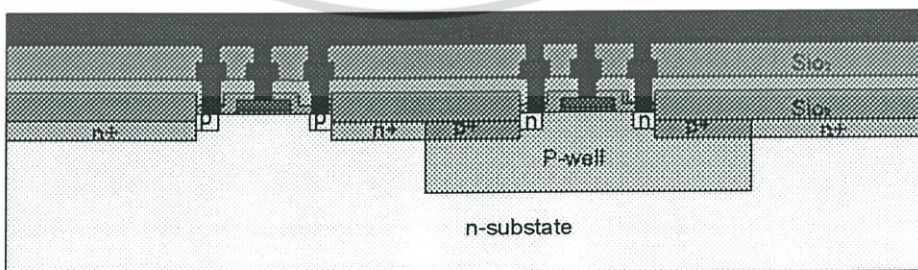
สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ด้วยวิธี PECVD



กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีครั้งที่ 9



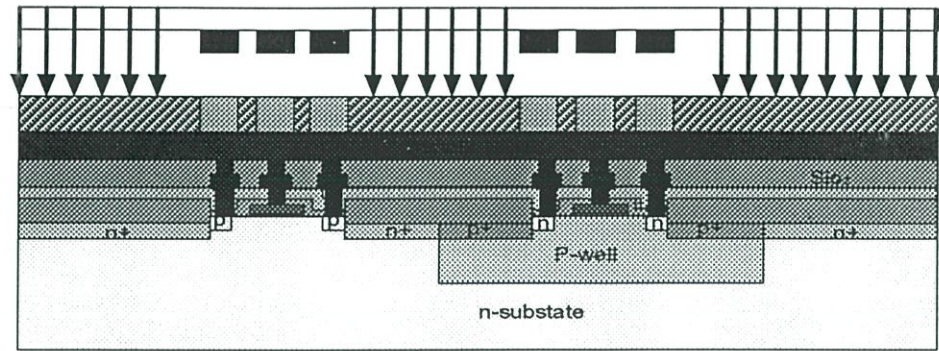
กัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อเปิดช่อง



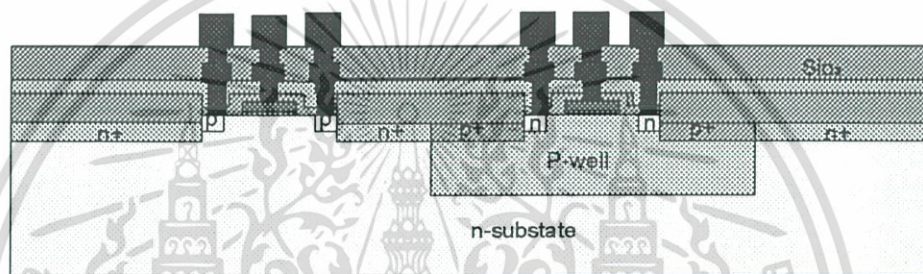
สร้างชั้นอลูมิเนียมหนา 500nm

รูปที่ ข ภาพตัดขวางของกระบวนการสร้างวงจรรวม CMOS (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กระบวนการโฟโตลิโทกราฟฟีครั้งที่ 10



กักชั้นฟิล์มโลหะชั้นที่ 2 สร้างเป็นขั้วโลหะชั้นที่ 2  
รูปที่ ข ภาพตัดขวางของกระบวนการสร้างวงจรรวม CMOS (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

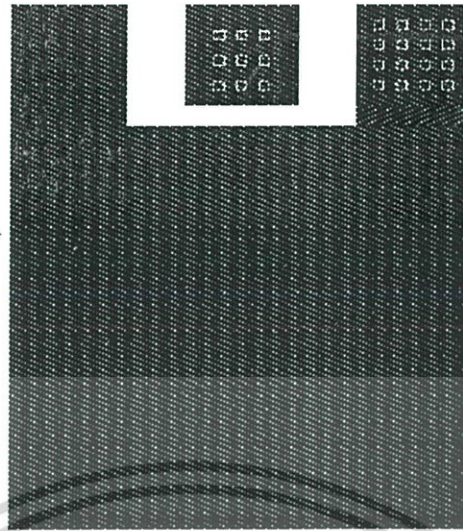
ภาคผนวก ค แสดงรายละเอียดและลวดลายของโฟโตแมสก์ในของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี ที่ใช้ในการสร้าง contact chain และตัวเก็บประจุ



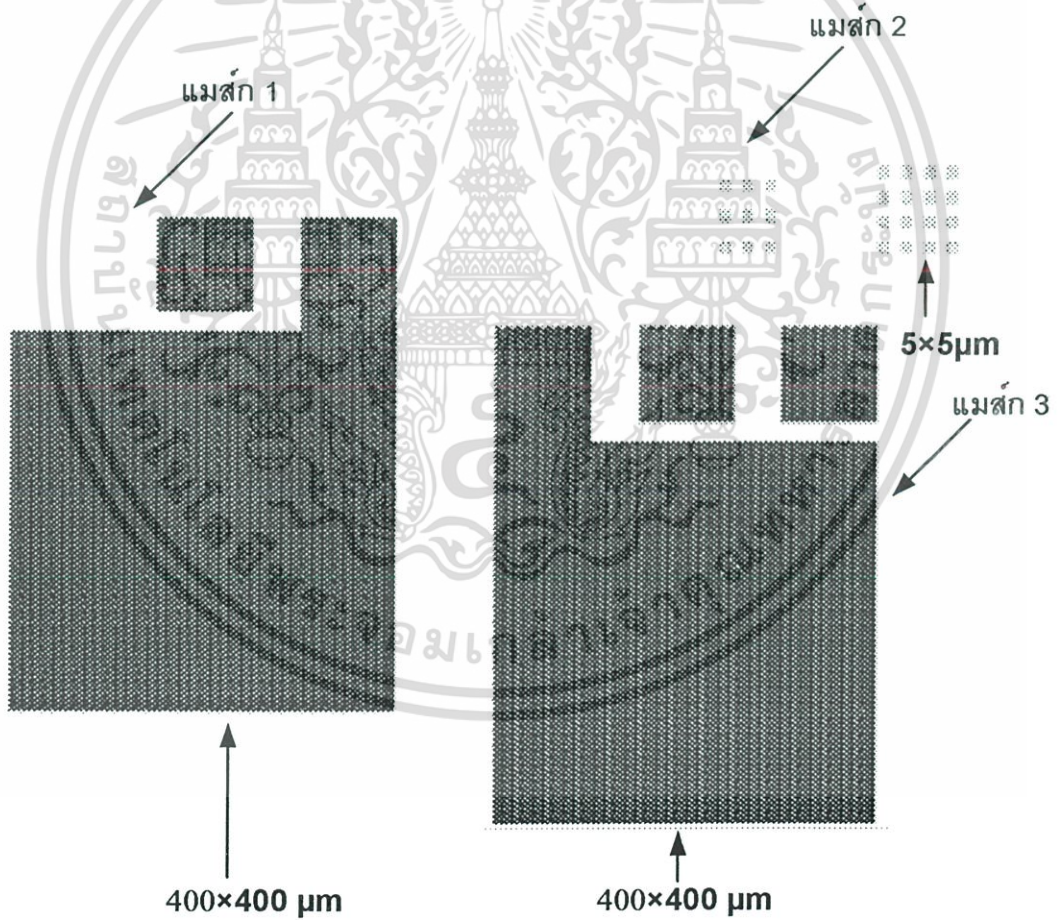
รูปที่ ค.1 ภาพด้านของแมสก์ทั้งหมดที่ใช้ทำตัวเก็บประจุระหว่าง  $n^+$  หรือ  $p^+$  กับโลหะชั้นที่ 1

รูปที่ ค.2 ภาพของแมสก์ใช้สร้างตัวเก็บประจุมีทั้งหมด 3 แมสก์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

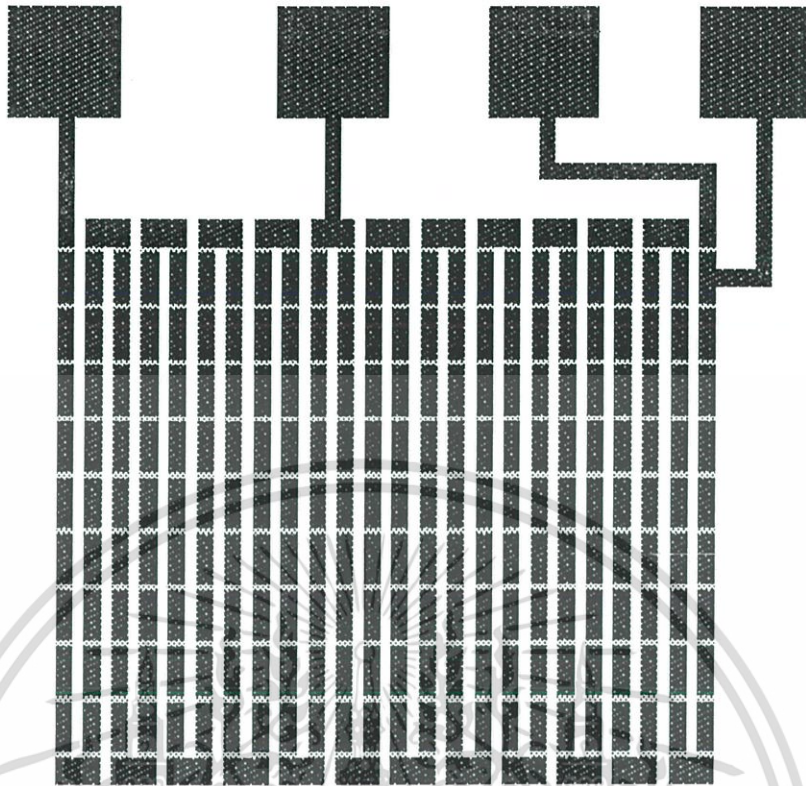


รูปที่ ค.3 ภาพด้านของแมสก์ทั้งหมดที่ใช้ทำตัวเก็บประจุระหว่าง โลหะชั้นที่1 กับโลหะชั้นที่2

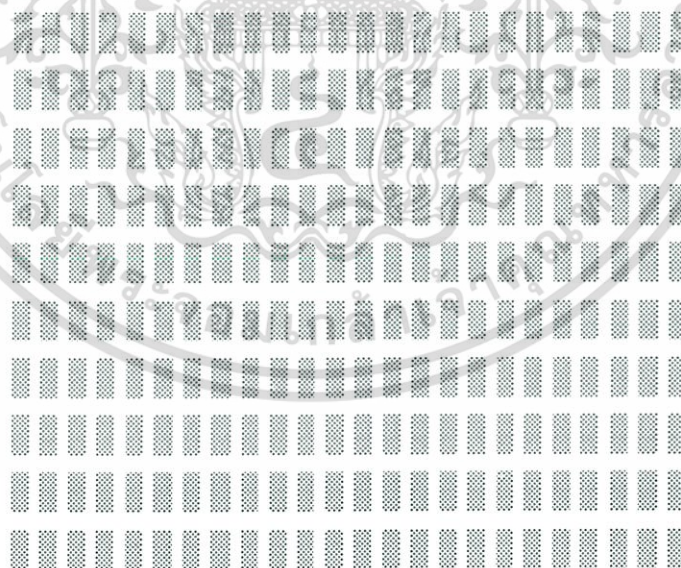


รูปที่ ค.4 ภาพของแมสก์ใช้สร้างตัวเก็บประจุทั้งหมด 3แมสก์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

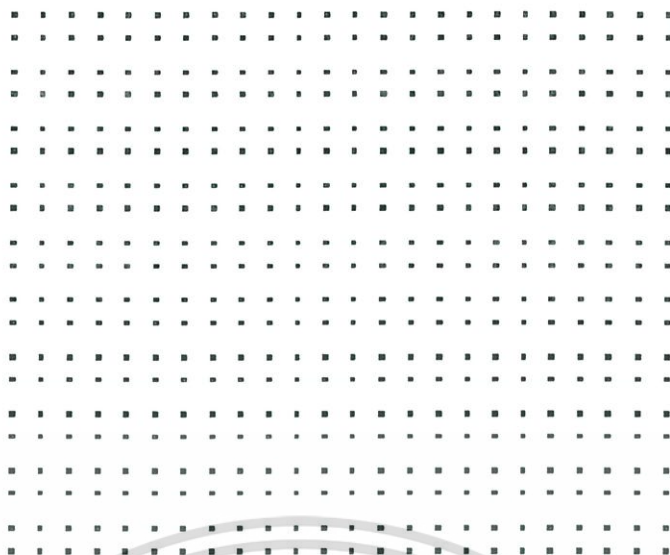


รูปที่ ค.5 ภาพรวมด้านบนของแมสก์ contact chain ทั้งหมดระหว่างชั้น  $p^+$ /Al

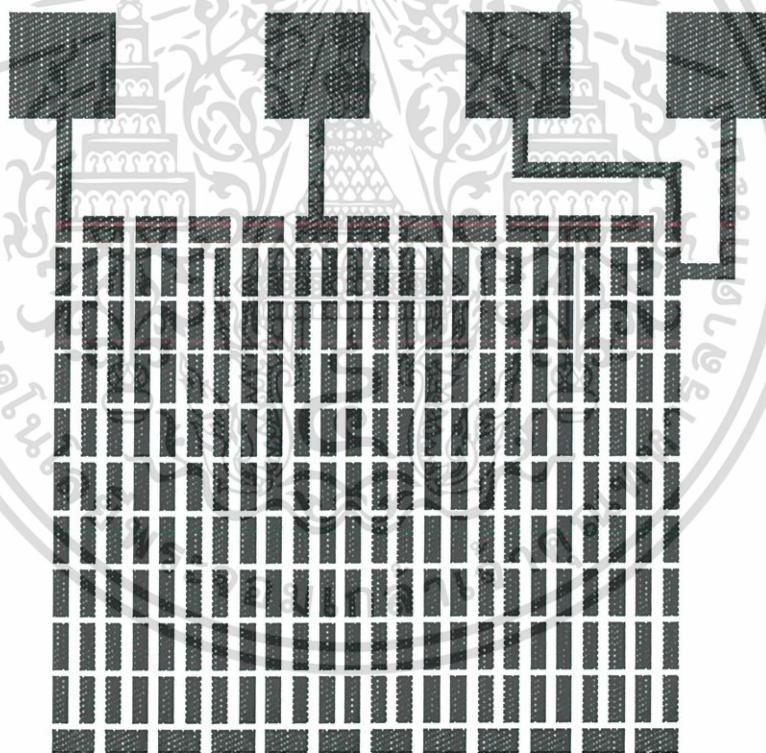


รูปที่ ค.6 แมสก์ที่ 1 (แมสก์ได้ป) ของ contact chain มีขนาดพื้นที่ต่อช่อง  $15 \times 35 \mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

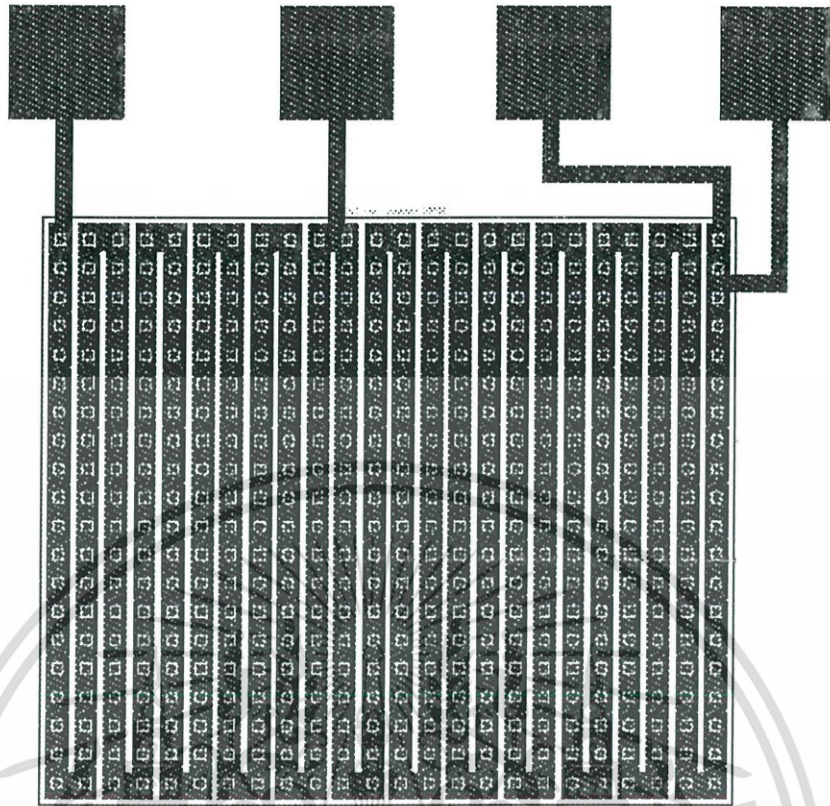


รูปที่ ค.7 แมสก์ที่ 2( แมสก์ contact ) ของ contact chain มีขนาดพื้นที่ต่อช่อง  $5 \times 5 \mu\text{m}$

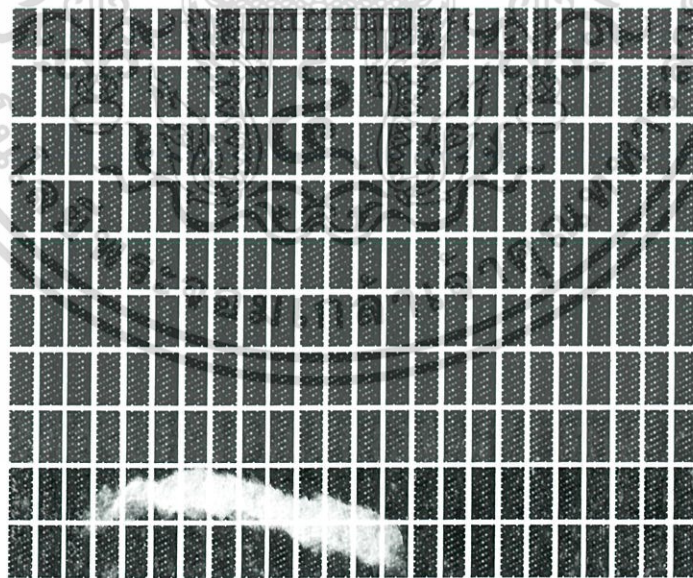


รูปที่ ค.8 แมสก์ที่ 3( แมสก์ metal ) ของ contact chain มีขนาดพื้นที่ต่อช่อง  $15 \times 35 \mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

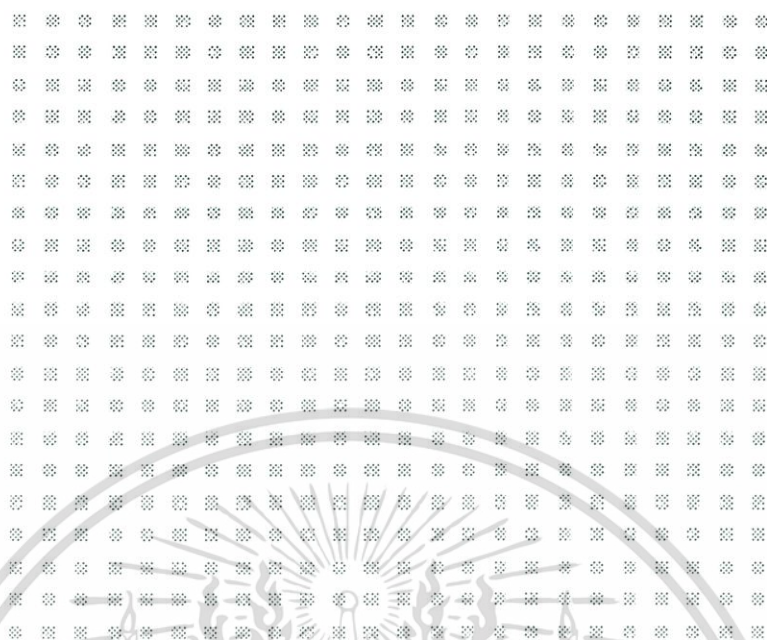


รูปที่ ค.9 ภาพด้านบนของแมสก์ contact chain ทั้งหมดระหว่างชั้น m1/m2

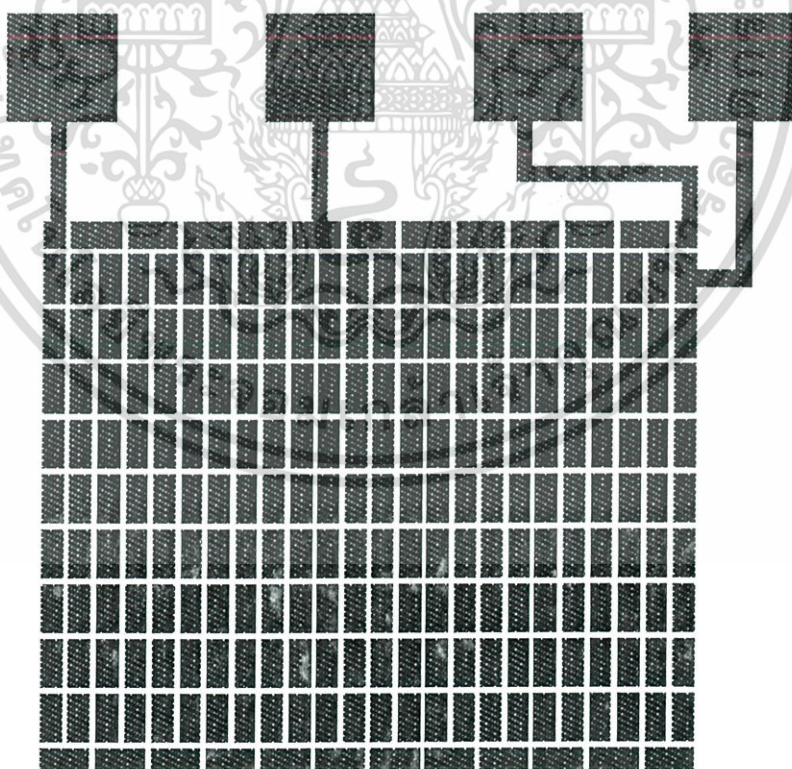


รูปที่ ค.10 แมสก์ที่ 1 (แมสก์ metal 1) ของ contact chain มีขนาดพื้นที่ต่อช่อง  $15 \times 35 \mu$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.11 แมสก์ที่ 2( แมสก์ via ) ของ contact chain มีขนาดพื้นที่ต่อช่อง  $5 \times 5 \mu\text{m}$



รูปที่ ค.12 แมสก์ที่ 3( แมสก์ metal2 ) ของ contact chain มีขนาดพื้นที่ต่อช่อง  $15 \times 35 \mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นาย ทรงพล รอดทอง  
 วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 2 กุมภาพันธ์ 2516 ที่อุตรดิตถ์  
 ประวัติการศึกษา 2537 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทคนิคตาก  
 2541 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ความชำนาญเฉพาะด้าน 1.) วงจรอิเล็กทรอนิกส์  
 2.) PCB layout  
 3.) กระบวนการโลหะสำหรับวงจรรวม

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] ทรงพล รอดทอง, รังสรรค์ เมืองเหลือ, ไสภณ พรหมชัย, เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล. "กระบวนการโลหะของรอยสัมผัสโหนดมิกสำหรับเทคโนโลยีวงจรรวมซีมอสระดับ 5 ไมครอนเมตร ในประเทศไทย." วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 21, ฉบับที่ 2, มิถุนายน 2547. หน้า 37-42
- [2] รังสรรค์ เมืองเหลือ, ทรงพล รอดทอง, ไสภณ พรหมชัย, เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล. "การพัฒนากระบวนการโลหะสำหรับเทคโนโลยีวงจรรวมซีมอสระดับ 5 ไมครอน ในประเทศไทย." การประชุมวิชาการทางไฟฟ้า ครั้งที่ 26. ปีที่ 26, พฤศจิกายน 2546. หน้า 1371-1374
- [3] ทรงพล รอดทอง, รังสรรค์ เมืองเหลือ, ไสภณ พรหมชัย, เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล. "การพัฒนากระบวนการโลหะของรอยสัมผัสโหนดมิกสำหรับเทคโนโลยีวงจรรวมซีมอสระดับ 5 ไมครอนเมตร ในประเทศไทย." การประชุมวิชาการทางไฟฟ้า ครั้งที่ 27. ปีที่ 27, พฤศจิกายน 2547. หน้า 1330-1334
- [4] Rodthong S., Muanghiua R., Promchai S. and Phetchakul T." The Metallization for 5  $\mu\text{m}$  Integrated Circuit Technology in Thailand." Smart Materials, Chaing Mai, Thailand., December, 2004.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้