

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ผลงานการวิจัย

เรื่อง

การพัฒนาไมโครเทอร์โมคัปเปิลแบบฟิล์มบางโลหะ

Development of thin-film metal microthermocouple



RCH
TK
7871.15
.F5
ร314ก
เลขที่.....
เลขทะเบียน..... 80752
วัน,เดือน,ปี..... 21 พ.ค. 2551

ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก
สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง

11918196

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้เสร็จอย่างสมบูรณ์ได้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมด้วยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปี 2550

ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้การสนับสนุนในการวิจัย

ขอขอบพระคุณ อาจารย์และเจ้าหน้าที่ ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้การสนับสนุนและอำนวยความสะดวกในการวิจัย



รังสรรค์ เมืองเหลือ

1 ก.พ. 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

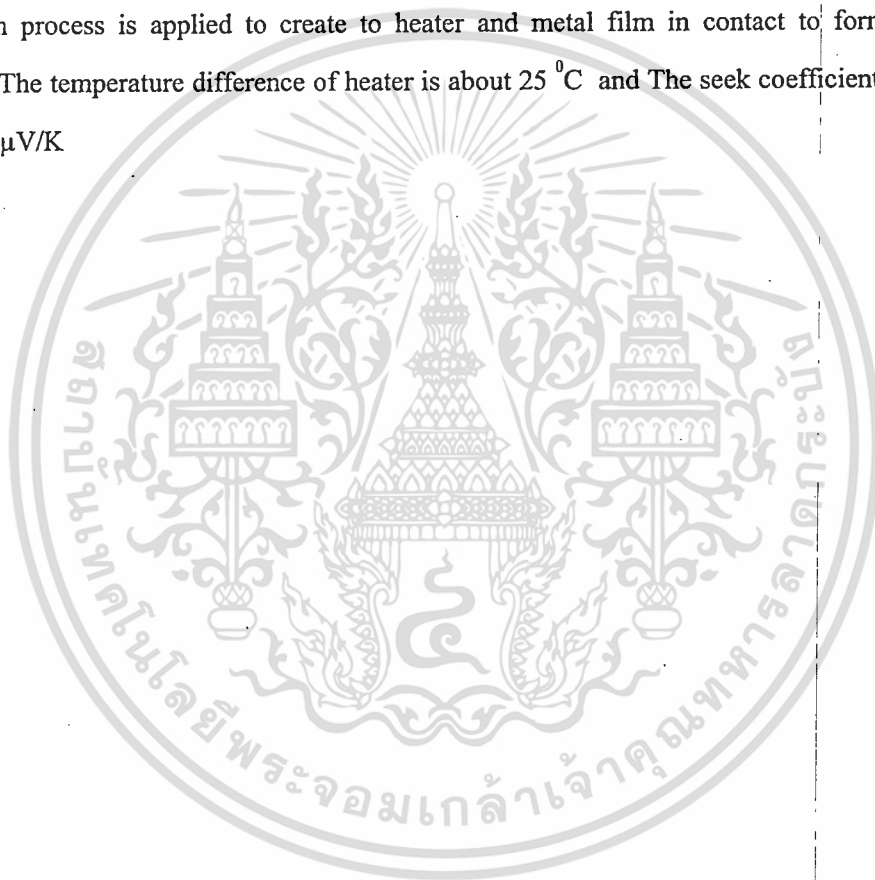
บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา การพัฒนาไมโครเทอร์โมคัปเปิลแบบฟิล์มบางโลหะ โดยมีหลักการการทำงานของเทอร์โมคัปเปิลจะประกอบด้วยวัสดุสองชนิดต่างกัน โดยมีปลายด้านหนึ่งเชื่อมติดกันและเมื่อเกิดผลต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้งสองด้านจะเกิดแรงดันตกคร่อมเทอร์โมคัปเปิล ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้านั้นขึ้นกับชนิดของวัสดุและผลต่างของอุณหภูมิ โดยงานวิจัยเริ่มจากการศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มบางโลหะและคุณสมบัติของซิลิคอน สำหรับวิธีการสร้างอุปกรณ์จะใช้เทคโนโลยีกระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำ ซึ่งตัวอุปกรณ์ประกอบด้วย เทอร์โมคัปเปิล และฮีตเตอร์ โดยมีโครงสร้างอยู่บนซิลิคอนไดออกไซด์ กระบวนการสร้างอุปกรณ์เริ่มจากนำแผ่นซิลิคอนระนาบ (100) มาสร้างเป็นไดออกไซด์บาง เสร็จแล้วทำการแพะสารเจือเพื่อสร้างเป็นแถบสารเจือ ต่อจากสร้างฟิล์มโลหะเพื่อให้เกิดเป็น เทอร์โมคัปเปิล และฮีตเตอร์ ผลจากทดสอบอุปกรณ์พบว่าฮีตเตอร์ให้ผลต่างของอุณหภูมิประมาณ 25°C และค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมเทอร์โมคัปเปิลอยู่ในช่วง $100\text{-}600\ \mu\text{V/K}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Abstract

This research has been studied the “Development of thin-film metal microthermocouple” Thermocouple consists of two different materials that the one end is contact. The temperature difference between the contact results in voltage drop across the thermocouple. The voltage level depends on type of materials and different temperature. The first, We study characteristics of thin film metal and silicon. This process is fabricated by semiconductor technology. The process is to create diaphragm by using silicon (100). The thermal doping is followed to create doped strip. The metal film process is applied to create to heater and metal film in contact to form the thermocouple. The temperature difference of heater is about 25 °C and The seek coefficient is in range 100-600 $\mu\text{V/K}$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อภาษาไทย	II
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญภาพ	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย	2
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา	3
บทที่ 2 ทฤษฎี	4
2.1 วัสดุซิลิคอน	4
2.2 ปฏิกิริยาการแผ่รังสีไฟฟ้าความร้อน	11
บทที่ 3 การสร้างฟิล์มบาง	22
3.1 ระบบการสร้างฟิล์มบาง	22
3.2 สปีดเตอร์ริง	22
3.3 เงื่อนไขที่เหมาะสมในกระบวนการสร้างฟิล์มบาง	34
3.4 ส่วนประกอบที่สำคัญของ SPF –RF Sputtering System	35
3.5 กระบวนการสร้างฟิล์มโลหะด้วยวิธีการระเหยในสุญญากาศบนฐานรองซิลิคอนและซิลิคอนไดออกไซด์	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)	หน้า
บทที่ 4 การออกแบบและการสร้าง	42
4.1 การออกแบบไดอะแฟรม	42
4.2 การออกแบบฮีตเตอร์	43
4.3 การออกแบบเทอร์โมคัปเปิล	44
4.4 กระบวนการสร้างฮีตเตอร์	45
4.5 กระบวนการสร้างฮีตเตอร์และเทอร์โมคัปเปิล	56
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง	62
5.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มโลหะ	62
5.2 สภาพความต้านทานของฟิล์มโลหะอลูมิเนียม	65
5.3 การทำให้เกิดสวดคลายฟิล์มโลหะอลูมิเนียม	65
5.4 การวิเคราะห์การแพร่สารเจือชนิดอื่นและพี	66
5.5 การศึกษาไมโครฮีตเตอร์บนฐานรองซิลิคอน	70
5.6 ผลของการชินเตอร์กับรอยสัมผัส โอห์มมิก	74
5.7 การศึกษาไมโครเทอร์โมคัปเปิล	76
5.8 การศึกษาคุณสมบัติของเทอร์โมคัปเปิลบนฐานรองไมโครฮีตเตอร์	78
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง	79
เอกสารอ้างอิง.....	82
ภาคผนวก ก.....	83
ประวัติผู้เขียน.....	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของวัสดุ โดยที่จุดอ้างอิงอยู่ที่ 0 °C และจุดที่วัด 100 °C	16
ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขของวิธีการระเหยในสุญญากาศของฟิล์ม Al ในการทดลอง	39
ตารางที่ 5.1 เงื่อนไขการสปีดเตอร์อลูมิเนียมในการทดลอง	63
ตารางที่ 5.2 เงื่อนไขการสปีดเตอร์ฟิล์มอลูมิเนียม และค่า Reflectance (%)	65
ตารางที่ 5.3 สภาพความต้านทานของฟิล์มโลหะอลูมิเนียม	65
ตารางที่ 5.4 ค่าความต้านทานของไมโครฮีตเตอร์	71



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 แบบจำลองของอะตอมชิลิคอน	4
รูปที่ 2.2 แบบจำลองพันธะโควาเลนต์ระหว่างอะตอมชิลิคอน	5
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของผลึกชิลิคอน	5
รูปที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างพลังงานของผลึกชิลิคอนบริสุทธิ์	6
รูปที่ 2.5 การเกิดอิเล็กตรอนอิสระและโฮลภายในโครงสร้างแถบพลังงาน	7
รูปที่ 2.6 การเกิดอิเล็กตรอนอิสระและโฮลภายในโครงสร้างแถบพลังงานชนิดเอ็น	8
รูปที่ 2.7 การเกิดอิเล็กตรอนอิสระและโฮลภายในโครงสร้างแถบพลังงานชนิดพี	9
รูปที่ 2.8 ประเภทของอินเตอร์เฟซแทรปและออกไซด์ชาร์จ	10
รูปที่ 2.9 วงจรปิดจะเกิดกระแสไหลวน	12
รูปที่ 2.10 โครงสร้างของเทอร์โมคัปเปิล	12
รูปที่ 2.11 โลหะแทรก	13
รูปที่ 2.12 กฎของการแทรกอนุกรม	13
รูปที่ 2.13 การเปลี่ยนระดับเฟอร์มิและแพร์ของอิเล็กตรอน	17
รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ของตำแหน่งเฟอร์มิในช่วงแบนด์กับของชิลิคอน ที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารเจือ N_A และ N_D	18
รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คเทียบกับสภาพความต้านทานชิลิคอน	20
รูปที่ 2.16 การเปรียบเทียบของ ฉนวน สารกึ่งตัวนำและโลหะ	21
รูปที่ 3.1 เทคโนโลยีการสร้างฟิล์มบาง โดยการปลูกผลึกชนิดต่าง ๆ	22
รูปที่ 3.2 กลไกที่เกิดขึ้นเมื่อไอออนบวกชนผิวของเป้า	23
รูปที่ 3.3 การสปีดเตอร์ริงเปรียบเทียบเหมือนกันชนด้วยลูกบิลเลียด	24
รูปที่ 3.4 การถ่ายทอดโมเมนตัมในกระบวนการสปีดเตอร์ริง	24
รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราสปีดเตอร์ริงกับพลังงานไอออนบวก	25
รูปที่ 3.6 โครงสร้างของระบบไดโอดไฟฟ้ากระแสตรง	27
รูปที่ 3.7 ลักษณะทั่วไปของระบบเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปีดเตอร์ริง	27
รูปที่ 3.8 แบบจำลองโครงสร้าง (Zone model) แสดงอิทธิพลของวัสดุรองรับและความดันก๊าซ อาร์กอนที่มีต่อโครงสร้างของฟิล์มบางที่ทำการเคลือบด้วยวิธีสปีดเตอร์ริง	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของไอออนโมเลกุลคู่ (MO^+/M^++MO^+) กับพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะของโลหะออกไซด์	30
รูปที่ 3.10 แบบจำลองการเกิด DC diode sputtering	32
รูปที่ 3.11 ระบบสปัตเตอร์ริงแบบ RF sputtering	33
รูปที่ 3.12 รูป SPF – RF Sputtering System	35
รูปที่ 3.13 องค์ประกอบรวม SPF – RF Sputtering System	35
รูปที่ 3.14 ภาพแหล่งจ่ายพลังงานคลื่นความถี่วิทยุ รุ่น 922-9502A	36
รูปที่ 3.15 ภาพแผงควบคุม ป้อน, B-A Gauge and Heater	36
รูปที่ 3.16 โครงสร้างของเครื่อง filament evaporation	38
รูปที่ 3.17 เครื่องเคลือบฟิล์ม โลหะแบบระเหยในสุญญากาศ	40
รูปที่ 3.18 ภาพถ่ายฟิล์มอลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่เคลือบ	41
รูปที่ 4.1 แบบจำลองการกัดซลิคอน โดยสารละลาย	42
รูปที่ 4.2 การออกแบบไมโครฮีตเตอร์	43
รูปที่ 4.3 โครงสร้างของไมโครฮีตเตอร์	44
รูปที่ 4.4 การออกแบบความกว้างและระห่างระหว่างแถบแพร์สารเจือ	44
รูปที่ 4.5 ความยาวของแถบแพร์สารเจือที่ต่างๆ กัน	45
รูปที่ 4.6 ภาพตัดขวางชิฟเทอร์โมคัปเปิลที่ต่ออนุกรมกัน	45
รูปที่ 4.7 ภาพตัดขวางของแผ่นผลึกซลิคอนเริ่มแรก	50
รูปที่ 4.8 ภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านกระบวนการออกซิเดชันเริ่มแรก	51
รูปที่ 4.9 ภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านขั้นตอนที่ 7	53
รูปที่ 4.10 ภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านขั้นตอนที่ 11	53
รูปที่ 4.11 การสร้างแถบไททาเนียม	54
รูปที่ 4.12 ภาพตัดขวาง โครงสร้างไมโครฮีตเตอร์	55
รูปที่ 4.13 การสร้างไมโครฮีตเตอร์ขั้นสุดท้าย	56
รูปที่ 4.14 ภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านขั้นตอนที่ 11	56
รูปที่ 4.15 ภาพตัดขวางแถบแพร์สารเจือ	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.16 ภาพตัดขวางเทอร์โมคัปเปิล	60
รูปที่ 4.17 รูปถ่ายด้านบนเทอร์โมคัปเปิล	60
รูปที่ 5.1 ระบบการสปีดเตอร์แบบ อาร์เอฟไดโอด	62
รูปที่ 5.2 फिल्मอลูมิเนียมที่ได้จากการสปีดเตอร์	64
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงาน RF และอัตราการสปีดเตอร์	64
รูปที่ 5.4 ลวดลายฟิล์ม โลหะอลูมิเนียมหลังการกัดส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน 400 เท่า	66
รูปที่ 5.5 ชิ้นงานที่ถูกขัดด้วยผงเพชร	67
รูปที่ 5.6 ผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการขี้ลิกอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสต่อความเข้มข้นสารเจือที่ผิวของชิ้นงาน	68
รูปที่ 5.7 ผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการขี้ลิกอะตอมสารเจือโบรอนต่อความเข้มข้นสารเจือที่ผิวของชิ้นงาน	68
รูปที่ 5.8 ความลึกและความเข้มข้นของสารเจือฟอสฟอรัสที่ใช้เวลาขี้ลิกต่างกัน	69
รูปที่ 5.9 ความลึกและความเข้มข้นของสารเจือโบรอนที่ใช้เวลาขี้ลิกต่างกัน	69
รูปที่ 5.10 ภาพถ่ายตัดขวางของฟิล์ม โลหะด้วย SEM	70
รูปที่ 5.11 ผลการวิเคราะห์ฟิล์ม โลหะด้วย EDS	70
รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความต้านทานและค่าความต้านทาน	71
รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและอุณหภูมิและกำลังงานของฮีตเตอร์ ที่มีขนาดความกว้าง (W) ต่างกัน	72
รูปที่ 5.14 การกระจายความร้อนบน ไดอะแฟรมที่ความหนาต่างกัน	73
รูปที่ 5.15 การกระจายความร้อนของฮีตเตอร์ที่ขนาด 40 μm โดยความหนาของไดอะแฟรม 25 μm	73
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงคุณลักษณะกระแสและแรงดัน ที่อุณหภูมิซินเตอร์ 350 $^{\circ}\text{C}$	75
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงคุณลักษณะกระแสและแรงดัน ที่อุณหภูมิซินเตอร์ 380 $^{\circ}\text{C}$	75
รูปที่ 4.18 กราฟคุณลักษณะกระแสและแรงดันของยอตต่อ Al/p ⁺ อุณหภูมิซินเตอร์ 400 $^{\circ}\text{C}$	75
รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ของค่าเอาท์พุทเทอร์โมคัปเปิลและแถบความกว้างและยาวสารเจือชนิดอื่น	76
รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ของค่าเอาท์พุทเทอร์โมคัปเปิลและแถบความกว้างและยาวสารเจือชนิดพี	76
รูปที่ 5.21 ค่าเอาท์พุทเทอร์โมคัปเปิลของสารเจือซิลิคอนชนิดอื่นนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้	77

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 5.22 ค่าเอาต์พุทเทอร์โมคัปเปิลของสารเจือซิลิคอนชนิดพี	78
รูปที่ 5.23 ค่าเอาต์พุทการตอบสนองของเทอร์คัปเปิลชนิดเอ็น	79
รูปที่ 5.24 ค่าเอาต์พุทการตอบสนองของเทอร์โมคัปเปิลชนิดพี	79



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตวงจรรวมได้ถูกพัฒนาไปอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง โดยเฉพาะขนาดของวงจรมีขนาดเล็กลงอย่างมากจนไปถึงระดับซิปไมครอน ซึ่งเป็นเทคโนโลยีขั้นสูง ทำให้ทางผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะทำวิจัยการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเป็นเซนเซอร์ชนิดต่างๆ โดยศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์เครื่องจักรที่มีศักยภาพพร้อมสำหรับกระบวนการสร้างที่ใช้เทคโนโลยีระดับไมครอน ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการสร้างที่สำคัญ คือ

1. กระบวนการออกแบบและสร้างกระจกต้นแบบ
2. กระบวนการทำความสะอาด
3. กระบวนการออกซิเดชัน
4. กระบวนการแพร่สารเจือ
5. กระบวนการ โฟโวลติโคราฟี
6. กระบวนการฟิล์มบางโลหะ
7. กระบวนการซินเตอร์ริง

สำหรับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ที่ทางห้องปฏิบัติการได้นั้นเป็นอุปกรณ์ประเภทเซนเซอร์ชนิดต่างๆ ได้แก่ เซนเซอร์ทางความร้อน, เซนเซอร์ทางเคมี, เซนเซอร์ทางแสง, ก๊าซเซนเซอร์ เป็นต้น ดังนั้นจากความรู้ของผู้วิจัยและเทคโนโลยีต่างๆ ที่อยู่ในห้องปฏิบัติการจึงทำให้มีศักยภาพเพียงพอในการสร้างและพัฒนาไมโครเทอร์คัปเปิล โดยกาใช้ Silicon planar technology

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. พัฒนาระบวนการ โลหะ
 2. ปรับปรุงกระบวนการ โลหะที่ได้ทำการศึกษาให้มีความเหมาะสมกับเครื่องมือที่มีอยู่
 3. ศึกษาและทำความเข้าใจในขั้นตอนการสร้างฟิล์ม โลหะของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ด้วย
 4. การพัฒนาระบวนการสร้างฟิล์ม โลหะด้วยวิธีสปัตเตอร์และการระเหยโลหะในระบบสุญญากาศ
 5. ศึกษาและทำความเข้าใจการแพร่สารเจือแบบความความร้อน
 6. วิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้า และทางกายภาพของฟิล์ม โลหะและตัวแปรต่างๆที่
 7. สร้างลวดลายโลหะอลูมิเนียมเพื่อทดสอบการนำไฟฟ้าและจุดเชื่อมต่อของฟิล์ม โลหะ
- เพื่อใช้ทดสอบหาความต้านทานภายในรอยสัมผัสของรอยสัมผัสแบบโอห์มิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ศักยภาพสมบัติไฟฟ้าความร้อนระหว่างฟิล์มโลหะและชั้นสารกึ่งตัวนำ

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

1. การสร้างฟิล์ม โลหะด้วยวิธีการสปีดเตอร์สามารถควบคุมความหนาและความราบเรียบของฟิล์มโลหะ
2. รอยสัมผัสโอห์มิกที่ดีจะต้องเป็นรอยสัมผัสที่มีความต้านทานต่ำและไม่มีผลเกี่ยวข้องกับทิศทางการไหลของกระแส
3. ค่าซีเบ็คของเทอร์โมคัปเปิลที่ความเข้มข้นของสารเจือต่างๆกัน

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีเกี่ยวกับกระบวนการทางสารกึ่งตัวนำซึ่งประกอบไปด้วยดังนี้

1. กระบวนการออกแบบและสร้างกระจกต้นแบบ
2. กระบวนการทำความสะอาด
3. กระบวนการออกซิเดชัน
4. กระบวนการแพร์สารเจือ
5. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี
6. กระบวนการฟิล์มบางโลหะ
7. กระบวนการซินเตอร์ริง

สำหรับการศึกษานี้เริ่มตั้งแต่การสร้างฟิล์มโลหะและกระบวนการแพร์สารเจือ เช่น สภาพความต้านทาน ความราบเรียบของฟิล์มโลหะ ความเข้มข้นของสารเจือ เป็นต้น และนำฟิล์มที่ได้มาสร้างรอยสัมผัสโอห์มิกระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นรอยสัมผัสที่ไม่มีผลเกี่ยวข้องกับทิศทางการไหลกระแสซึ่งกระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้ทั้งสองทิศทางและมีความต้านทานภายในรอยสัมผัสที่ต่ำ และคุณสมบัติทางไฟฟ้าความร้อน

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยฉบับนี้จะกล่าวถึงเทคโนโลยีกระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำ ซึ่งอันแรกจะเน้นไปที่กระบวนการ โลหะและเริ่มตั้งแต่เทคโนโลยีการสร้างฟิล์มโลหะ โดยจะใช้เทคโนโลยีการสร้างฟิล์มโลหะที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์มีอยู่ และทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มโลหะทั้งกายภาพและทางไฟฟ้าตั้งแต่การสร้างฟิล์มโลหะ โดย อันที่สองจะเน้นไปที่

เอกสารประกอบการแพร์สารเจือจะเริ่มตั้งแต่การแพร์สารเจือแล้วทำการขัปลึกลับสารเจือหลังจากศึกษาการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางไฟฟ้า สุดท้ายจะเป็นการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าทางความร้อนของไมโครเทอร์โมคัปเปิล

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาเทคโนโลยีกระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำ
2. ศึกษาการใช้เครื่องมือในกระบวนการ โลหะของห้องศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์
3. ศึกษากระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์
4. ศึกษากระบวนการโฟโตลิโธกราฟี
5. ศึกษากระบวนการแพร่อะตอมสารเจือโบรอนและฟอสฟอรัส
6. ศึกษากระบวนการสร้างฟิล์มโลหะด้วยวิธีการสปัตเตอร์(sputtering)และวิธีการระเหยในสุญญากาศ(evaporation)
7. ศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มโลหะจากเงื่อนไขของวิธีการสปัตเตอร์เช่น อัตราการเกิดฟิล์มโลหะ ความเรียบของฟิล์มโลหะและสภาพความนำไฟฟ้าของฟิล์มโลหะ
8. ศึกษาการสร้างลวดลายโลหะด้วยวิธีการสกัดฟิล์มโลหะโดยใช้สารละลายหรือที่เรียกว่าการสกัดแบบเปียก(wet etching)
9. ศึกษาความต้านทานภายในรอยสัมผัสโอห์มิกระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ
10. ศึกษาการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่ง
12. ศึกษาการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าของไมโครเทอร์โมคัปเปิล

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 วัสดุซิลิคอน

2.1.1 โครงสร้างของผลึกซิลิคอน

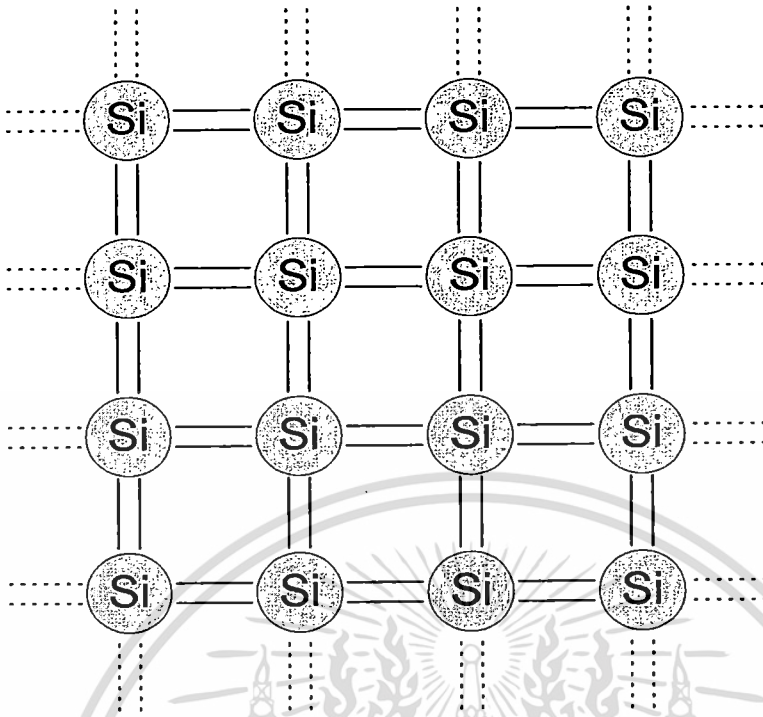
ซิลิคอนเป็นสารกึ่งตัวนำที่ประกอบขึ้นจากอะตอมของธาตุซิลิคอนหลายๆ อะตอมมาอยู่ใกล้ชิดกัน โดยอะตอมดังกล่าวจะมีการยึดเกาะเกี่ยวซึ่งกันและกันเพื่อความมั่นคงของอะตอม การเกาะเกี่ยวกันระหว่างอะตอมซิลิคอนเหล่านี้เรียกว่า พันธะ (bond) กลไกในการเกาะเกี่ยวหรือการเกิดพันธะนี้มีอยู่หลายชนิดด้วยกัน แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะพันธะที่เกิดขึ้นในผลึกซิลิคอนเท่านั้น

ในผลึกซิลิคอนเมื่ออะตอมของซิลิคอนเข้ามาอยู่ใกล้ชิดกันจะทำให้วงโคจรชั้นนอกสุดของแต่ละอะตอมซิลิคอนซึ่งประกอบด้วยอิเล็กตรอนวงนอกสุด (valence electron) อยู่ถึง 4 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.1



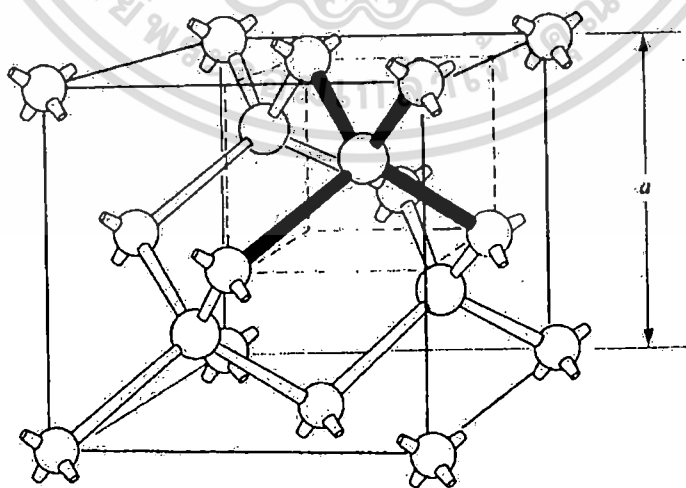
รูปที่ 2.1 แบบจำลองของอะตอมซิลิคอน

เกิดการทับซ้อนกัน อันจะทำให้เกิดพันธะแบบที่เรียกว่า พันธะโควาเลนต์ (covalent bond) เกิดขึ้น โดยพันธะดังกล่าวนี้เกิดจากอะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกันจะมีการใช้อิเล็กตรอนวงนอกสุดร่วมกัน ทั้งนี้ก็เพื่อให้อะตอมอยู่ในภาวะที่มั่นคง ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แบบจำลองพันธะโควาเลนต์ระหว่างอะตอมซิลิคอน

จากรูปข้างต้นจะเป็นโครงสร้างของผลึกซิลิคอนบริสุทธิ์ในสองมิติ โดยอะตอมจะมีการใช้อิเล็กตรอนวงนอกสุดทั้ง 4 ร่วมกันกับอิเล็กตรอนนี้เองทำให้อะตอมข้างเคียง 4 อะตอม เกิดพันธะโควาเลนต์ขึ้น 4 พันธะด้วยกัน การใช้อิเล็กตรอนร่วมกันนี้เองทำให้อะตอมของซิลิคอนต่างๆ มีความมั่นคง และสามารถประกอบรวมกันเป็น โครงสร้างของผลึกซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของผลึกซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

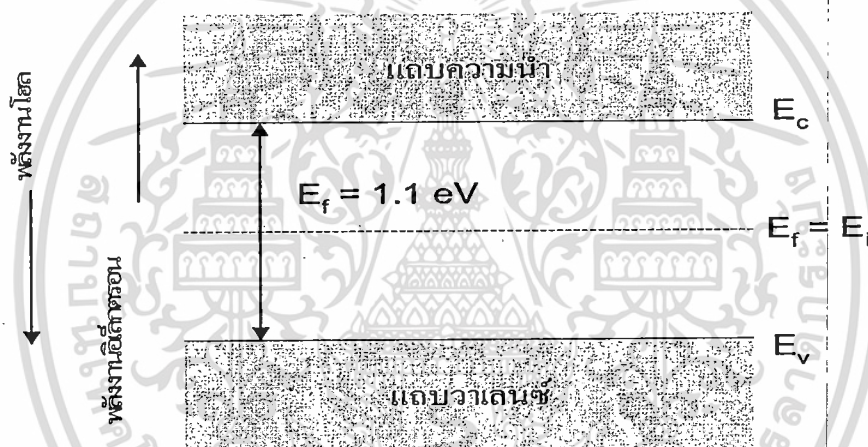
2.1.1 ชนิดของผลึกซิลิคอน

ผลึกสารกึ่งตัวนำซิลิคอนนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็นสองชนิดใหญ่ๆ ได้คือ ซิลิคอนบริสุทธิ์และซิลิคอนเจือปน

2.1.1.1 ซิลิคอนบริสุทธิ์ (Intrinsic Silicon)

ผลึกซิลิคอนซึ่งไม่ได้ถูกเติมหรือเจือปนด้วยอะตอมสารเจือของธาตุอื่น จะมีลักษณะแถบพลังงานดังแสดงในรูปที่ 2.4

จากภาพเป็นลักษณะโครงสร้างพลังงานของซิลิคอนบริสุทธิ์ ซึ่งประกอบไปด้วยแถบวาเลนซ์ แถบความนำและแถบพลังงานต้องห้าม โดยระดับพลังงานซึ่งแสดงเป็นเส้นประที่อยู่ระหว่างกึ่งกลางแถบวาเลนซ์และแถบความนำ คือระดับพลังงานเฟอร์มี สำหรับสารกึ่งตัวนำซิลิคอนบริสุทธิ์



รูปที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างพลังงานของผลึกซิลิคอนบริสุทธิ์

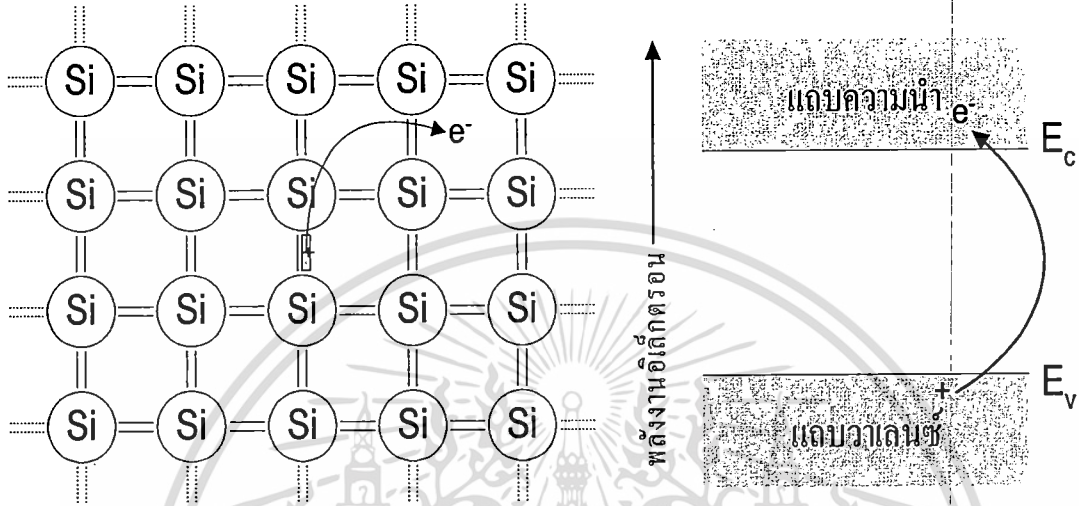
ระดับพลังงานนี้จะถูกเรียกว่าเป็นระดับพลังงานอินทรินซิก และเมื่อทำการพิจารณาแถบพลังงานของซิลิคอนบริสุทธิ์ การที่พันธะโควาเลนซ์ถูกแตกออกเนื่องจากการกระตุ้นด้วยพลังงานภายนอก นั่นก็คือการที่อิเล็กตรอนภายในแถบวาเลนซ์ ได้รับพลังงานจากภายนอกเพิ่มขึ้นมากพอที่จะเปลี่ยนแปลงไปอยู่ที่ในระดับพลังงานในแถบความนำ และจะทำให้เกิดที่ว่าง (โฮล) ขึ้นที่แถบวาเลนซ์ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยสภาพความนำไฟฟ้าของซิลิคอนบริสุทธิ์จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับจำนวนของอิเล็กตรอนในแถบความนำและโฮลในแถบวาเลนซ์นี้ ซึ่งการเกิดประจุพาหะในซิลิคอนบริสุทธิ์จะเกิดได้เฉพาะในกรณีนี้เท่านั้น และจำนวนอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดขึ้นในแถบความนำ จะมีจำนวนเท่ากับจำนวนของโฮลที่เกิดขึ้นในแถบวาเลนซ์สามารถเขียนสมการได้เป็น

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

โดยที่ n = ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ

p = ความหนาแน่นของโฮล

n_i = ความหนาแน่นอินทรินซิก



รูปที่ 2.5 การเกิดอิเล็กตรอนอิสระและ โฮลภายใน โครงสร้างแถบพลังงาน

2.1.1.2 ซิลิคอนเจือปน (Extrinsic Silicon)

ซิลิคอนบริสุทธิ์หรือที่เรียกว่าอินทรินซิกซิลิคอนนั้น ตามความจริงแล้วจะถูกนำไปใช้งานเพื่อการสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำได้น้อยมาก ทั้งนี้เนื่องจากซิลิคอนบริสุทธิ์มีสภาพความนำไฟฟ้าต่ำและมีค่าจำกัด โดยค่าความนำไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงได้เฉพาะในกรณีที่ได้รับการกระตุ้นจากพลังงานภายนอก เช่น ความร้อนหรือแสง เป็นต้น ดังนั้นถ้าต้องการเพิ่มสภาพความนำไฟฟ้าให้เกิดแก่ผลึกซิลิคอนจึงมีการเติมอะตอมสารเจือธาตุอื่นเข้าไปในผลึกด้วย ผลึกซิลิคอนที่ถูกเจือปนด้วยอะตอมของธาตุเจือปน (impurity atom) ถูกเรียกว่า ซิลิคอนเจือปน หรือ เอ็กทรินซิกซิลิคอน ทำให้ผลึกซิลิคอนดังกล่าวมีคุณสมบัติที่น่าสนใจและเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการนำไปใช้สร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำต่างๆ

สำหรับอะตอมของธาตุที่นำมาใช้เป็นสารเจือปน (impurity) เติมลงไปในผลึกซิลิคอนบริสุทธิ์นั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. อะตอมธาตุเจือปนชนิดเอ็น (n-type impurity atom)

ได้แก่อะตอมของธาตุหมู่ที่ 5 ของตารางธาตุ เช่น ฟอสฟอรัส สารหนู พลวง เป็นต้น เมื่อเติมเข้าไปในผลึกซิลิคอนบริสุทธิ์แล้วจะทำให้ได้ผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น สามารถนำไฟฟ้าได้ดี โดยมีอิเล็กตรอนอิสระจำนวนมาก อะตอมสารเจือชนิดเอ็นนี้ถูกเรียกว่า อะตอมผู้ให้ (donor atom)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

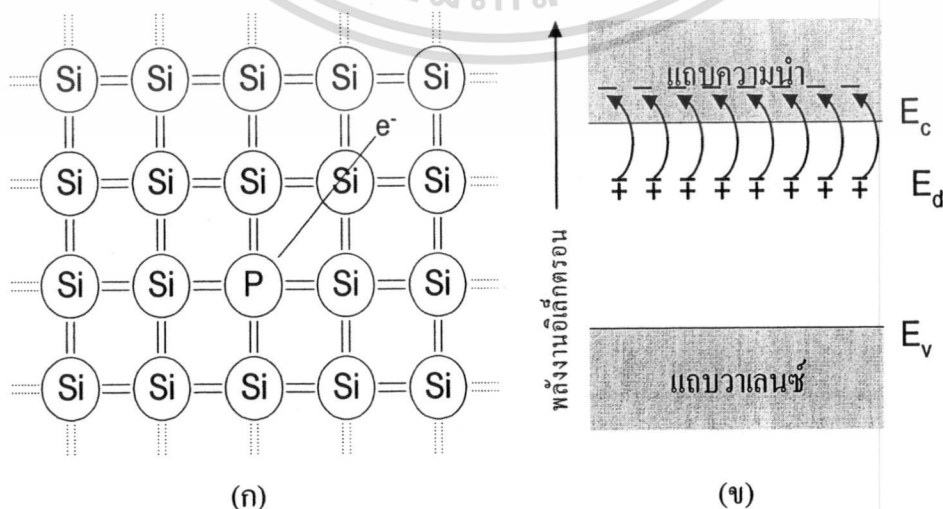
2. อะตอมธาตุเจือชนิดพี (p-type impurity atom)

ได้แก่อะตอมธาตุเจือชนิดพีในหมู่ที่ 3 ของตารางธาตุเช่น โบรอน อะลูมิเนียม อินเดียม เป็นต้น เมื่อเติมเข้าไปในผลึกซิลิคอนบริสุทธิ์แล้ว จะทำให้ผลึกซิลิคอนชนิดพี สามารถนำไฟฟ้าได้ดี โดยมีโฮลซึ่งเป็นประจุพาหะชนิดบวกจำนวนมาก อะตอมสารเจือชนิดพีนี้ถูกเรียกว่าอะตอมผู้รับ (acceptor atom)

ส่วนซิลิคอนเจือปนที่ได้หลังจากการเติมอะตอมสารเจือแล้วสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. ผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น (n-type silicon)

ได้แก่ผลึกซิลิคอนที่ถูกเติมด้วยอะตอมสารเจือชนิดเอ็น หรืออะตอมผู้ให้ เช่น อะตอมของ ฟอสฟอรัสซึ่งเป็นธาตุในหมู่ที่ 5 ดังนั้นจึงมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัวเมื่ออะตอมถูกเติมเข้าไปในผลึกซิลิคอนก็จะไปเกาะเกี่ยวกับอะตอมข้างเคียงอีก 4 อะตอม ซึ่งอยู่รอบๆ เกิดเป็นพันธะโควาเลนซ์ขึ้น 4 พันธะ ดังนั้นจึงเหลือวาเลนซ์อิเล็กตรอนอีก 1 ตัว ซึ่งไม่มีพันธะจับอยู่ อิเล็กตรอนดังกล่าวนี้จะอยู่ในอิทธิพลของนิวเคลียสด้วยแรงยึดเหนี่ยวเพียงเล็กน้อยเกือบจะเป็นอิสระ ดังนั้นที่อุณหภูมิห้องปกติพลังงานจากความร้อนก็สามารถทำให้อิเล็กตรอนดังกล่าวได้รับพลังงานและหลุดออกมาเป็นอิสระได้เคลื่อนที่ไปมาได้อย่างเสรีกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระอยู่ในแถบความนำ และสามารถนำไฟฟ้าได้ ในสภาพเช่นนี้ปรากฏการณ์พันธะแตกเนื่องจากพลังงานความร้อนก็จะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในพันธะโควาเลนซ์หลุดมาเป็นอิสระได้เช่นกัน และทั้งให้เกิดโฮล ซึ่งเป็นประจุไฟฟ้าชนิดบวกเกิดขึ้นในแถบวาเลนซ์ แต่ปริมาณโฮล และอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นเนื่องจากพันธะแตกนี้มีจำนวนน้อย ดังนั้นในผลึกซิลิคอนชนิดนี้จึงมีปริมาณของประจุพาหะอิเล็กตรอนที่มากกว่าโฮล ทำให้ผลึกซิลิคอนชนิดนี้จึงนำไฟฟ้าได้ด้วยประจุพาหะชนิดลบ (Negative charge) ดังนั้นเราจึงเรียกผลึกซิลิคอนชนิดนี้ว่าผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น (n : ย่อมาจาก negative) การเกิดอิเล็กตรอนอิสระเนื่องจากอะตอมสารเจือผู้ให้ และลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น แสดงได้ดังในรูปที่ 2.6 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

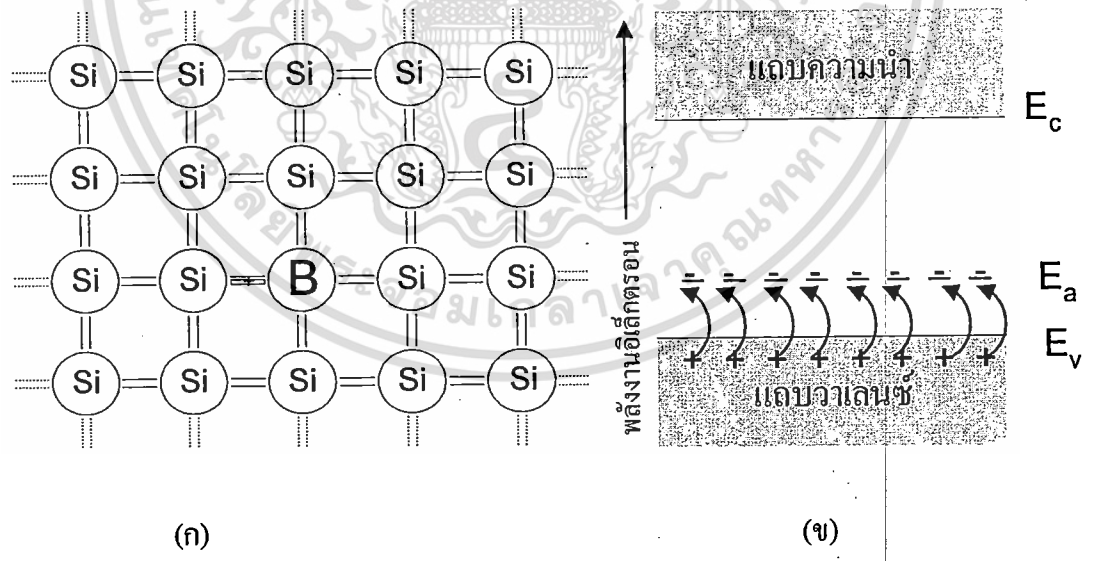


รูปที่ 2.6 การเกิดอิเล็กตรอนอิสระและโฮลภายในโครงสร้างแถบพลังงานชนิดเอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากฝ่ายวิชาการ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ผลึกซิลิคอนชนิดพี (p-type silicon)

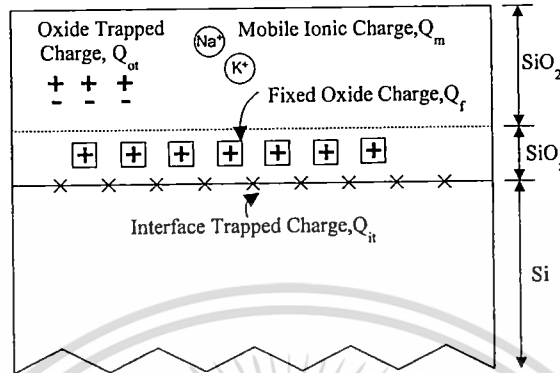
ได้แก่ผลึกซิลิคอนที่ถูกเติมด้วยอะตอมสารเจือชนิดพี หรือที่เรียกว่า อะตอมผู้รับ เช่น อะตอมของโบรอน ซึ่งเป็นธาตุในหมู่ที่ 3 ดังนั้นจึงมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเพียง 3 ตัว เมื่ออะตอมสารเจือผู้รับถูกเติมเข้าไปในผลึกซิลิคอนก็จะไปเกาะเกี่ยวกับอะตอมของผลึกซิลิคอนที่อยู่ข้างเคียงอีก 4 อะตอม แต่อะตอมสารเจือชนิดนี้มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว ดังนั้นจึงสามารถเกาะเกี่ยวและเกิดเป็นพันธะโควาเลนซ์ได้เพียง 3 ตัวพันธะเท่านั้น ส่วนอีกหนึ่งพันธะไม่มีความสมบูรณ์เนื่องจากขาดอิเล็กตรอน ดังนั้นจึงทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในพันธะโควาเลนซ์ใกล้ๆ มีโอกาสที่จะเข้าไปอยู่ในที่ดังกล่าวเพื่อทำให้เป็นพันธะที่สมบูรณ์ เมื่ออิเล็กตรอนหลุดออกไปจากพันธะโควาเลนซ์ก็จะทำให้เกิดโฮลขึ้นมา โฮลซึ่งเป็นประจุพาหะชนิดบวกสามารถนำไฟฟ้าได้ อะตอมของสารเจือชนิดนี้เมื่อได้อิเล็กตรอนเพิ่มเข้ามา ก็จะเปลี่ยนสภาพไปเป็นไอออนลบ และขณะเดียวกันอิเล็กตรอนและโฮลจำนวนเล็กน้อยที่สามารถเกิดขึ้นได้เช่นกัน เนื่องจากพลังงานจากความร้อนซึ่งทำให้พันธะแตกออก ดังนั้นในผลึกซิลิคอนชนิดพีจึงมีปริมาณของประจุพาหะโฮลมากกว่าจำนวนของอิเล็กตรอน และสามารถนำไฟฟ้าได้ด้วยประจุพาหะชนิดบวก (positive charge) เราจึงเรียกผลึกซิลิคอนชนิดนี้ว่า ผลึกซิลิคอนชนิดพี (p : ย่อมาจาก positive) การเกิดโฮลเนื่องจากอะตอมสารเจือผู้รับและลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิคอนชนิดพีแสดงได้ดังในรูปที่ 2.7 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



รูปที่ 2.7 การเกิดอิเล็กตรอนอิสระและโฮลภายใน โครงสร้างแถบพลังงานชนิดพี

2.1.1.3 อินเทอร์เฟซแทรป (Interface trap) และออกไซด์ชาร์จ (Oxide charge)

การจำแนกประเภทพื้นฐานของประพาหะและแทรปเหล่านี้แสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งแบ่งได้เป็น 4 ชนิดด้วยกันคือ



รูปที่ 2.8 ประเภทของอินเทอร์เฟซแทรปและออกไซด์ชาร์จ

1. อินเทอร์เฟซแทรปชาร์จ (Interface trapped charge, Q_{it})

อินเทอร์เฟซแทรปชาร์จ Q_{it} เกิดเนื่องจากคุณสมบัติของรอยต่อของซิลิคอนและซิลิคอนไดออกไซด์และขึ้นกับส่วนประกอบทางเคมีของรอยต่อทั้งสอง ตำแหน่งที่ตั้งของแทรปเหล่านี้อยู่ที่รอยเชื่อมต่อของซิลิคอนและซิลิคอนไดออกไซด์ โดยมีระดับพลังงานอยู่ในแถบต้องห้ามของซิลิคอน

2. ฟิกซ์ออกไซด์ชาร์จ (Fixed oxide charge, Q_f)

ฟิกซ์ออกไซด์ชาร์จ Q_f มีตำแหน่งอยู่ภายในช่วงประมาณ 30 อังสตรอมของรอยเชื่อมต่อซิลิคอนและซิลิคอนไดออกไซด์ ประจุเหล่านี้อยู่กับที่ไม่สามารถถูกประจุหรือคายประจุได้ โดยปกติแล้ว Q_f มีค่าเป็นบวกและขึ้นกับเงื่อนไขการทำออกซิเดชันและการแอนนัลและระนาบของซิลิคอน ไอออนของซิลิคอนบางตัวจะยังคงอยู่ใกล้กับรอยเชื่อมต่อ ไอออนเหล่านี้และพันธะที่ไม่สมบูรณ์ของซิลิคอนเช่น Si-Si และ Si-O ที่ผิวเป็นสาเหตุให้เกิดฟิกซ์ชาร์จ

3. ออกไซด์แทรปชาร์จ (Oxide trapped charge, Q_{ot})

ออกไซด์แทรปชาร์จ Q_{ot} เกี่ยวข้องกับจุลเสียด ในซิลิคอนไดออกไซด์ ประจุเหล่านี้เกิดจากสาเหตุดังเช่น การแผ่รังสีเอ็กซ์ หรือ high-energy electron bombardment แทรปเหล่านี้จะกระจายอยู่ทั่วไปในชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์

4. โมบิลไอออนิกชาร์จ (Mobile ionic charge, Q_m)

โมบิลไอออนิกชาร์จ Q_m ดังเช่น โซเดียมหรือไอออนิกของธาตุอัลคาไลด์อื่นๆ จะเคลื่อนที่ภายในชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ภายใต้อุณหภูมิและศักย์ไฟฟ้าที่สูง

2.2 ปปรากฏการณ์ไฟฟ้าความร้อน (Thermoelectric Effect)

เป็นปรากฏการณ์ของความสัมพันธ์ของพลังงานความร้อนและไฟฟ้า เมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิที่ปลายวัสดุจะเกิดปรากฏการณ์ไฟฟ้าความร้อน ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ปรากฏการณ์คือ

1. ปรากฏการณ์ซีเบ็ค (Seebeck Effect)

เป็นปรากฏการณ์นี้สังเกตได้จากการทดลองเมื่อนำวัสดุตัวนำต่างกัน 2 ชนิด โดยการนำปลายทั้งสองมาเชื่อมต่อกัน และปลายทั้งสองถูกทำให้มีอุณหภูมิต่างกัน ทำให้เกิดกระแสไหลในวงจรโลหะ

2. ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier Effect)

เป็นปรากฏการณ์ที่กล่าวถึงวัสดุตัวนำต่างกัน 2 ชนิด ที่ปลายทั้งสองด้านถูกเชื่อมต่อกัน เมื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านรอยต่อที่ถูกเชื่อม โดยความร้อนจะถูกคลายออกมาด้านหนึ่งและปลายอีกด้านหนึ่งดูดความร้อน ซึ่งจะขึ้นกับทิศทางกระแสที่ไหล

3. ปรากฏการณ์ทอมสัน (Thomson Effect)

เป็นปรากฏการณ์ที่กล่าวถึงวัสดุตัวนำที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน เมื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุแห่งตัวนำ จะเกิดการดูดความร้อนและคลายความร้อน

จากปรากฏการณ์ทั้งหมดที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ ปรากฏการณ์ซีเบ็คเป็นที่รู้จักกันดีและประยุกต์ใช้เป็นเทอร์โมคัปเปิลซึ่งถูกใช้วัดความแตกต่างของอุณหภูมิ ถึงแม้ว่าปรากฏการณ์เพลเทียร์จะได้รับความสนใจน้อยกว่าแบบแรก แต่ถูกประยุกต์ใช้ทำเป็นระบบทำความเย็นและระบบทำความร้อนที่ใช้โครงสร้างเดียวกัน ส่วนปรากฏการณ์ทอมสันได้รับความสนใจน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับสองปรากฏการณ์ที่กล่าวมาและไม่มีการประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติ

2.2.1 ปรากฏการณ์ซีเบ็ค (Seebeck Effect)

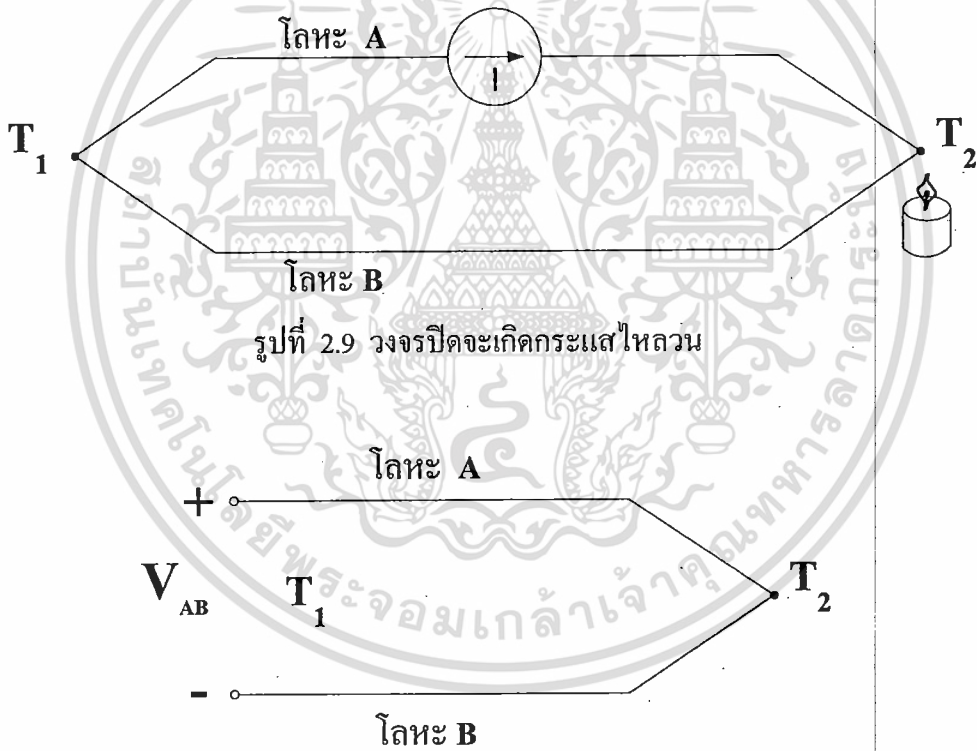
ปรากฏการณ์นี้ถูกค้นพบโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมันชื่อ โทมัส ซีเบ็ค (Thomas Seebeck) ในราวปี ค.ศ. 1822 พบว่าเมื่อนำโลหะสองเส้นชนิดต่างกันมาเชื่อมต่อปลายทั้งสองข้างเข้าด้วยกัน ซึ่งปลายจุดต่อทั้งสองมีอุณหภูมิต่างกันจะเกิดกระแสไหลในวงจรเส้นลวดทั้งสองตามรูปที่ 2.9 ปริมาณการไหลของกระแสไฟฟ้านี้จะเปลี่ยนแปลงตามผลต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้งสอง และถ้าเปิดจุดต่อเชื่อมด้านหนึ่งออกจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Electromotive Force) ที่ปลายเปิด ซึ่งถูกเรียกว่า “เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)” แสดงดังรูปที่ 2.10 โดยที่ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะเกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้งสอง เมื่ออิเล็กทรอนิกส์ได้รับความร้อนจะทำให้อิเล็กทรอนิกส์เคลื่อนที่และไปสะสมอยู่ที่ปลายด้านที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ของเทอร์โมคัปเปิลได้ดังสมการที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{AB} = \alpha_{AB}(T_2 - T_1) \tag{2.2}$$

เมื่อ α_{AB} คือค่าสัมประสิทธิ์ของซีเบ็ค (Seebeck Coefficient) ของวัสดุ A เทียบกับวัสดุ B เป็นค่าคงที่ มีหน่วยเป็น V/K T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K) และ V_{AB} คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้า (Electromotive Force)

เมื่อนำเทอร์โมคัปเปิลมาใช้งานโดยการนำรอยต่อ AB ไปยังจุดที่ต้องการวัดอุณหภูมิและปลายอีกด้านหนึ่งอยู่ที่อุณหภูมิอ้างอิงหรืออุณหภูมิที่รู้ค่า ทำให้เทอร์คัปเปิลสามารถวัดอุณหภูมิได้ จากการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับเทอร์โมคัปเปิลดำเนินต่อมาจนเป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในวงการอุตสาหกรรม



รูปที่ 2.9 วงจรปิดจะเกิดกระแสไหลวน

รูปที่ 2.10 โครงสร้างของเทอร์โมคัปเปิล

2.2.1.1 กฎการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากความร้อน (Thermoelectric Laws)[1,2,3,4]

กฎของวงจรโลหะชนิดเดียวกัน (Law of the Homogeneous Circuit)

เป็นวงจรที่ประกอบขึ้นด้วยโลหะชนิดเดียวกัน จะไม่เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า เมื่อเกิดความต่างของอุณหภูมิ ณ ปลายจุดทั้งสอง

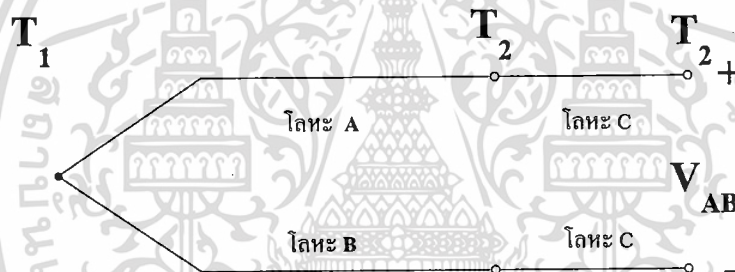
แรงเคลื่อนไฟฟ้าจะเกิดในกรณีที่ลวดทั้งสองเป็น โลหะต่างชนิดกันเท่านั้น
แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับผลต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้งสองข้าง

กฎของโลหะ (Law of Intermediate Metals)

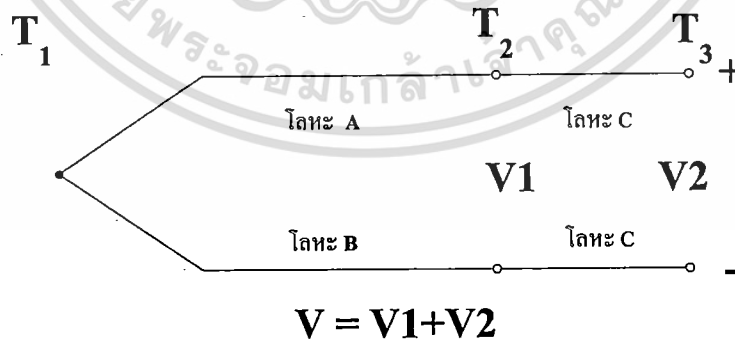
ในวงจรเทอร์โมคัปเปิล ถ้ามีโลหะแทรกอยู่ในส่วนหนึ่งส่วนใดของวงจร หากจุดต่อของ
ปลายโลหะแทรกทั้งสองมีอุณหภูมิเท่ากันแล้ว โลหะที่แทรกนี้จะไม่ผลต่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่
เกิดขึ้น ในทางปฏิบัติมีอยู่เสมอ เช่น ข้อต่อ หรือลวดทองแดงที่ต่อเข้ากับขามิเตอร์ แสดงดังรูปที่
2.11 โดยมีโลหะ C ที่ต่อแทรกอยู่ในวงจรจะไม่มีผลต่อการวัดถ้าอุณหภูมิที่ปลายทั้งสองเท่ากัน

กฎของอุณหภูมิแทรก (Law of Intermediate Temperature)

แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้น โดยเทอร์โมคัปเปิลชุดใดๆ ที่มีอุณหภูมิที่จุดต่อต่างกัน จะมีค่า
เท่ากับผลบวกทางพีชคณิตของแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเทอร์โมคัปเปิลชุดนั้น ตามรูปที่ 2.12 คือ
ผลรวมของแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับผลรวมเทอร์โมคัปเปิลทั้งสองชุด



รูปที่ 2.11 โลหะแทรก



รูปที่ 2.12 กฎของการแทรกอุณหภูมิ

ปัจจุบันคุณสมบัติของปรากฏการณ์ซีเบ็คได้ถูกศึกษากันอย่างกว้างขวาง[5] แต่อย่างไรก็ตามการเกิดปรากฏการณ์ไฟฟ้าความร้อนยังไม่เพียงพอที่จะอธิบายโครงสร้างของอิเล็กทรอนิกส์และ
แม้ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระเจิงของอิเล็กตรอน (electron scattering) ที่เป็นไปตามทฤษฎีและผลการทดลอง และบ่อยครั้งก็ไม่เป็นไปตามทฤษฎีและผลการทดลอง ดังนั้นการศึกษาปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ซึ่งเบ็ดนั้นต้องรู้การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัสดุเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามแท่งวัสดุจะมีการเปลี่ยนแปลงหลายอย่างดังนี้

ก. การเปลี่ยนแปลงระดับเฟอร์มี (change of fermi level)

ระดับเฟอร์มีมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ทำให้ปลายทั้งสองมีระดับเฟอร์มีไม่เท่ากัน

ข. การเปลี่ยนช่องว่างแถบพลังงาน (band gap change)

ในสถานะของแข็งอิเล็กตรอนเท่านั้นที่สามารถมีพลังงานได้หลายสถานะ ในแถบพลังงานของโลหะจะมีอิเล็กตรอนอยู่เต็ม ในการตรงกันข้ามของสารกึ่งตัวนำและฉนวน โดยที่แถบวาเลนซ์จะมีอิเล็กตรอนอยู่เต็มและแถบคอนดักชันไม่มีอิเล็กตรอนอยู่เลย ความกว้างของแถบพลังงานขึ้นกับอุณหภูมิ ทำให้เกิดการไหลของประจุพาหะระหว่างปลายทั้งสองของแท่งวัสดุ

ค. การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของประจุพาหะ (change carrier concentration gradient change)

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของประจุพาหะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเป็นสาเหตุให้ความเข้มข้นของประจุพาหะเปลี่ยนไปส่งผลให้เกิดการแพร่ประจุพาหะ

ง. การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient change)

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอนุภาคมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาของอนุภาคและค่าความพร่องตัวของประจุพาหะ จากที่กล่าวมาความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเป็นสาเหตุของการแพร่ของประจุพาหะตามแท่งของวัสดุ

จ. การแพร่ของความร้อน (thermal diffusion)

พลังงานจลน์ของอนุภาคและประจุพาหะขึ้นกับอุณหภูมิ โดยที่ปลายด้านร้อนอนุภาคจะมีพลังงานสูงทำให้อนุภาคเคลื่อนที่จากบริเวณที่ร้อนไปยังบริเวณที่เย็นกว่าและจะมีการสะสมของอนุภาคและประจุพาหะที่ปลายทั้งสองของวัสดุ

ช. โฟนอนดราก (phonon drag)

เป็นการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะมีฟลักซ์ (flux) ความร้อนไหลตามแท่งวัสดุ ฟลักซ์ความร้อนจะถูกพาไปโดยประจุพาหะและโฟนอน โดยที่โฟนอนเป็นผลจากการสั่นของแลตทิซ (lattice) ทั้งประจุพาหะและโฟนอนจะมีความสัมพันธ์และอิทธิพลต่อกัน

ซ. การสะสมของประจุพาหะ (change accumulation)

จากปรากฏการณ์ที่กล่าวมาข้างต้นเป็นสาเหตุของการสะสมของประจุพาหะที่อยู่ที่ปลายทั้งสองของแท่งวัสดุจะมีขั้วประจุต่างกันเป็นผลให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าและสนามไฟฟ้า ในกรณีที่เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรเปิดสนามไฟฟ้าจะอยู่ในสถานะสมดุล จากปรากฏการณ์ทั้งหมดมีผลครอบคลุมค่าซีเบ็คของโลหะและสารกึ่งตัวนำ

2.2.1.3 ปรากฏการณ์ซีเบ็คในโลหะ (Seebeck effect in metal)

โลหะเป็นวัสดุตัวนำซึ่งมีอิเล็กตรอนเป็นพาหะที่นำไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดี ดังนั้นปรากฏการณ์ซีเบ็คเป็นคุณสมบัติของวัสดุทุกตัว แต่การวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คของวัสดุตัวนำต้องมีรอยต่อของวัสดุที่ต่างกัน ดังนั้นนิยามของซีเบ็ค คือ

$$\Delta V = \alpha_A \Delta T \quad (2.3)$$

α_A คือค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คของโลหะ A และ ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้งสองของแท่งโลหะ A ดังนั้นความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คของโลหะต่างกันของโลหะ A และ B ถูกนิยามโดยสมการที่ (2.2) จะได้

$$\alpha_{AB} = \alpha_A - \alpha_B \quad (2.4)$$

ในการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คของโลหะตัวนำต่างๆ ต้องเลือกโลหะตัวใดตัวหนึ่งเป็นตัวอ้างอิงในการหาค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็ค โดยต้องมีค่าซีเบ็คค่าๆ Pt ถูกเลือกเป็นโลหะอ้างอิงในการวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คของโลหะต่างๆ และรู้คุณสมบัติเป็นอย่างดี ที่อุณหภูมิสูงๆ Pt มีเสถียรภาพดี แสดงดังตารางที่ 2.1

สำหรับการพิจารณาในกรณีการเกิดปรากฏการณ์ซีเบ็คเนื่องจากการแพร่ของความร้อน (จ) เมื่ออิเล็กตรอนได้รับความร้อนที่ปลายแท่งโลหะทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานจลน์สูงขึ้นจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากบริเวณที่ปลายร้อนไปยังปลายด้านเย็นเพราะว่าอิเล็กตรอนมีประจุไฟฟ้าเป็นลบทำให้ปลายด้านเย็นมีประจุเป็นลบและปลายด้านร้อนมีค่าเป็นบวก จะได้ผลค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คเป็นลบซึ่งเป็นไปตามผลที่คาดการณไว้ แต่กลไกการแพร่ความร้อนยังไม่เพียงพอที่จะอธิบายปรากฏการณ์ที่ตารางที่ 2.1 เพราะว่ามีอิเล็กตรอนเคลื่อนที่อย่างอิสระแต่อย่างไรก็ตามยังมีโลหะบางชนิดมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คเป็นบวกและนั่นหมายถึงอิเล็กตรอนไปสะสมที่ปลายร้อนของแท่งโลหะ เพื่อให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับกระบวนการทางไฟฟ้าของโลหะทำให้เกิดปรากฏการณ์ซีเบ็คคือ การเปลี่ยนแปลงระดับเฟอร์มิ (ก) การเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การแพร่ (ง) และการแพร่ของความร้อน (จ) ในสถานะสมดุลของปรากฏการณ์จะถูกชดเชยด้วยสนามไฟฟ้าสาเหตุเนื่องมาจากการสะสมของประจุไฟฟ้าที่ปลายทั้งสองของแท่งโลหะ (ข) การเปลี่ยนอุณหภูมิทำให้ระดับเฟอร์มิเปลี่ยนแปลงเพราะกฎการแยกตัวเพาลี (Pauli exclusion principle) ที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์สถานะของพลังงานอยู่ต่ำกว่าระดับเฟอร์มิที่จะมีอิเล็กตรอนครอบครองอยู่และที่ระดับพลังงานที่สูงกว่าระดับเฟอร์มิขึ้นไปจะมีแต่ความว่างเปล่า กล่าวคืออิเล็กตรอนมีพลังงานไม่

เกินระดับเฟอร์มิ ที่อุณหภูมิใดๆ สถานะพลังงานของอิเล็กตรอนถูกควบคุมโดยฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มิไดเรค (fermi-dirac distribution function)

ตารางที่ 2.1 ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของวัสดุ โดยที่จุดอ้างอิงอยู่ที่ 0 °C และจุดที่วัด 100 °C [5]

ธาตุ	E.m.f (mV)	ธาตุ	E.m.f (mV)
Bismuth	-7.34	Indium	+0.69
Nickel	-1.48	Carbon	+0.70
Cobalt	-1.33	Rhodium	+0.70
Mercury	-0.60	Silver	+0.74
Palladium	-0.57	Copper	+0.76
Calcium	-0.51	Zinc	+0.76
Thorium	-0.13	Gold	+0.78
Platinum	0.00	Cadmium	+0.90
Tantalum	+0.33	Tungsten	+1.12
Aluminium	+0.42	Cerium	+1.14
Tin	+0.42	Molybdenum	+1.45
Lead	+0.44	Lithium	+1.82
Magnesium	+0.44	Iron	+1.89

$$f_{ED}(E) = \frac{1}{1 + \exp\left[\frac{E - E_F}{kT}\right]} \quad (2.5)$$

โดยที่ k คือค่าคงที่ของ โบลซ์แมน (Boltzmann) และ T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ เมื่ออุณหภูมิ 0 K ค่า $E_F(T)$ จะมีระดับพลังงานเท่ากับ $E_F(0)$ ในขณะที่อุณหภูมิเปลี่ยนไปจะทำให้ $E_F(T)$ มีระดับไม่เท่ากับ $E_F(0)$ มีผลให้มีอิเล็กตรอนสามารถอยู่ในระดับที่มีพลังงานสูงกว่าเดิมได้ อย่างไรก็ตามการอธิบายปรากฏการณ์เทอร์ริเอ็กทริกเป็นเรื่องที่ละเอียดอ่อนและสำคัญมาก สำหรับการคำนวณหาจำนวนรวมอิเล็กตรอน n ตัวต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของโลหะซึ่งมีพลังงานอยู่ในช่วง E และ $E+dE$ เท่ากับจำนวนสถานะพลังงานต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (density of available energy state) $N(E)$ คูณกับฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มิไดเรคและทั้งหมดถูกอินทิเกรต

$$n = \int N(E) f_{FD}(E) dE \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

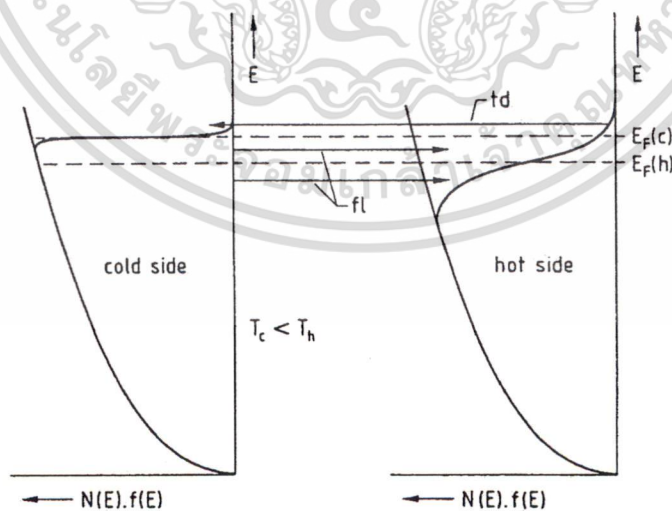
โดยที่ $N(E)dE$ คือจำนวนสถานะพลังงานที่จะมีอิเล็กตรอนอยู่ได้ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ในช่วงพลังงาน E ถึง dE ที่อุณหภูมิ 0 K สถานะของพลังงานทั้งหมดจะอยู่ที่ $E_F(0)$ ที่ระดับพลังงานสูงกว่า $E_F(0)$ จะมีแต่ความว่าง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอิเล็กตรอนที่ครอบครองพลังงานที่ต่ำกว่า E_F ได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นทำให้อิเล็กตรอนสามารถขึ้นไปครอบครองสถานะพลังงานที่สูงกว่า E_F เป็นสาเหตุของการโค้งงอของระดับ การลดลงของระดับเฟอร์มิแสดงดังสมการ คือ

$$E_F(T) = E_F(0) - \frac{\pi^2 k^2 T^2}{12 E_E} \quad (2.7)$$

และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไป

$$E_F(T) = E_F(0) - \frac{\pi^2 k^2 T^2}{6 E_E} \frac{d(\ln N(E))}{dE} \quad (2.8)$$

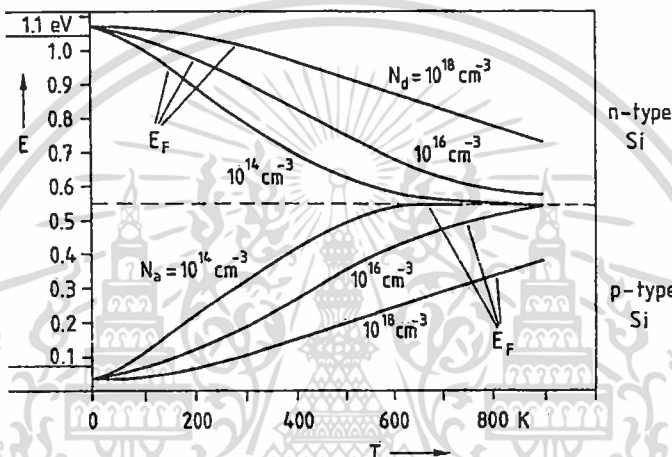
จากสมการอธิบายการลดลงของระดับเฟอร์มิเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ที่ปลายแท่งโลหะได้รับความร้อนมีผลให้ระดับเฟอร์มิอยู่ต่ำกว่าปลายด้านเย็นมีอิเล็กตรอนไหลจากปลายด้านร้อนไปยังปลายด้านเย็นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คเป็นบวกซึ่งตรงกันข้ามกรณีของการแพร่ของประจุพาหะเมื่อได้รับความร้อนแสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงการเปลี่ยนระดับเฟอร์มิและแพร่ของอิเล็กตรอน

2.2.1.4 ปฏิกิริยาการขึ้นเบ็คในสารกึ่งตัวนำซิลิคอน

ในการเปรียบเทียบขนาดสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นเบ็คระหว่างสารกึ่งตัวนำกับโลหะนั้นสารกึ่งตัวนำจะมีค่าสูงกว่าโลหะมาก ซึ่งซิลิคอนเป็นสารกึ่งตัวนำอีกชนิดหนึ่งที่น่าไปใช้สร้างเป็นวงจรรวม (IC) นอกจากนี้ยังมีประโยชน์อีกข้อหนึ่งของซิลิคอนมีคุณสมบัติคือสามารถพัฒนาใช้กับโครงสร้างใหม่ๆ ได้ เมื่อนำแท่งซิลิคอนมาทำให้มีความแตกต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้งสองด้านจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับเฟอร์มีที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ แสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ของตำแหน่งเฟอร์มีในช่วงแบนด์กับของซิลิคอนที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารเจือ ND และ NA

จากรูปที่ 2.14 สามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลงของระดับเฟอร์มี ปฏิกิริยาการไฟฟ้าความร้อนที่เกิดจากการเปลี่ยนระดับเฟอร์มีจะมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นเบ็คมาก สำหรับซิลิคอนชนิดเอ็นจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นเบ็คเป็นลบและซิลิคอนชนิดพีได้ค่าที่ขึ้นเบ็คเป็นบวก ดังนั้นการวัดค่าสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นเบ็คสามารถใช้บอกชนิดและความเข้มข้นของสารเจือซิลิคอนได้

สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ปลายด้านหนึ่งของแท่งเป็นสาเหตุทำให้มีประจุพาหะเพิ่มขึ้นเพราะว่า โสลและอิเล็กตรอนมีพลังงานเพิ่มขึ้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของโซลและอิเล็กตรอนที่ต่างกัน (ค และ ง) และขนาดของแถบพลังงานเองก็มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมีผลต่อตำแหน่งของเฟอร์มี (ก) สามารถประค่าสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นเบ็คสำหรับซิลิคอนชนิดเอ็น

$$\alpha(a) = \frac{1}{q} \frac{d E_F}{dT} = -\frac{k}{q} \left(\ln \frac{N_c}{N_d} + \frac{3}{2} \right) \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ N_c คือความหนาแน่นของสถานะพลังงานในชั้นของคอนดักชัน N_d คือความหนาแน่นของอะตอมสารเจือและ k คือค่าคงที่โบลซ์แมน จากการเปลี่ยนแปลงระดับของเฟอร์มีมีผลที่ตามมาคือ (ง) และ (จ) อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ประจุพาหะมีพลังงานจลน์เพิ่มขึ้นและเคลื่อนยังบริเวณที่เย็นกว่า นอกจากนั้นยังเกิดการกระเจิงของประจุพาหะซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิ ดังสมการ

$$\alpha(d) = -\frac{k}{q}(1+s) \quad (2.10)$$

โดยที่ s คือความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการชนเฉลี่ยระหว่างการชนและพลังงานงานของประจุพาหะ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะเกิดการไหลของโฟนอนจากปลายด้านร้อนไปด้านเย็น(ข) การสั่นของโฟนอนสามารถถ่ายเทโมเมนตัมของประจุพาหะทำให้เกิดการลาก(drag)ของประจุพาหะ แสดงดังสมการ

$$\alpha(f) = -\frac{k}{q}\phi \quad (2.11)$$

โดยที่ ϕ คือ ค่าโฟนอนดรากร

สำหรับซิลิคอนชนิดเอ็นได้ค่าสัมประสิทธิ์ซีบีครวมเป็น

$$\alpha = -\frac{k}{q} \left(\ln \frac{N_c}{N_d} + \frac{5}{2} + S_n + \phi_n \right) \quad (2.12)$$

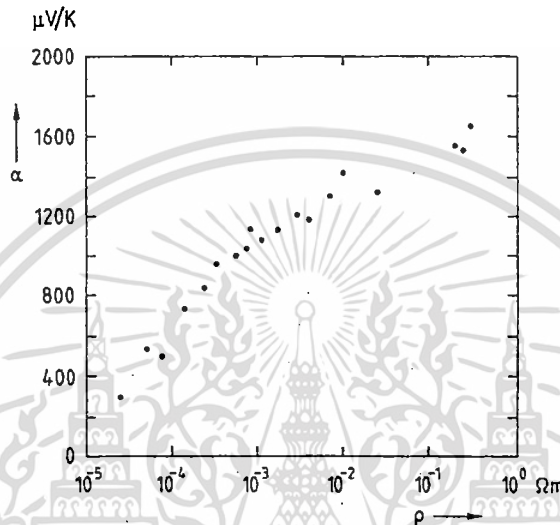
สำหรับซิลิคอนชนิดพีได้ค่าสัมประสิทธิ์ซีบีครวมเป็น

$$\alpha = -\frac{k}{q} \left(\ln \frac{N_v}{N_a} + \frac{5}{2} + S_p + \phi_p \right) \quad (2.13)$$

ในทางปฏิบัติการหาค่าสัมประสิทธิ์ซีบีของซิลิคอน (α) จะใช้ความสัมพันธ์ของสภาพความต้านทานไฟฟ้า (resistivity) ρ ซึ่งสามารถประมาณได้ดังสมการ

$$\alpha_s = \frac{mk}{q} \ln\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right) \quad (2.14)$$

โดยที่ m คือค่าคงที่ มีค่าประมาณ 2.6 และ ρ_0 extrapolated Si resistance zero α_s ($5 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$) ดังแสดงรูปที่ 2.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ซีบีคของซิลิกอนผลึกเดี่ยว ที่อุณหภูมิ 300 องศาเคลวิน กับสภาพความต้านทานที่เปลี่ยนไป



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ซีบีคเทียบกับสภาพความต้านทานซิลิกอน

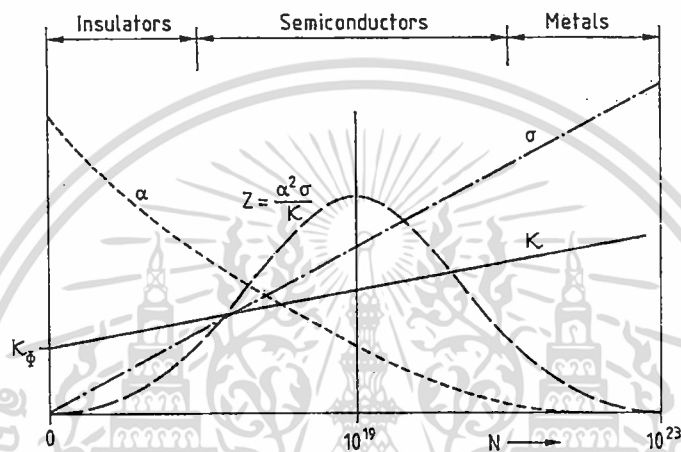
ปรากฏการณ์เบ็คในสารกึ่งตัวนำและโลหะ โดยค่าสัมประสิทธิ์ซีบีคของสารกึ่งตัวนำจะมีค่าสูงกว่าโลหะมาก ต่อมาได้มีการนำเสนอค่า efficient energy converter converters โดย Professor A.V. Joffe เป็นโครงสร้าง thermoelectric energy converters สำหรับ power converter ที่เรียกว่า figure of merit Z แสดงดังสมการ

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{K} \quad (2.15)$$

โดยที่ α คือค่าสัมประสิทธิ์ซีบีค σ คือค่าความนำไฟฟ้าและ K คือค่าการนำความร้อน สำหรับประสิทธิภาพของ power converters ของวัสดุที่มีการนำไฟฟ้าสูงและการนำความร้อนต่ำจะทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิสูง แต่ในทางปฏิบัติคุณสมบัติการนำทั้งสองอย่างขึ้นตรงกับความหนาแน่นของประจุพาหะ สำหรับวัสดุที่เหมาะสมคือสารกึ่งตัวนำที่สามารถเติมอะตอมสารเจือให้มีความเข้มข้นสูงเพราะว่าคุณสมบัติของวัสดุจะมีโฟนอนที่ทำให้ค่าการนำความร้อนลดลง จากรูปที่ 2.16 เป็นการเปรียบเทียบของ จนวน สารกึ่งตัวนำและโลหะ ความสำคัญของค่าคงที่ ที่ได้จากการ

คำนวณจาก figure of merit Z ได้แสดงความสัมพันธ์ของ Z และ ค่าความหนาแน่นของประจุพาหะ โดย K_0 คือค่าฟิโนน K คือค่าการนำความร้อนนี้ไม่ขึ้นกับความหนาแน่นของประจุพาหะ

จากความสัมพันธ์ของกราฟทำให้คาดการณ์ความสัมพันธ์ความหนาแน่นของประจุพาหะที่เพิ่มขึ้นและถ้าความหนาแน่นประจุพาหะเพิ่มขึ้นทำให้ค่า Z เพิ่มขึ้นด้วยเพราะว่าระดับของเฟอร์มิเปลี่ยนแปลงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ซีบีลดลงพร้อมกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารเจือ จากกราฟ แสดงค่า Z สูงสุดในช่วงความหนาแน่นของสารเจือระหว่าง 10^{18} ถึง 10^{21} cm^{-3}



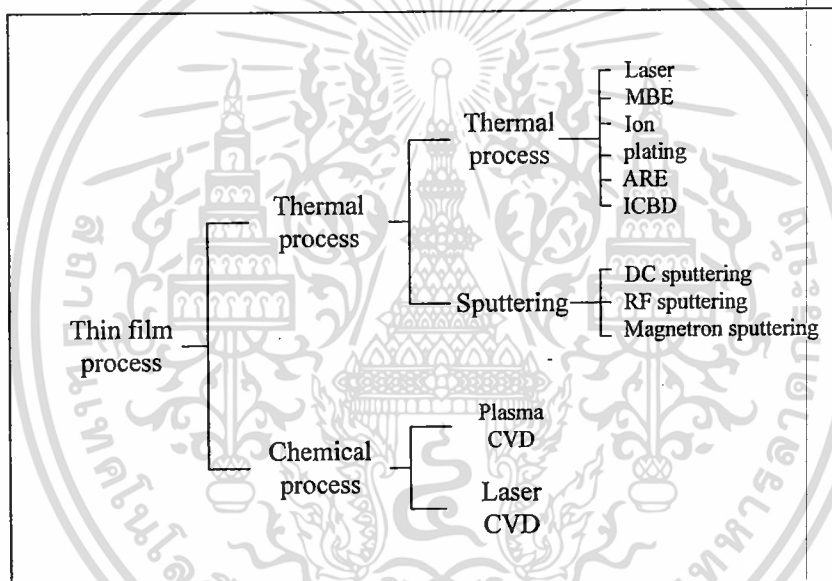
รูปที่ 2.16 การเปรียบเทียบของ ฉนวน สารกึ่งตัวนำและโลหะ

บทที่ 3

การสร้างฟิล์มบาง (thin film fabrication)

3.1 ระบบการสร้างฟิล์มบาง

การสร้างฟิล์มบางโดยกระบวนการพอกพูน (deposition) นั้นมีอยู่หลายเทคนิคที่นิยมนำมาใช้กันแต่ ถ้าแบ่งตามกลไกการก่อตัวของชั้นฟิล์มบางแล้ว สามารถแบ่งออกได้ 2 วิธี 1. การก่อตัวจากการระเหยทางกายภาพ (Physical Vapor Deposition : PVD) 2. การก่อตัวจากการระเหยทางเคมี (Chemical Vapor Deposition : CVD) และในแต่ละวิธีก็ยังมีกระบวนการหรือวิธีการอื่นๆ อีก ดังในรูปที่ 3.1



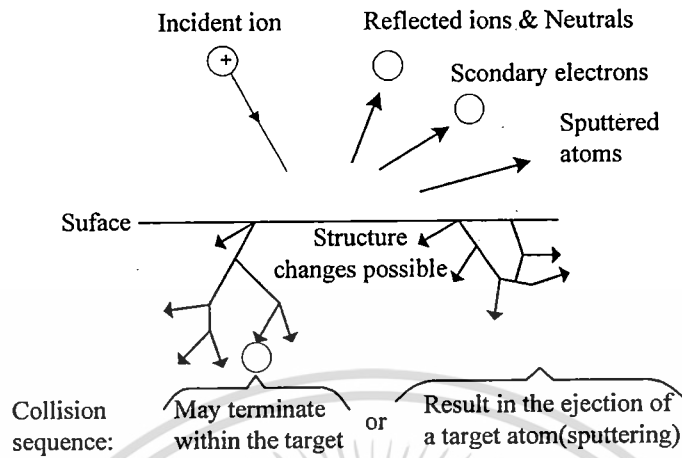
รูปที่ 3.1 เทคโนโลยีการสร้างฟิล์มบางโดยการปลูกผลึกชนิดต่าง ๆ

3.2 สปีดเตอร์ริง

3.2.1 ความหมายของสปีดเตอร์ริง

สปีดเตอร์ริง (Sputtering) หรือ สปีดเตอร์ เป็นคำศัพท์ที่กล่าวถึง กลไกที่ทำให้อะตอม (Atom) หลุดออกจากผิวอิเล็กโทรด (Electrode) ซึ่งเป็นวัสดุใด ๆ อันเนื่องจากการถูกชนด้วยอนุภาคประจุที่มีพลังงานสูงก็คือเป้านั่นเอง อะตอมที่หลุดออกไปนั้นจะเกิดการพอกพูน (Deposited) ขึ้นบนฐานรอง (Substrate) ในลักษณะของฟิล์ม การสปีดเตอร์ริงนั้นสามารถทำได้กับวัสดุหลายอย่างทั้งชนิดตัวนำ (Metal) ฉนวน (Insulator) สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) และโลหะผสม (Alloy)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 กลไกที่เกิดขึ้นเมื่อไอออนบวกชนผิวของเป้า

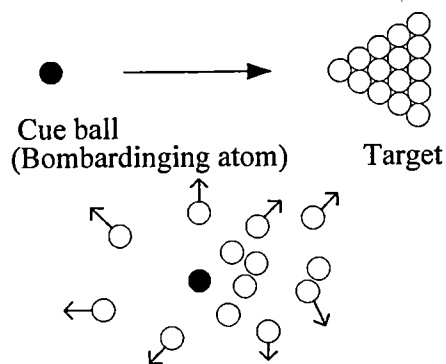
เมื่อเป้าที่เป็นของแข็งถูกชนโดยไอออนบวกจะเกิดปรากฏการณ์ดังในรูปที่ 3.2 คือ

- ไอออนบวกที่เข้าชนสะท้อนกลับ หรือถูกทำให้เป็นกลางขณะชน
- มีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron emission)
- ไอออนบวกที่เข้าชนมีการฝังตัวในเป้า (ion implantation)
- มีการจัดโครงสร้างใหม่ภายในเป้า
- มีการชนกันอย่างต่อเนื่อง (collision cascade) ระหว่างอะตอมของเป้าแล้ว จะทำให้อะตอมบริเวณผิวหน้าของเป้าถูกกระแทกหลุดออกที่เป็นปรากฏการณ์สปัตเตอร์ริง

การเกิดปรากฏการณ์ในแต่ละแบบนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดและพลังงานของไอออนบวกที่เข้าชน

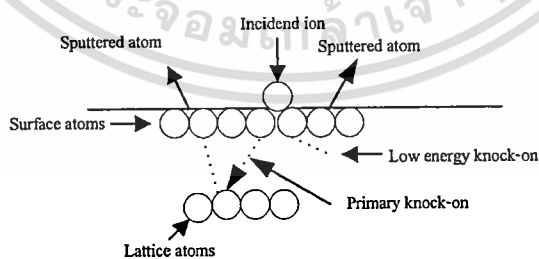
สำหรับในกรณีการเกิดสปัตเตอร์ริงจะเกิดได้ดีในช่วงพลังงานของไอออนบวกประมาณ 100 อิเล็กตรอน โวลต์ถึง 10 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์

กลไกของการสปัตเตอร์ริงอาจเปรียบเทียบได้กับการชนของลูกบิลเลียด ดังรูปที่ 3.3 พิจารณาให้อนุภาคทั้งหมดเป็นทรงกลมแข็ง โดยให้ไอออนบวกเป็นลูกขาว (cue ball) และให้อะตอมที่ผิวของเป้าเป็นลูกสี (colored ball) ที่เรียงกันเป็นระเบียบ การชนของลูกขาวจะทำให้ลูกสีกระทบกันเป็นทอดๆ แล้วกระเจิงออกทุกทิศทางรวมทั้งในทิศย้อนกลับสู่ผู้เล่นด้วย ซึ่งเทียบได้กับอะตอมถูกสปัตเตอร์ริงออกจากเป้าในความเป็นจริงจะมีแรงระหว่างอะตอมซึ่งจะแตกต่างจากรณีของลูกบิลเลียด แต่แบบการจำลองการชนนี้ก็สามารรถอธิบายได้ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด



รูปที่ 3.3 การสปีดเตอร์ริงเปรียบเทียบเหมือนกันชนด้วยลูกบิลเลียด

การที่ไอออนบวกชนเป้าแล้วมีการถ่ายทอด โมเมนตัม ให้กับอะตอมของผิวเป้าที่อยู่นิ่งเป็น กลไกที่นำไปสู่การสปีดเตอร์ริงอะตอมออกจากผิวของเป้าซึ่งดังรูปที่ 3.4 ในการชนไอออนบวกจะ ชนผิวของเป้า 2 หรือ 3 อะตอมเกือบพร้อม ๆ กัน อะตอมที่ถูกชนตอนแรกยังไม่ถูกสปีดเตอร์ริงแต่ เป็นอะตอมข้างเคียงอะตอมที่ถูกชนการชนจะมีสองลักษณะคือ แบบแรก อะตอมถูกชนในลักษณะ low energy knock-on องค์ประกอบของ โมเมนตัมส่วนใหญ่จะอยู่ในแนวขนานกับผิวของเป้า มีการ เคลื่อนตัวในแนวเฉียงด้านข้างกระแทกอะตอมที่ผิวของเป้าซึ่งมีอยู่ให้หลุดออก เป็นการชนเพียง ครั้งเดียว แบบที่สอง อะตอมถูกชนในลักษณะ primary knock-on องค์ประกอบของ โมเมนตัมส่วนใหญ่จะอยู่ในแนวพุ่งเข้าสู่เป้า อะตอมจะเคลื่อนตัวลงไปชนกับอะตอมในชั้นถัดไป ทำให้ตัวมันเอง สะท้อนกลับไปกระแทกอะตอมที่ผิวของเป้าให้หลุดออก หรือมีการชนต่อไปอย่างต่อเนื่อง จนทำ ให้อะตอมอื่นได้รับ โมเมนตัมในทิศทางเปลี่ยนไปมากกว่า 90 องศา เมื่อเทียบกับ โมเมนตัมของ ไอออนบวกที่เข้าชน อะตอมเหล่านี้ก็จะกระแทกอะตอมที่ผิวของเป้าให้หลุดออกในที่สุด



รูปที่ 3.4 การถ่ายทอด โมเมนตัม ในกระบวนการสปีดเตอร์ริง

พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายการสปีดเตอร์ริงเชิงปริมาณ คือ อัตราสปีดเตอร์ริง (sputtering yield : S) เป็นปริมาณที่บอกถึงจำนวนอะตอมของเป้าที่หลุดออกต่อการชนของไอออนบวก 1 ตัว

อัตราสปีดเตอร์ริงขึ้นกับชนิดพลังงานและทิศทางของไอออนบวกที่เข้าชนกับเป้า ในกรณีที่ไอออนบวกมีพลังงานสูงพอที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเป้าได้ การสปีดเตอร์ริงจะเพิ่มขึ้นตามพลังงานของไอออนบวก อย่างไรก็ตาม การสปีดเตอร์ริงจะลดลงเมื่อพลังงานของไอออนบวกเพิ่มขึ้นถึงค่าหนึ่ง หลังจากนั้นจะคงที่หรือลดลงเล็กน้อย การสปีดเตอร์ริงจะเพิ่มขึ้นตามพลังงานของไอออนบวกที่เข้าชนกับเป้า ในกรณีที่ไอออนบวกมีพลังงานสูงพอที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเป้าได้ การสปีดเตอร์ริงจะเพิ่มขึ้นตามพลังงานของไอออนบวก อย่างไรก็ตาม การสปีดเตอร์ริงจะลดลงเมื่อพลังงานของไอออนบวกเพิ่มขึ้นถึงค่าหนึ่ง หลังจากนั้นจะคงที่หรือลดลงเล็กน้อย การสปีดเตอร์ริงจะเพิ่มขึ้นตามพลังงานของไอออนบวกที่เข้าชนกับเป้า

บวกเข้าชนเป้าในทิศตั้งฉากกับระนาบของเป้าที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมแบบสุ่ม จาก
แบบจำลองการชนแบบยืดหยุ่นอัตราการสปีดเตอร์ริง ในช่วงพลังงานของไอออนบวกน้อยกว่า 1
กิโลอิเล็กตรอน โวลต์ เขียนได้ดังสมการ

$$S = \frac{3\alpha}{4\pi^2} \frac{4m_i m_t E_i}{(m_i + m_t)^2 E_b} \quad (3.1)$$

และในช่วงพลังงานของไอออนบวกสูงกว่า 1 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์ เขียนได้สมการ

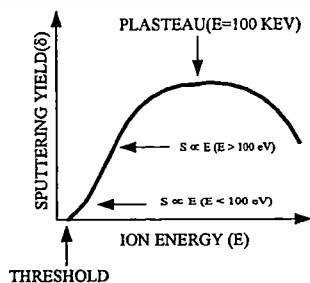
$$S = 3.5\alpha \frac{(Z_i Z_t)(m_i m_t)}{(Z_i^2 + Z_t^2)(m_i + m_t) E_b} S_n(E_i) \quad (3.2)$$

โดย m_i และ E_i เป็นมวลและพลังงานจลน์ของไอออนบวก
 M_t และ E_t เป็นมวลของอะตอมเป้าและพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมที่ผิวของเป้า
หรือพลังงานการระเหิด (heat of sublimation)

Z_i และ Z_t เป็นเลขอะตอมของไอออนบวกและอะตอมของเป้า

α เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้วัดการส่งผ่าน โมเมนตัมในขณะชน มีค่าขึ้นกับอัตราส่วน
 m_i / m_t โดย α จะเท่ากับ 0.17 เมื่ออัตราส่วน m_i / m_t เท่ากับ 0.1 และจะเพิ่มขึ้นเป็น 1.4 เมื่อ
อัตราส่วน m_i / m_t เท่ากับ 10

$S_n(E_i)$ คือ reduced stopping power เป็นพารามิเตอร์ที่วัดการสูญเสียพลังงานงานไอออน
บวกต่อหน่วยระยะทาง และเป็นฟังก์ชันกับพลังงานของไอออนบวก รวมทั้งมวลและเลขอะตอม
ของอนุภาคที่เกี่ยวข้อง เมื่อไอออนบวกมีพลังงานสูงอัตราการสปีดเตอร์ริงค่อนข้างจะคงที่
เนื่องจาก $S_n(E_i)$ มีแนวโน้มเป็นอิสระจากพลังงานของไอออนบวก



รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราสปีดเตอร์ริงกับพลังงานไอออนบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการทั้งสองข้างต้น แสดงถึงความสัมพันธ์ของอัตราสปีดเตอริงกับพารามิเตอร์ ต่างๆ ของไอออนบวกและเป้าที่เกี่ยวข้องในกระบวนการสปีดเตอริง รูปที่ 3.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราสปีดเตอริงกับพลังงานของไอออนบวก จะเห็นว่า เป้าจะเริงถูกสปีดเตอริงเมื่อถูกชนด้วยไอออนบวกที่มีพลังงานสูงเท่ากับพลังงานขีดเริ่ม (threshold energy) ของการสปีดเตอริง ในช่วงพลังงานของไอออนบวกที่มีค่าใกล้กับพลังงานขีดเริ่ม ($E_i < 100$ อิเล็กตรอน โวลต์) อัตราสปีดเตอริงจะแปรผันตามพลังงานของไอออนบวกยกกำลังสองและเพิ่มแบบเชิงเส้นในช่วงพลังงานของไอออนบวกระหว่าง 0.1 ถึง 1 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์ หลังจากนั้นจะเพิ่มช้าลงและคงที่ในช่วงพลังงานของไอออนบวกระหว่าง 10 ถึง 100 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์ หากเพิ่มพลังงานไอออนบวกต่อไปอัตราสปีดเตอริงจะลดลง เนื่องจากไอออนบวกมีพลังงานสูงเมื่อชนเป้าจะฝังตัวลึกและสูญเสียพลังงานอย่างรวดเร็ว หากพิจารณาการใช้งานแล้วช่วงพลังงานไอออนบวกที่เหมาะสมที่สุดใน การสปีดเตอริงอยู่ในช่วงพลังงานของไอออนบวกน้อยกว่า 1 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์

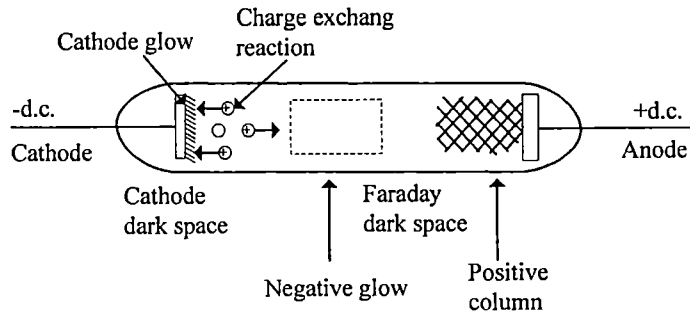
3.2.2 สภาวะพลาสมา

พลาสมาคือ ก๊าซที่เกิดการแตกตัว (ionized gas) ให้ประจุบวกและประจุลบในจำนวนที่เท่า ๆ กัน โดยมี neutron atom ปะปนอยู่บ้าง

Negative Charge – electrons

Positive Charge – positive ions

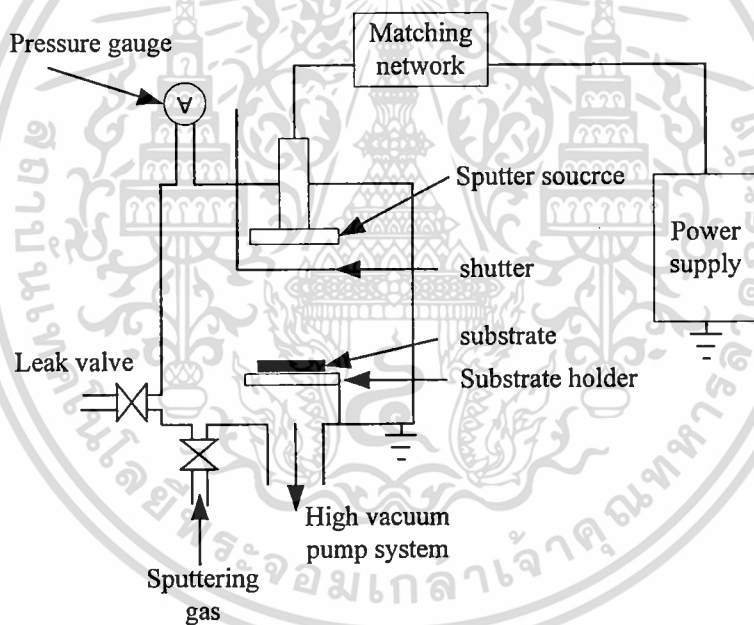
กรรมวิธีในการทำพลาสมานั้นหลายทาง แต่ทุกวิธีจะต้องจ่ายพลังงานเข้าไปซึ่งในกระบวนการผลิตพลาสมานั้นมักใช้ก๊าซ (gas phase) ในการ Transition เนื่องจาก Electric Ionization ของก๊าซมักจะถูกนำมาใช้ทำก๊าซดิสชาร์จ (gas discharge) บ่อยๆ ซึ่งก๊าซดิสชาร์จเป็นคำที่ใช้เรียกสภาวะที่ก๊าซเกิดการนำ กระแสไฟฟ้าได้พลาสมาโกลว์ดิสชาร์จ คือ Self-sustaining plase) ในการ Transition เนื่องจาก Electric Ionization ของก๊าซมักจะถูกนำมาใช้ทำก๊าซดิสชาร์จ (gas discharge) บ่อยๆ ซึ่งก๊าซดิสชาร์จเป็นคำที่ใช้เรียกสภาวะที่ก๊าซเกิดการนำ กระแสไฟฟ้าได้พลาสมาโกลว์ดิสชาร์จ คือ Self-sustaining plasma ในรูปที่ 4.6 ดังแสดงถึงระบบ DC diode type อย่างง่าย ๆ ที่ใช้คุณสมบัติของการก่อเกิดประจุ (Glow discharge) ภายในหลอดแก้วจะต้องทำสุญญากาศและเติมก๊าซเฉื่อย (Inert gas) ซึ่งก๊าซที่มีคุณสมบัติไม่ติดไฟไม่กัดกร่อนเมื่อผสมกับออกซิเจนและในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะการใช้ก๊าซอาร์กอน (Ar gas) เนื่องจากมีมวลหนักเหมาะแก่การทำ Ions Bombardment เข้าไปจนเกิดแรงดันต่ำ ๆ ภายในหลอดแก้วมีอิเล็กโตรดอยู่สองอัน บรรจุภายในหลอดอันได้แก่ ขั้วที่มีไฟบวกเรียกว่า แอโนด (anode) ส่วนขั้วที่มีไฟลบ เรียกว่า แคโทด (cathode) ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงคร่อมเพื่อทำให้เกิดพลาสมา



รูปที่ 3.6 โครงสร้างของระบบไดโอดไฟฟ้ากระแสตรง

3.2.3 โครงสร้างของระบบเคลือบฟิล์มวิธีสปัตเตอร์ริง

ระบบสปัตเตอร์ริงในที่ใช้อยู่ปัจจุบันนี้มีหลายรูปแบบ โดยมีชื่อแตกต่างกันไปแล้วแต่รูปแบบการคัดแปลงการใช้งานดังตัวอย่างที่กล่าวมาแล้วนั้นอย่างไรก็ตามระบบเหล่านี้มีโครงสร้างดังรูปที่ 4.7 ซึ่งประกอบด้วย



รูปที่ 3.7 ลักษณะทั่วไปของระบบเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอร์ริง

- ภาชนะสุญญากาศ (vacuum chamber) สำหรับบรรจุก๊าซของการดีสชาร์จ แล้วติดตั้งส่วนประกอบอื่นๆ ทำจาก แก้ว สเตนเลส หรือโลหะผสม ที่ผ่านการตรวจสอบสุญญากาศแล้ว
- ระบบปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump system) ที่มีความสามารถปั๊มความดันลงได้ต่ำกว่า 10^{-6} torr ทัวไปเป็นระบบผสมระหว่างปั๊มแบบโรตารีกับปั๊มแพร่ไอน้ำมัน หรือปั๊มแบบโรตารีกับปั๊มเทอร์โบโมเลคิวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หัววัดความดันก๊าซ (pressure gauge) ในสถานะสุญญากาศ พร้อมด้วยระบบวัดและแสดงผลทั้งในย่านความดันต่ำและความดันใช้งาน
- วาล์วปล่อย (leak valve) วาล์วที่ใช้สำหรับปล่อยให้อากาศไหลเข้าภายในสถานะสุญญากาศ
- แหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์ริง (sputtering source) ประกอบด้วยเป้าและพร้อมแท่นยึด
- แหล่งจ่ายไฟฟ้า (power supply) ที่ใช้งานในระบบนี้คือ ชนิดกระแสสลับ (RF power supply) ความถี่ 13.56 เมกะเฮิร์ตซ์ สำหรับระบบอาร์เอฟสปัตเตอร์ริง
- หน้ากาก (shutter) ใช้สำหรับเปิดปิดฟลักซ์ของอะตอมที่หลุดจากแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์ริง
- แท่นวางวัสดุรองรับ (substrate holder) สำหรับวางวัสดุรองรับฟิล์ม
- แหล่งก๊าซสปัตเตอร์ริง (sputtering) จะต้องเป็นก๊าซที่ไม่ทำปฏิกิริยากับเป้าและฟิล์มที่เกิดขึ้น หรือส่วนประกอบอื่นๆ ในสถานะสุญญากาศ นอกจากนี้ ต้องไม่เป็นพิษและควรมีมวลมากพอที่จะทำให้ได้อัตราการสปัตเตอร์ริงที่สูง ที่ใช้กันอยู่ทั่วไป ก็คือก๊าซอาร์กอนเพราะไม่เป็นพิษ หาง่ายและราคาถูก แต่ยังไม่ใช่ก๊าซเฉื่อยที่มีมวลมากที่สุด
- วงจรแมชชิง (match network) สำหรับเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งกำลังไฟฟ้าและป้องกันแหล่งกำเนิด ในกรณีของอาร์เอฟ สปัตเตอร์ริง
- ตัวทำความร้อน (heater) สำหรับเพิ่มอุณหภูมิวัสดุรองรับพร้อมด้วยระบบวัดและควบคุมอุณหภูมิแหล่งจ่ายไฟฟ้า

3.2.4 อัตราการเคลือบฟิล์ม

อัตราการเคลือบฟิล์ม คือ ความหนาของฟิล์มต่อหน่วยเวลา ขึ้นกับปริมาณอะตอมของเป้าที่ถูกสปัตเตอร์ริง และสภาพการชนของอะตอมเหล่านี้ไปยังวัสดุที่รองรับ อัตราการเคลือบฟิล์มจะสัมพันธ์กับกระแส ความต่างศักย์ และความดันก๊าซ ในสภาวะการโกลด์คิสซาร์จ และยังขึ้นกับระยะระหว่างเป้ากับวัสดุรองรับ

เนื่องจากกระแส ความต่างศักย์ และความดันก๊าซ เป็นปริมาณที่ขึ้นต่อกัน การวัดผลกระทบของตัวแปรตัวใดตัวหนึ่งนั้นไม่สามารถทำได้ ในทางปฏิบัติจึงละเลยตัวแปรที่มีผลน้อยที่สุด การควบคุมตัวแปรอีกตัวหนึ่งให้คงที่แล้วจึงศึกษาผลจากตัวแปรที่สนใจ เช่นการทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบกับกำลังไฟฟ้าที่ความดันคงที่ กำลังไฟฟ้าที่นี้เป็นการรวบรวมผลของกระแสและความต่างศักย์ของการดิสซาร์จเข้าด้วยกัน วิธีนี้ใช้กันมากในระบบอาร์เอฟสปัตเตอร์ริง สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบกับกำลังไฟฟ้า (P) ความดันก๊าซ (P') และระยะจากเป้าถึงวัสดุรองรับ (1) ได้ในรูปของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R \propto \frac{P}{P' l} \quad (3.3)$$

3.2.5 โครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบาง (microstructure of thin film)

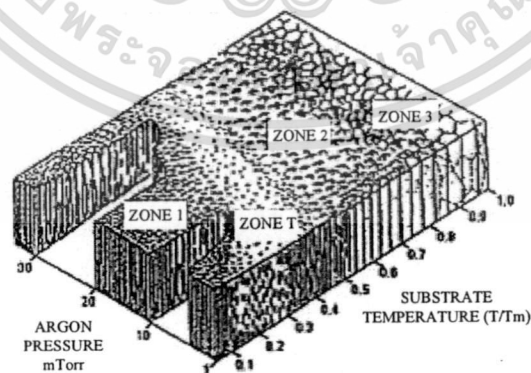
โครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบางที่ได้จากการสปีดเตอร์ริงนั้น สามารถแบ่งได้เป็น 4 โซนตามอัตราส่วน T_s/T_m และความดันก๊าซ เมื่อ T_s เป็นอุณหภูมิของวัสดุรองรับ และ T_m เป็นจุดหลอมเหลวของวัสดุต้นกำเนิดฟิล์ม ดังรูปที่ 3.8

โครงสร้างโซน 1 ประกอบด้วยแท่งเกรนเรียว (tapered column grain) เรียงกันอย่างหลวม ๆ ระหว่างเกรนเหล่านี้มีช่องว่าง (void) ค่อนข้างมากที่มีลักษณะผิวหน้าขรุขระ เสถียรภาพต่ำ โครงสร้างภายในไม่ชัดเจน และคุณสมบัติต่างจากคุณสมบัติของ bulk มาก โครงสร้างของฟิล์มแบบนี้เกิดจาก อัตราส่วน T_s/T_m น้อยกว่า 0.3

โครงสร้างโซน 2 ประกอบด้วย column grain อัดกันค่อนข้างแน่น เกิดจาก T_s/T_m มีค่าระหว่าง 0.3 ถึง 0.5 อุณหภูมิรองรับในระดับนี้ทำให้การเติมอะตอมในที่ว่างเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพความกว้างของเกรนจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิวัสดุรองรับและอาจขยายได้ตลอดตามแนวความหนาของฟิล์ม โครงสร้างแบบนี้แสดงความแกร่งเชิงกลสูง

โครงสร้างโซน 3 เกิดขึ้นเมื่อ T_s/T_m สูงกว่า 0.5 ประกอบด้วยเกรนที่สม่ำเสมอ และมีสมบัติใกล้เคียงกับ bulk

โครงสร้างโซน T เกิดขึ้นเมื่อฟิล์มในโครงสร้างโซน 1 ที่เคลือบบนวัสดุรองรับความเร็วอนันต์และ T_s/T_m เป็นศูนย์ ประกอบด้วย poorly defined fibrous grains อัดกันแน่นโดยไม่มีช่องว่างตรงรอยต่อ เป็นฟิล์มที่มีผิวเรียบ ความหนาแน่นสูง



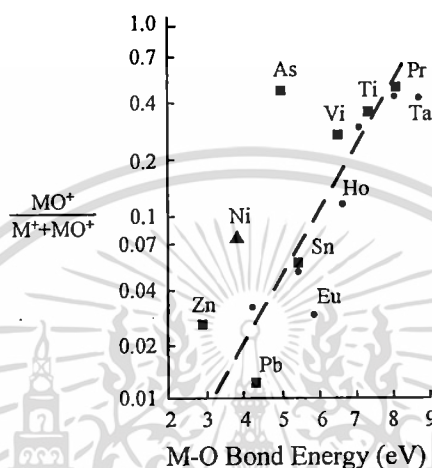
รูปที่ 3.8 แบบจำลองโครงสร้าง (Zone model) แสดงอิทธิพลของวัสดุรองรับและความดันก๊าซ

อาร์กอนที่มีต่อโครงสร้างของฟิล์มบางที่ทำการเคลือบด้วยวิธีสปีดเตอร์ริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.6 การสปีดเตอริงเป่าที่เป็นสารประกอบ

การสปีดเตอริงเป่าที่เป็นสารประกอบเคมี เช่นในกรณีของโลหะออกไซด์ เป่ามีโอกาที่จะถูกสปีดเตอริงเป็นได้ทั้งอะตอมหรือโมเลกุล โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนไอออนของอะตอมโลหะและไอออนของโมเลกุลคู่ของโลหะออกไซด์ (MO^+) ต่อไอออนทั้งหมดที่ถูกสปีดเตอริงออกมาสามารถเขียนได้เป็น



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของไอออนโมเลกุลคู่ ($MO^+/M^+ + MO^+$) กับพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะของโลหะออกไซด์

$$\eta = \frac{MO^+}{(M^+ + MO^+)} \quad (4.5)$$

สำหรับโลหะ M รูปที่ 3.9 แสดงให้เห็นว่า η ขึ้นกับความแข็งแรงของพันธะของโลหะออกไซด์ M-O ดังจะเห็นว่าความแข็งแรงของพันธะไอออนโลหะออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นจะลดการแตกตัวของโมเลกุลลง η จะเป็นตัวกำหนดและวัดสำหรับไอออนโมเลกุลที่ถูกสปีดเตอริงออกมา ซึ่งสัมพันธ์กับโมเลกุลที่เป็นกลางที่ให้ผลไม่แตกต่างกันมาก นอกจากนี้ η ยังขึ้นกับความดันที่ใช้สปีดเตอริง เมื่อความดันที่เพิ่มขึ้นจะทำให้สัดส่วน η ลดลง และที่ความดันเป็นศูนย์แสดงให้เห็นถึงสัดส่วนของไอออนที่อยู่ในบริเวณเป่าพลังงานของไอออนบวกที่เข้าชนกับเป่า หากมีพลังงานมากพอที่จะส่งให้คู่ของโมเลกุลแล้ว จะทำให้โมเลกุลสามารถที่จะหลุดจากเป่าเป็นคู่ได้ พลังงานที่ไอออนบวกส่งให้กับคู่ของโมเลกุลจะขึ้นกับฟังก์ชันการส่งผ่านพลังงาน ซึ่งจะมีค่าสูงสุดเมื่อมวลของไอออนที่เข้าชนเท่ากับมวลของอะตอมที่ถูกชน ในรูปที่ 3.9 โลหะเบาที่มีมวลเป็นสัดส่วนที่

น้อยเมื่อเทียบกับออกซิเจนจะเห็นได้ว่าในบริเวณใกล้เส้นประ และยังแสดงให้เห็นว่าไอออน โมเลกุลขนาดใหญ่จะขึ้นกับพันธะของโลหะออกไซด์

3.2.7 การก่อตัวเป็นฟิล์มจากการสปีดเตอริงของสารประกอบ

การสปีดเตอริงเป้าที่เป็นสารประกอบที่เป็นโลหะออกไซด์หรือสารประกอบอื่น โมเลกุลของเป้าที่ถูกสปีดเตอริงออกมาจะไม่สมบูรณ์ จึงทำให้องค์ประกอบของฟิล์มที่ได้แตกต่างจากเป้า เนื่องจากการขาดหายของอะตอมก๊าซภายในฟิล์ม และสภาพการขนส่งอะตอมไปยังวัสดุรองรับ ตัวอย่างเช่น ในการสปีดเตอริงเป้าควอทในก๊าซอาร์กอน ฟิล์มที่ได้จะมีการขาดหายของอะตอมของออกซิเจน วิธีแก้ไขการขาดหายไปของอะตอมก๊าซออกซิเจนทำได้โดยตัวอย่างเช่น สปีดเตอริงด้วยก๊าซผสมระหว่าง Ar : O₂ (85:15) ออกซิเจนที่ป้อนเข้าไปทั้งหมดจะถูกไอออไนซ์และเข้าไปจับบนฟิล์มทำให้องค์ประกอบของฟิล์มมีความสมบูรณ์มากขึ้น การไอออไนซ์ของออกซิเจนเกิดจากการถ่ายเทพลังงานจากอิเล็กตรอนภายในสภาพโกลว์ดีสชาร์จ

3.2.8 ดีซี สปีดเตอริง (DC Sputtering)

ดีซี สปีดเตอริง นั้นระบบจะประกอบไปด้วยขั้วของอิเล็กโตรดที่วางขนาดกันอยู่ในระบบ โดยที่ด้านหนึ่งของอิเล็กโตรดจะเป็นขั้วแคโทดและอีกด้านหนึ่งจะเป็นด้านแอโนด ที่ด้านบนบริเวณผิวหน้าแคโทดจะมีวัสดุรอบเป้าอยู่แล้วอีกด้านหนึ่งทางด้านของขั้วแอโนดจะทำการหล่อเย็นด้วยน้ำ โดยที่บริเวณฐานรองจะอยู่ที่ขั้วแอโนด เมื่อให้ความดันของก๊าซอาร์กอนภายในระบบ (chamber) อยู่ที่ 0.1 torr และป้อนไฟฟ้ากระแสตรงโดยต่ออนุกรมกับความต้านทาน 1 ถึง 10 กิโลโอห์ม ศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโตรดมีค่าหลายกิโลโวลต์ จะทำให้เกิดโกลว์ดีสชาร์จและไอออนของก๊าซอาร์กอนในโกลว์ดีสชาร์จจะถูกเร่งไปที่ขั้วแคโทดและเกิดการสปีดเตอริงที่เป่าจนทำให้เกิดการปลูกผลึกเป็นฟิล์มบางบนฐานรองด้านแอโนด

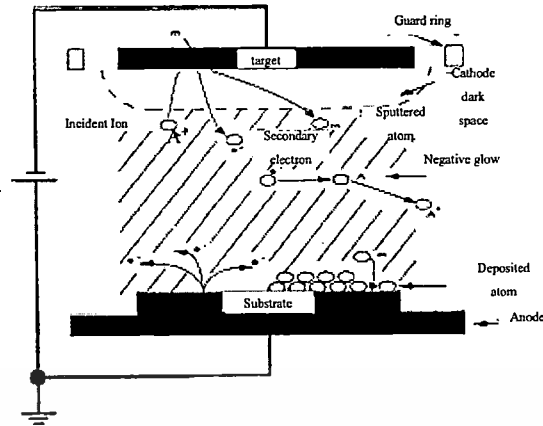
การสปีดเตอริงโดยใช้ระบบดีซีนั้นการชนของโมเลกุลก๊าซ และความดันที่ก๊าซจะมีค่าสูงเมื่อระยะที่อนุภาคชนกันมีค่าน้อยกว่าระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโตรดทั้งสอง จำนวนของอนุภาคของส่วนที่ปลูกผลึกเป็นฟิล์มบางจะอยู่บนพื้นที่ W

$$W = \frac{K_I W_o}{pd} \quad (4.5)$$

อัตราการตกผลึก R หาได้โดย

$$R = \frac{W}{t} \quad (4.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 แบบจำลองการเกิด DC diode sputtering

เมื่อ K_1 มีค่าคงที่ W_0 คือจำนวนของอนุภาคที่ถูกสปัตเตอร์ริงจากพื้นที่แคโทด p เป็นความดันก๊าซ ดิสชาร์จ d คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสอง W คือความหนาแน่นของฟิล์มที่ได้จากการสปัตเตอร์ริง จำนวนของอนุภาคที่ถูกสปัตเตอร์ริงจากพื้นที่ของขั้วแคโทด W_0 ซึ่งหาได้โดย

$$(4.7) \quad W_0 = \left(\frac{j_+}{e}\right)st\left(\frac{A}{N}\right)$$

เมื่อ j_+ คือ ความหนาแน่นของกระแสที่ขั้วแคโทด e ประจุของอิเล็กตรอน s คือสัมประสิทธิ์ในการสปัตเตอร์ริง A คือ น้ำหนักของอะตอมของวัสดุที่ถูกสปัตเตอร์ริง และ N คือค่า Avogadro's number ด้วยข้อสันนิษฐานที่ว่ากระแสไอออนจะมีค่าเข้าใกล้ กระแสดิสชาร์จ I_s และสัมประสิทธิ์ของการสปัตเตอร์ริงจะขึ้นอยู่กับแรงดันของการดิสชาร์จ V_s จำนวนอนุภาคที่ถูกสปัตเตอร์ริงทั้งหมดจะมีค่าเท่ากับ $V_s I_s t / pd$ ดังนั้นการปลูกผลึกจะขึ้นอยู่กับ $V_s I_s t$

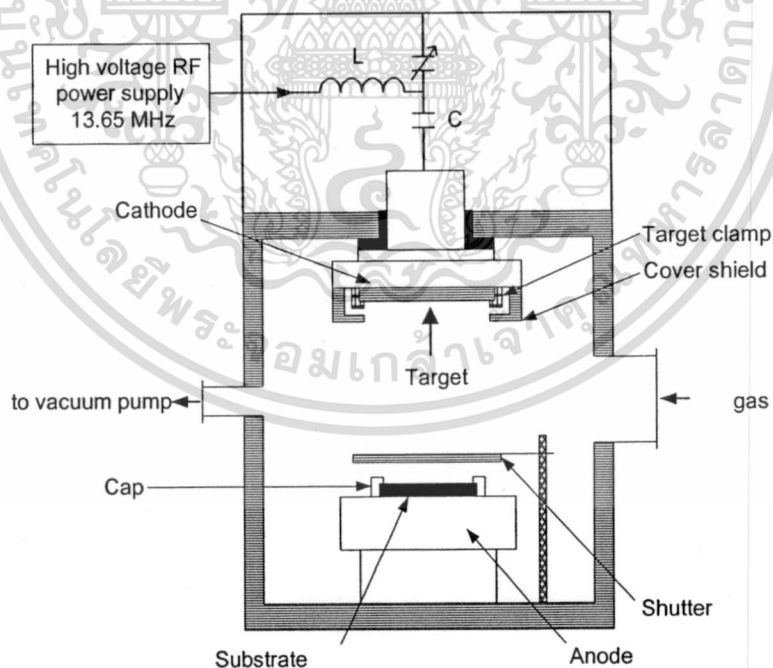
3.2.9 อาร์เอฟ สปัตเตอร์ริง (RF Sputtering)

ในการใช้เป่าฉนวนที่เป่าโลหะในระบบ ดีซี สปัตเตอร์ริงนั้น การก่อเกิดประจุ (glow discharge) จะไม่เกิดขึ้นเพราะว่าจะเกิดประจุบวกที่ผิวหน้าของฉนวน ดังนั้นการก่อเกิดประจุของเป่าฉนวนจะต้องใช้พลังงานความถี่คลื่นวิทยุแทนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งเรียกระบบนี้ว่า ระบบสปัตเตอร์ริงคลื่นความถี่วิทยุหรือ RF Spttering วิธีแก้ปัญหาคือ DC Diode Spttering ทำให้ได้จึงมีการพัฒนาเทคนิคบางอย่างขึ้นเพื่อให้สามารถใช้แคโทดที่เป็นฉนวนได้โดยใช้แรงดันไฟสลับจ่าย

เอกเส้าที่ขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งรู้จักกันในนามของ RF Sputtering โดยมีเงื่อนไขอยู่ว่า หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อิเล็กตรอนที่สูญเสียจากผิวฉนวน เนื่องจากกลไกของ คีซี โกลว์ดิสชาร์จสปัตเตอร์ริง จะถูกทดแทนเข้าเป็นจังหวะตามคาบเวลาของคลื่นไฟฟ้าสลับ
- โกลว์ดิสชาร์จจะสามารถคงสภาพอยู่ได้ภายใต้สภาพของไฟฟ้าสลับที่สามารถทดแทนอิเล็กตรอนที่สูญเสียจากผิวได้เร็วกว่าช่วงเวลาที่ดีสชาร์จจะดับ (น้อยกว่า 1 ถึง 10 ไมโครวินาที)
- สนามไฟฟ้าที่เกิดภายใน process chamber จะต้องมีค่าสูงพอที่จะทำให้ไอออนมีพลังงานจลน์แรงพอเมื่อกระทบฉนวน target แล้วเกิดการสปัตเตอร์ริง
- การสปัตเตอร์ริงที่เกิดใน process chamber ควรเกิดเฉพาะบนผิว target (ไม่ควรเกิดบนผิว ภาชนะสุญญากาศ หรือ ผิวอิเล็กโทรดที่ไม่ใช่ target
- RF power ที่ใช้จะต้องมีประสิทธิภาพพอที่จะทำให้เกิด โกลว์ดิสชาร์จสปัตเตอร์ริงที่มีอัตราการพอกพูนสูงสุด

การสปัตเตอร์ริงใน RF-discharge นั้น การสปัตเตอร์ริงในการดีสชาร์จที่ใช้คลื่นความถี่วิทยุได้พบในปี 1960 โดยพบว่าเกิดขึ้นที่ผิวแก้วเคลือบที่อดีสชาร์จสปัตเตอร์ริงในระหว่างการเกิด RF -discharge จะใช้สำหรับการสร้างฟิล์มบางและในปัจจุบันได้รับการพัฒนาเป็นอย่างมากโดยระบบดังกล่าวดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ระบบสปัตเตอร์ริงแบบ RF sputtering

ในระบบ อาร์เอฟสปัตเตอร์ริง จะต้องใช้วงจร impedance-matching ที่อยู่ระหว่างแหล่งจ่าย

พลังงานและภาชนะสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไป impedance ของแหล่งจ่ายกำลังคลื่นความถี่วิทยุ มีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม ค่า impedance ของการก่อเกิดประจุ (glow-discharge) จะอยู่ในช่วง 1 ถึง 10 กิโลโอห์ม ในอาร์เอฟ สปีดเตอร์ริง ค่าความหนาแน่นของกระแสที่เป้า I_s มีค่าเท่ากับ

$$i_s \approx \frac{CdV}{dt} \quad (3.8)$$

เมื่อ C คือค่าความจุไฟฟ้าระหว่างการเกิดดิสชาร์จ และวัสดุเป้า dv/dt คือค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงศักย์ค่าที่ผิวเป้า และเมื่อพบว่าที่เพิ่มความถี่ในการสร้างจะทำให้กระแสไอออนที่เป้ามี่ค่าเพิ่มมากขึ้น โดยในทางปฏิบัติจะใช้ความถี่เท่ากับ 13.56 MHz

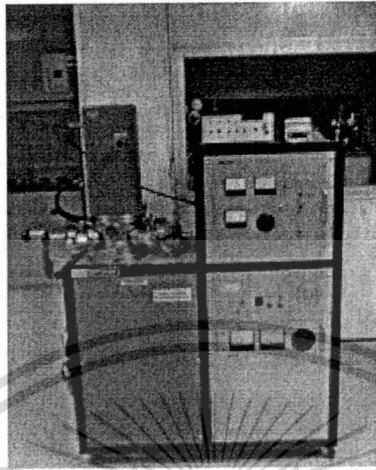
การเกิดดิสชาร์จในระบบ อาร์เอฟสปีดเตอร์ริง ความดันมีค่าต่ำอยู่ที่ 10^{-2} torr เมื่อสนามไฟฟ้าในโอกาสของการชนระหว่างโมเลกุลก๊าซและอิเล็กตรอนลำดับสองจะเกิดขึ้นจำนวนมาก ในระบบอาร์เอฟ สปีดเตอร์ริง นั้น blocking capacitor จะต่ออยู่ระหว่างวงจร match และ เป้า พื้นที่ของเป้าจะมีขนาดเล็กกว่าพื้นที่ของแอโนดและพื้นที่ของฐานรองชิ้นงานหลายๆ โครงสร้างของการวางแบบสมมาตรของอิเล็กโตรดจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าตรงที่เป้ามี่ศักย์ค่าเป็นลบ ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุให้เกิดการ สปีดเตอร์ริงในระบบอาร์เอฟ การป้อนไฟกระแสตรงจะมีค่าครึ่งหนึ่งของศักย์ดาขดคลื่นถึงคลื่นของแหล่งจ่ายพลังงานคลื่นความถี่วิทยุ สำหรับค่าสภาพความต้านทานของน้ำหล่อเย็นขั้วแคโทดจะต้องมีค่าสูงพอที่จะรักษาสภาพความเป็นฉนวนไว้ได้

3.3 เงื่อนไขที่เหมาะสมในกระบวนการสร้างฟิล์มบาง

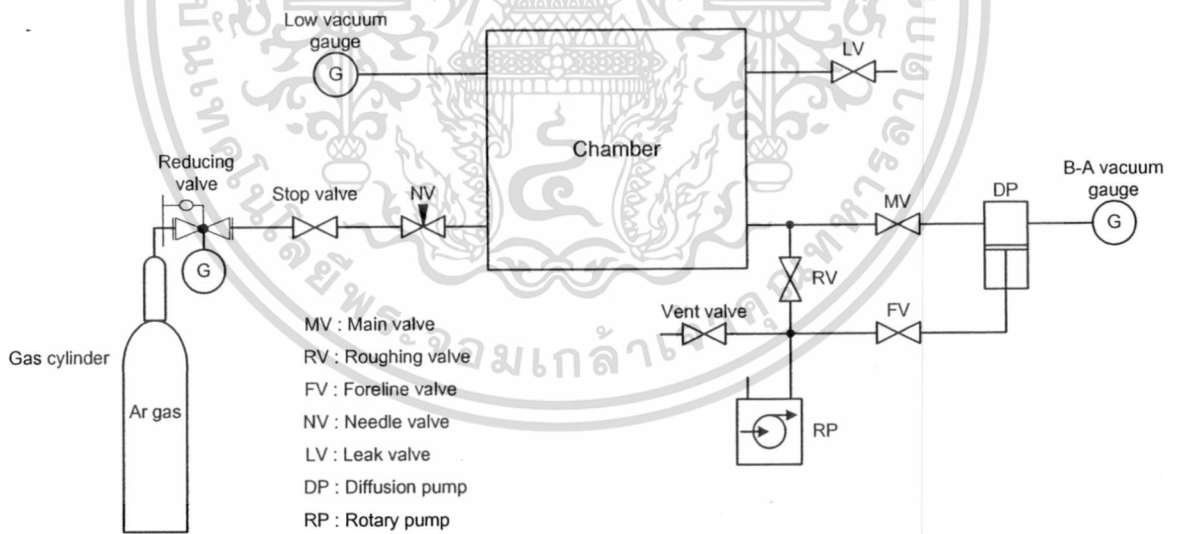
โดยใช้ระบบอาร์เอฟสปีดเตอร์ริงที่ใช้ในการสร้างฟิล์มบาง นี้จะมีเงื่อนไขดังนี้คือ

1. เป็นระบบสปีดเตอร์ริงแบบแหล่งจ่ายพลังงานความถี่วิทยุ 13.56 MHz
2. กำลังความถี่คลื่นวิทยุ 100-150 วัตต์
3. ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมเป้าไม่เกิน 1.75 กิโลวัตต์
4. ระยะห่างระหว่างฐานรองถึงเป้า 3.5 เซนติเมตร
5. เนื้อวัสดุที่เป็นเป้าเคลือบสารคือที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร และมี ความหนา 0.5 เซนติเมตร
6. อุณหภูมิของฐานรองโลหะมีค่า 25-400 องศาเซลเซียส
7. Pre-sputtering time 20 นาที
8. ก๊าซที่ใช้คือ Ar, Ar : O₂ (85:15)

3.4 ส่วนประกอบที่สำคัญของ SPF –RF Sputtering System



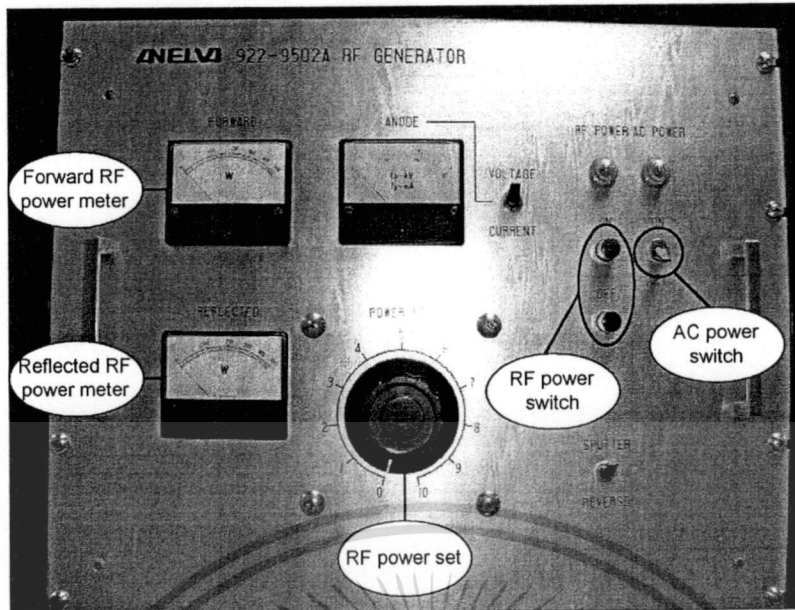
รูปที่ 3.12 รูป SPF – RF Sputtering System



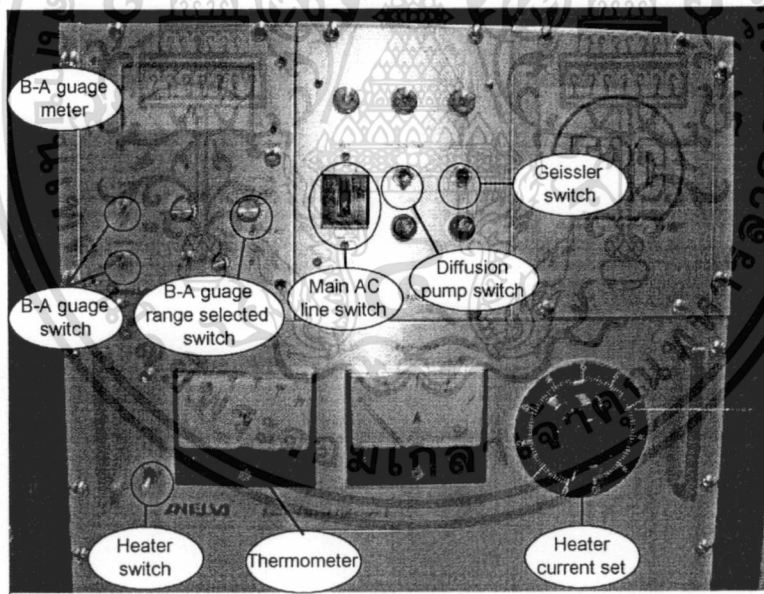
Sputtering system

รูปที่ 3.13 องค์ประกอบรวม SPF – RF Sputtering System

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 ภาพแหล่งจ่ายพลังงานคลื่นความถี่วิทยุ รุ่น 922-9502A



รูปที่ 3.15 ภาพแผงควบคุม ปืน, B-A Gauge and Heater

1. ปืนสุญญากาศ เพื่อใช้ในการลดความดันของก๊าซภายในระบบให้มีความดันต่ำ เพื่อให้ระบบเกิดความสะอาดและมีความเป็นสุญญากาศมากที่สุด โดยระบบนี้ประกอบด้วยปืนสุญญากาศ 2 ชนิด

1.1 Mechanical Rotary pump ซึ่งจะใช้ในการลดความดันในระดับ ในช่วง ความดัน

บรรยากาศ ถึง 10^{-3} mbar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 Oil diffusion Pump ซึ่งจะทำงานร่วมกับ Mechanical Rotary pump โดยจะทำงานต่อจากที่ความดันต่ำกว่า 10^{-1} mbar จนถึง 10^{-8} torr

2. ภาชนะสุญญากาศ ทำจากสแตนเลส ซึ่งมีทรงเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร

3. ขั้วแคโทดและเป่าสารเคลือบมีโครงสร้างของแคโทดเป็นแบบระนาบ (planar) ที่ออกแบบและสร้างขึ้นด้วยสแตนเลส โดยมีพื้นที่เป่าสารเคลือบจะเป็นรูปทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร หนา 0.5 เซนติเมตร

4. ระบบระบายความร้อนที่ขั้วแคโทดจะต้องใช้ที่มีความต้านทานสูงเพื่อหล่อเย็นและรักษาความเป็นฉนวนไฟฟ้า โดยมีอัตราการไหลของน้ำ 5 ลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 20°C ส่วนระบายระบบความร้อนของปั๊มไอฟุ้งกระจาย (Oil diffusion Pump)

5. แหล่งจ่ายพลังงานคลื่นความถี่วิทยุ รุ่น 922-9502A

องค์ประกอบโดยหลักของแหล่งจ่ายพลังงานคลื่นความถี่วิทยุ รุ่น 922-9502A

พลังงานอินพุต : AC 100 Volt (50/60 Hz)

พลังงานเอาต์พุต : 450 Watt

คลื่นความถี่ : 13.56 MHz

อิมพีแดนซ์ : 50 Ohm

ขนาดเครื่อง : 4.80x4.90x4.00 m

6. เกจวัดความดัน จะมีอยู่ 2 ชนิด คือ

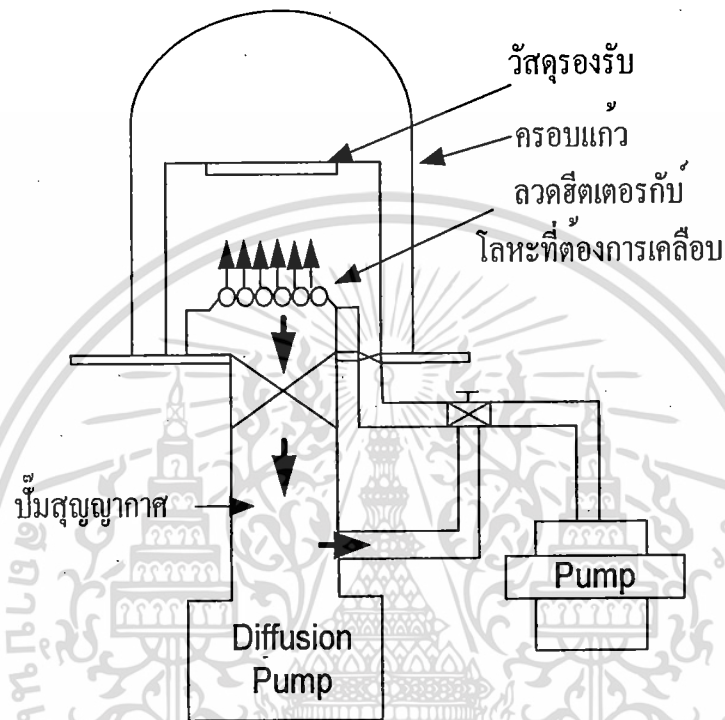
1. พีรานี จะวัดความดันในช่วงบรรยากาศ ถึง 10^{-3} mbar

2. B-A Vacuum gauge ซึ่งจะเป็น NI-10D Wide-Range Ionization Gauge ที่สามารถวัดความดันในช่วง 10^{-3} - 10^{-8} torr

7. ระบบป้องกันก๊าซจะประกอบด้วยท่อก๊าซ Ar, Ar:O₂(85:15) และ Ar:O₂ (50:50)

3.5 กระบวนการสร้างฟิล์มโลหะด้วยวิธีการระเหยในสุญญากาศบนฐานรองซิลิคอน และซิลิคอนไดออกไซด์

กระบวนการ โลหะด้วยวิธีการระเหยในสุญญากาศเป็นอีกวิธีหนึ่งในวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้ใช้ในการสร้างฟิล์มโลหะเพื่อใช้ทำเป็นขั้วโลหะ โดยหลักการพื้นฐานได้ถูกอธิบายไว้ในบทที่ 3.16



รูปที่ 3.16 โครงสร้างของเครื่อง filament evaporation

รูปที่ 3.16 เป็นรูปที่แสดง โครงสร้างของกระบวนการโลหะด้วยวิธีด้วยการระเหยในสุญญากาศ โดย chamber ที่ได้แสดงไว้เป็นครอบแก้วรูปทรงระฆังคว่ำ (bell jar) เมื่อเริ่มต้นภายใน chamber จะมีความดันบรรยากาศปกติจะถูกดูดอากาศออกโดยใช้ mechanical pump จนความดันภายใน chamber ได้ประมาณ 10^{-3} bar จะวัดความดันที่จูนนี้โดย 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 หลังจากนั้นให้แรงดันและกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดที่ใส่เข้ามาจากทั้งสแตน

เมื่อได้ถูกทำให้ร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าจำนวนมากที่ไหลผ่านทำให้ลวดอุณหภูมิที่วางอยู่บนได้เกิดการหลอมเหลว ซึ่งลวดอุณหภูมิจะไหลมารวมกันเป็นจุดเดียว ซึ่งในขั้นตอนนี้จะต้องเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่อยเพิ่มแรงดันให้กับไส้ไปเรื่อยๆจนกว่าอุณหภูมิของโลหะอลูมิเนียมจะเลยจุดหลอมเหลวและระเหยเป็นไอพุ่งกระจายไปเคลือบแผ่นผลึกซิลิคอนที่วางอยู่ใน chamber

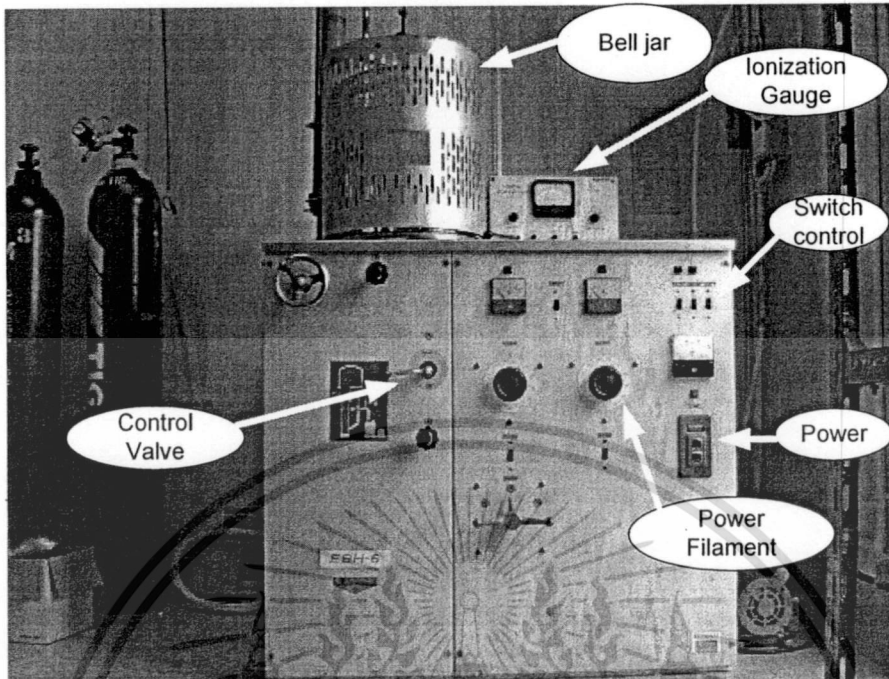
ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขของวิธีการระเหยในสุญญากาศของฟิล์ม AI ในการทดลอง

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

ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มโลหะอลูมิเนียมในสุญญากาศ

1. ทำความสะอาดและเตรียมแผ่นซิลิคอนให้แห้ง (ซิลิคอนเคลือบบนด้วยซิลิคอนไดออกไซด์)
2. เตรียมลวดโลหะอลูมิเนียม ยาว 1cm. จำนวน 8 ไส้
3. ทำความสะอาดและเตรียมลวดโลหะอลูมิเนียมให้แห้ง
4. วางแผ่นซิลิคอนลงบน chamber ที่ตำแหน่งเหมาะสมเพื่อให้ชั้นสารที่เคลือบมีความสม่ำเสมอ
5. ดัดตั้งไส้ความร้อนที่ทำจากทั้งสแตท 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. จ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ไส้ความร้อนทั้งสแตท โดยการเพิ่มกำลังงานไฟฟ้าขึ้นไปทีละน้อยจนกว่าโลหะอลูมิเนียมที่อยู่บนขดลวดความร้อนจะค่อยหลอมตัวเข้าด้วยกัน
9. เริ่มทำโลหะอลูมิเนียมให้เป็นไอ โดยมี shutter ปิดอยู่เพื่อมิให้สารที่เจือปนที่อยู่ในภายในโลหะอลูมิเนียมเข้าไปเคลือบบนแผ่นผลึกซิลิคอน
10. เปิด shutter ทำการเคลือบฟิล์มโลหะลงไปที่แผ่นซิลิคอนให้ได้ความหนาตามต้องการ
11. หยุดการเคลือบโลหะ ปล่อยให้ทุกอย่างใน chamber เย็นตัวลง

12. ปล่อยอากาศเข้าไปใน chamber ซ้ำๆจนความดันปกติ เอาชิ้นงานออก



รูปที่ 3.17 เครื่องเคลือบฟิล์ม โลหะแบบระเหยในสุญญากาศ

3.2.1 ผลการดำเนินการศึกษาเงื่อนไขของการเคลือบฟิล์มอลูมิเนียมบริสุทธิ์ลงบนแผ่นซิลิคอนออกไซด์

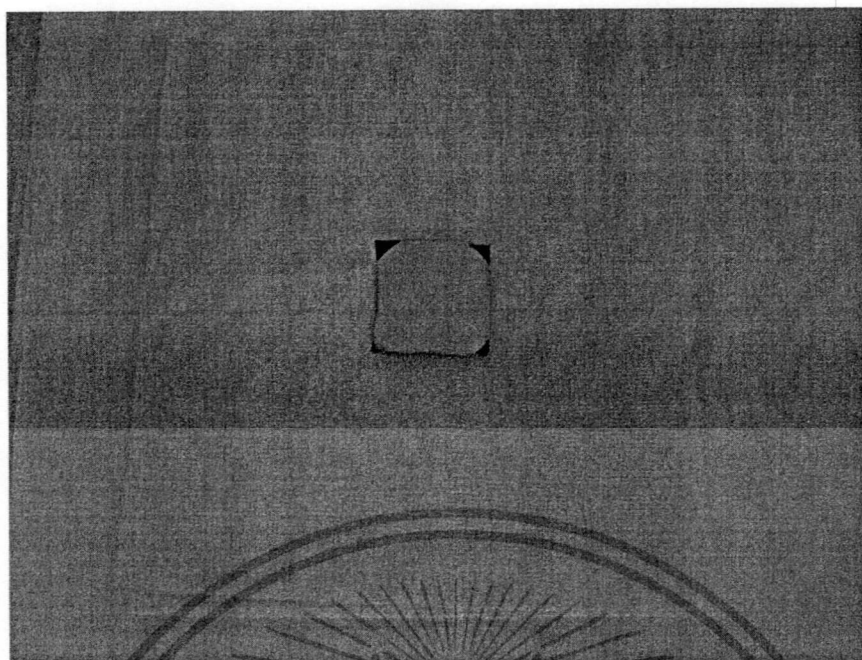
สำหรับขั้นตอนนี้ ได้ทำการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเคลือบฟิล์มอลูมิเนียมบริสุทธิ์ โดยการสร้างฟิล์มโลหะเคลือบลงบนฐานรองที่มีซิลิคอนไดออกไซด์เคลือบอยู่ด้านบนของพื้นผิวซิลิคอน โดยใช้พารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

- base Pressure < 1×10^{-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 %
- สีของแผ่นฐานรอง และ Al : มันวาวเหมือนกระจก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 ภาพถ่ายฟิล์มอคูมิเนียมบริสุทธิ์ที่เคลือบ



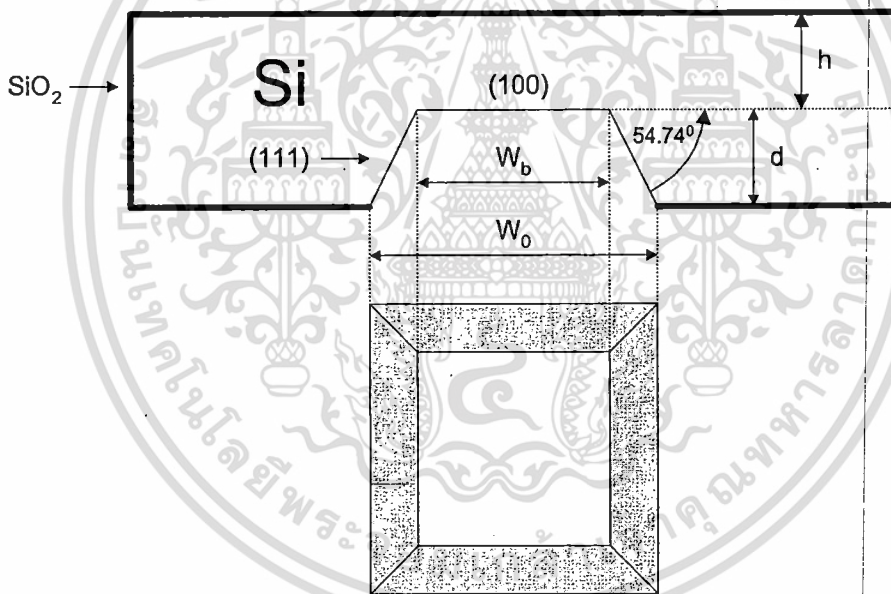
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การออกแบบและกระบวนการสร้าง

4.1 การออกแบบไดอะแฟรม[7,8]

ไดอะแฟรมนี้เป็นส่วนหนึ่งของซิลิคอนซึ่งเกิดจากการกัดฐานร่องซิลิคอนระนาบ (100) ในสารละลายซึ่งมีการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกให้เป็นไดอะแฟรมบางรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีผนังของหลุมทั้งสี่ด้านเป็นผนังของระนาบ (111) ซึ่งต้นแบบของไดอะแฟรมได้จากการทำกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเปิดช่องออกไซด์ที่ผิวของแผ่นผลึกซิลิคอนระนาบ (100) หลุมที่เกิดจากการกัดจะมีความสมมาตรของผนังทั้งสี่ด้าน โดยจะต้องปรับแนวให้ด้านของสี่เหลี่ยมขนานแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แบบจำลองการกัดซิลิคอนโดยสารละลาย

แสดงรายละเอียดการกำหนดขนาดต้นแบบของไดอะแฟรมบนฐานร่องซิลิคอนระนาบ (100) หรือตั้งฉากกับทิศทาง [110] ขนาดของต้นแบบที่จะนำไปกัดเป็นไดอะแฟรมคำนวณได้จากความสัมพันธ์ในสมการต่อไปนี้

$$W_b = W_0 - 2d \cot 54.74^\circ$$

$$\approx W_0 - \sqrt{2}d \quad (4.1)$$

โดยที่ W_0 คือ ขนาดของต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

W_0 คือ ขนาดของไดอะแฟรมหลังการกัด

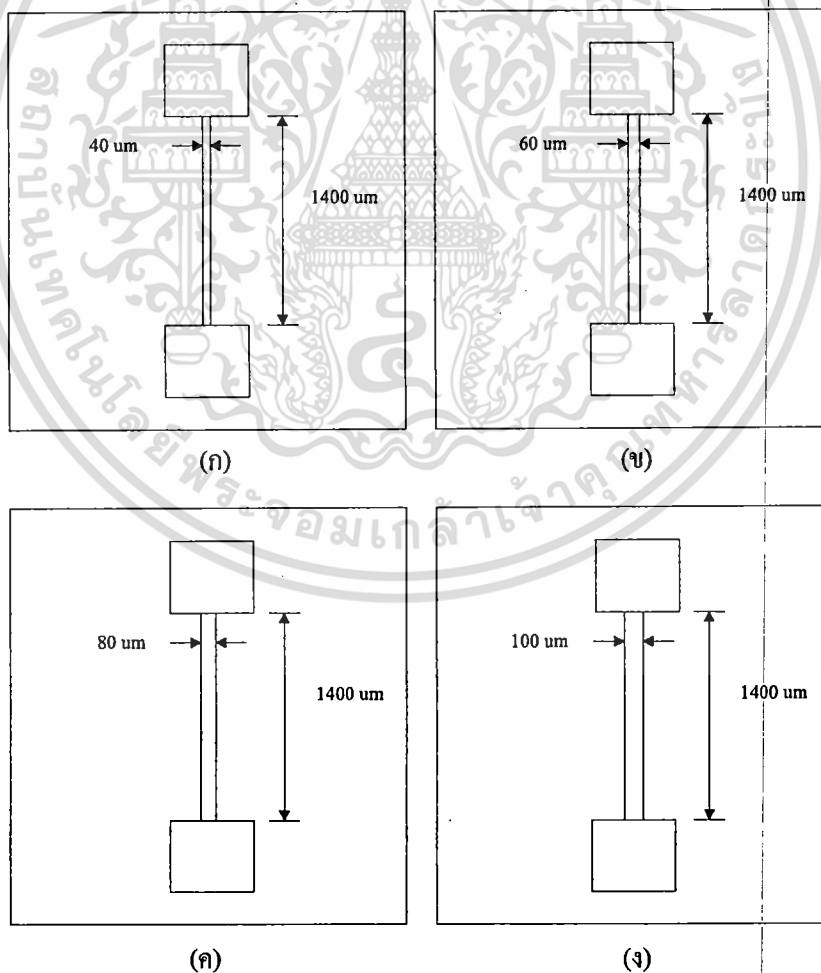
d คือ ความลึกของไดอะแฟรม

h คือ ความหนาของไดอะแฟรม

การทดลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้กำหนดค่าความหนาของไดอะแฟรมให้มีความหนาน้อยกว่า $50 \mu\text{m}$ โดยต้องการให้ขนาดของช่องไดอะแฟรมหลังการกัดมีขนาด $1400 \times 1800 \mu\text{m}^2$ เมื่อใช้แผ่นฐานรองซิลิคอนหนา $450 \mu\text{m}$ ดังนั้นจึงต้องทำการออกแบบขนาดไดอะแฟรมต้นแบบ (W_0) จากสมการ 4.1 ซึ่งได้เป็น 1966 และ $2366 \mu\text{m}$ ตามดับ

4.2 การออกแบบไมโครฮีตเตอร์

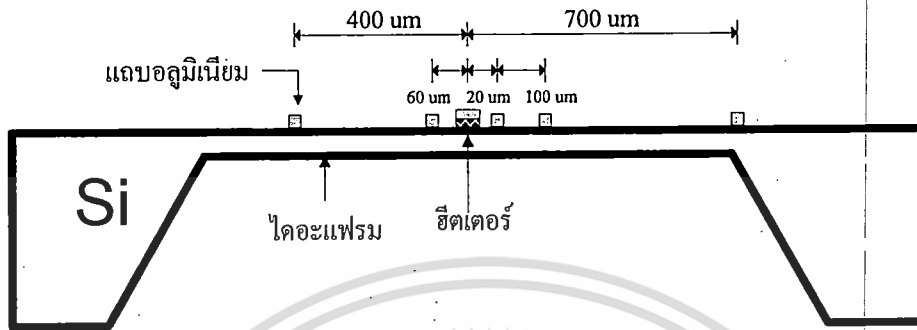
ในการทดลองนี้ ได้ทำการออกแบบและสร้างไมโครฮีตเตอร์จากไททานเนียมและอลูมิเนียม 4 ชุดให้มีความกว้างต่างกันคือ $40, 60, 80$ และ $100 \mu\text{m}$ แสดงดังรูปที่ 4.2 และโดยมีความยาวเท่ากันคือ $1400 \mu\text{m}$



รูปที่ 4.2 การออกแบบไมโครฮีตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

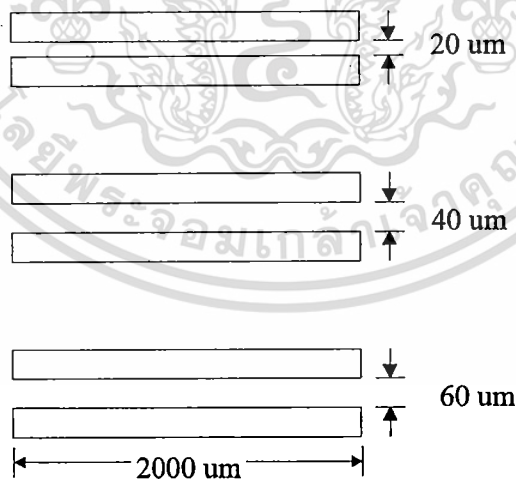
และยังมีแถบความต้านทานที่สร้างจากฟิล์มของอลูมิเนียมมีขนาดความกว้าง 20 μm และยาว 1200 μm อยู่ห่างจากไมโครฮีตเตอร์ 20, 60, 100, 400 และ 700 μm ตามลำดับ เพื่อใช้เป็นตัวตรวจจับความร้อน โดยโครงสร้างทั้งหมดจะอยู่บนไดอะแฟรมของซิลิคอนมีขนาด 1400x1800 μm^2 มีขนาดความหนาไดอะแฟรมต่างกันคือ 25, 40 และ 60 μm แสดงดังรูปที่ 4.3



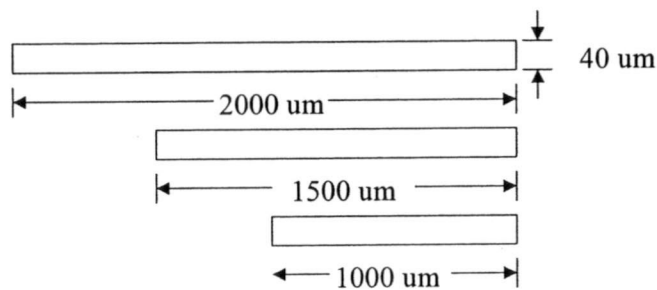
รูปที่ 4.3 โครงสร้างของไมโครฮีตเตอร์

4.3 การออกแบบเทอร์โมคัปเปิล

ในการออกแบบเทอร์โมไฟล์จะกำหนดขนาดความกว้างยาวของแถบแพร์สารเจือ, ระยะห่างระหว่างแถบแพร์สารเจือ โดยการกำหนดแถบแพร์สารเจือเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีขนาดความกว้าง 40, 60, 80 และ 100 μm แสดงดังรูป 4.4 มีรอยต่อสัมผัสที่ต่างกันคือ 20, 40 และ 60 μm ตามลำดับ

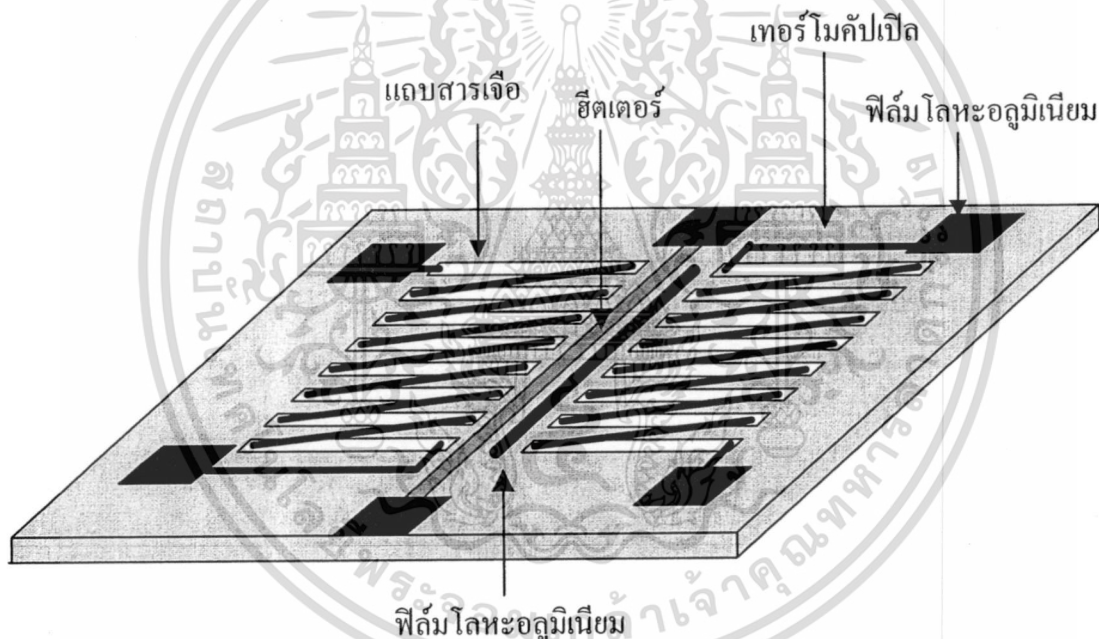


รูปที่ 4.4 การออกแบบความกว้างและระยะห่างระหว่างแถบแพร์สารเจือ



รูปที่ 4.5 ความยาวของแถบแพร่สารเจือที่ต่างๆ กัน

ในการกำหนดพื้นที่ของเทอร์โมไฟล์ที่สามารถมีจำนวนเทอร์โมคัปเปิลได้นั้น โดยการใช้พื้นที่ $1200 \times 1400 \mu\text{m}^2$ และมีจำนวนเทอร์โมคัปเปิลได้ 5, 10, 15 และ 20 ตัว ตามลำดับ แสดงดังรูป 4.6 แสดงภาพตัดขวางชิพเทอร์โมคัปเปิลต่ออนุกรมกันเรียกว่า “เทอร์โมไฟล์”



รูปที่ 4.6 ภาพตัดขวางชิพเทอร์โมคัปเปิลที่ต่ออนุกรมกัน

4.4 กระบวนการสร้างไมโครฮีตเตอร์

ในกระบวนการสร้างฮีตเตอร์เป็นตัวกำเนิดความร้อนอยู่บนโครงสร้างไดอะแฟรมนั้น จะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนด้วยกันคือ ขั้นตอนการผลิตกระจกมาส์กดินแบบและขั้นตอนการสร้างบนแผ่นผลึกซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1 การผลิตกระจกมาส์กต้นแบบ

เมื่อได้ต้นแบบของไมโครฮิตเตอร์จึงนำต้นแบบนั้นมาเขียนลวดลายต่าง ๆ ลงบนกระดาษกราฟต้นแบบ โดยการออกแบบให้มีขนาดใหญ่เป็น 50 เท่าของอุปกรณ์จริง ด้วยการออกแบบลวดลายทุกชิ้นลงบนกระดาษกราฟต้นแบบแผ่นเดียวกัน เพื่อป้องกันการคลาดเคลื่อน จากนั้นจึงนำไปทาบด้วยแผ่นพลาสติกลามิเนต ซึ่งประกอบด้วยไมลาร์ซีทเคลือบพลาสติกสีแดง การตัดต้นแบบบนแผ่นพลาสติกลามิเนตนั้นจะใช้ไมโครคัตเตอร์ ซึ่งมีความละเอียด 0.1 มิลลิเมตร

4.4.2 มาส์กต้นแบบไมโครฮิตเตอร์

ในกระบวนการสร้างนี้จะใช้มาส์กต้นแบบทั้งหมด 4 มาส์ก ด้วยกันซึ่งใช้สำหรับกระบวนการสร้างต่าง ๆ ดังนี้

มาส์กที่ 1 ใช้สำหรับกระบวนการสร้างไดอะแฟรม

มาส์กที่ 2 ใช้สำหรับสร้างลวดลายของโลหะไทเทเนียม

มาส์กที่ 3 ใช้สำหรับสร้างลวดลายของโลหะอลูมิเนียม

มาส์กที่ 4 ใช้สำหรับสร้างลวดลายของโลหะอลูมิเนียมสำหรับวัดการกระจายความร้อน

4.4.3 มาส์กต้นแบบเทอร์โมคัปเปิล

ในกระบวนการสร้างนี้จะใช้มาส์กต้นแบบทั้งหมด 4 มาส์ก ด้วยกันซึ่งใช้สำหรับกระบวนการสร้างต่าง ๆ ดังนี้

มาส์กที่ 1 ใช้สำหรับกระบวนการสร้างไดอะแฟรม

มาส์กที่ 2 ใช้สำหรับเจาะช่องเพื่อแพร่สารเจือโบรอนหรือฟอสฟอรัสสร้างแถบสารเจือ

มาส์กที่ 3 ใช้สำหรับเจาะช่องเพื่อสร้างขั้วสัมผัสอลูมิเนียม

มาส์กที่ 4 ใช้สำหรับสร้างลวดลายของโลหะไทเทเนียม

มาส์กที่ 5 ใช้สำหรับสร้างลวดลายอลูมิเนียม

ขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

ในการสร้างไมโครฮิตเตอร์และเทอร์โมโพลีต์ แผ่นผลึกซิลิคอนนั้นก็จะทำการสร้างเป็นสองขั้นตอน คือ การกำหนดขั้นตอนของกระบวนการสร้างไมโครฮิตเตอร์ และลำดับขั้นตอนของกระบวนการสร้างเทอร์โมโพลีต์

การกำหนดขั้นตอนของกระบวนการสร้าง

สำหรับการสร้างอุปกรณ์นี้ได้ โดยใช้กระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำในแนวระนาบซึ่งเป็นกระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำวิธีหนึ่งที่นิยมกันมาก โดยอาศัยเทคนิคที่ใช้ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์การคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

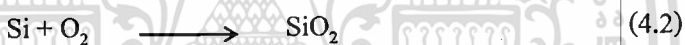
สารกึ่งตัวนำซิลิคอนของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยมีขั้นตอนการสร้างพื้นฐานดังนี้ คือ

1. การออกซิเดชัน (oxidation)
2. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี
3. การแพร่สารเจือ
4. การสร้างลวดลายโลหะ
5. สปีดเตอร์รีંગ

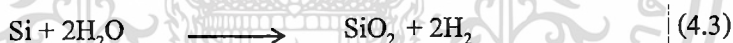
กระบวนการออกซิเดชัน

ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนลักษณะโปร่งใสใช้เป็นสารเคลือบผิวหน้าของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำได้เป็นอย่างดี ชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์สามารถสร้างได้โดยกระบวนการออกซิเดชัน โดยทิ้งให้แผ่นผลึกซิลิคอนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแห้งหรือไอน้ำ ในอุณหภูมิ $1000-1200\text{ }^\circ\text{C}$ โดยมีปฏิกิริยาเคมีของการเกิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ดังสมการต่อไป

1. กระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation)



2. กระบวนการออกซิเดชันแบบชื้น (Wet Oxidation)



สำหรับหน้าที่สำคัญของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ในกระบวนการสร้างอุปกรณ์ ประเภทแรกคือใช้เป็นส่วนปกคลุมผิวของซิลิคอน และป้องกันสิ่งเจือปนจากภายนอกที่ไม่ต้องการไม่ให้ทำปฏิกิริยากับผิวซิลิคอน (passivation layer) ประการที่สองก็คือ เป็นหน้าฉากป้องกันการแพร่สารเจือเข้าไปในส่วนที่ไม่ต้องการ ประการที่สามใช้เป็นส่วนเกทที่เรียกว่าเกทออกไซด์ซึ่งเป็นส่วนที่มีความสำคัญอย่างมากในอุปกรณ์ประเภทมอสเฟต เนื่องจากเป็นส่วนที่เหนียวนำไปให้เกิดช่องทางเดินกระแส ประการสุดท้ายใช้เป็นฉนวนบนผิวซิลิคอน เพื่อป้องกันการลัดวงจรของลวดลายอลูมิเนียมกับผิวของซิลิคอนในส่วนอื่น ๆ และจากวัตถุประสงค์ในการใช้งานชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ที่กล่าวมา ทำให้ต้องการที่จะใช้ซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนาที่แตกต่างกันเช่น ซิลิคอนไดออกไซด์ในส่วนที่จะใช้เป็นหน้าฉากป้องกันการแพร่อะตอมสารเจือ จำเป็นที่จะต้องมีความหนาประมาณ $4000-5000\text{ \AA}$ ขึ้นไปและชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ในส่วนที่ใช้เป็นหน้าฉากป้องกันสารเคมีที่ใช้กัดซิลิคอนให้เป็นไดอะแฟรมต้องมีความหนาไม่ต่ำกว่า 10000 \AA ซึ่งความหนาขนาดนี้ การสร้างโดยใช้วิธีการสร้างซิลิคอนไดออกไซด์แบบแห้งอย่างเดียวจะทำให้ต้องใช้เวลานานและสิ้นเปลือง

ค่าใช้จ่ายมาก ดังนั้นในกรณีของออกไซด์ที่ใช้เป็นหน้าฉากจะทำการสร้าง โดยวิธีการสร้าง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยวิธีการสร้างแบบแห้งสลับกับแบบชื้นและแบบแห้งอีกครั้ง ทั้งนี้เนื่องจากการสร้าง ชิลิคอน ไดออกไซด์แบบชื้นสามารถสร้างความหนาได้เร็ว แต่มีคุณภาพต่ำหรือมีรูพรุนมาก จึงจำเป็นจะต้องสร้างสลับกับการสร้างแบบแห้ง

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี เป็นขบวนการที่ใช้สำหรับการถ่ายภาพต้นแบบจากกระจก ต้นแบบลงบนผิวของแผ่นผลึกโดยการใช้ฉายาแวแสง เพื่อเปิดช่องชิลิคอนสำหรับการแพร่อะตอม สารเจือในขอบเขตที่กำหนดจากกระจกต้นแบบ โดยที่ความสามารถในการเปิดช่องชิลิคอน ไดออกไซด์ที่มีขนาดเล็กมากและมีความถูกต้องแม่นยำจะขึ้นอยู่กับ การปรับตำแหน่ง (alignment) และความคมชัดของกระจกต้นแบบ ซึ่งขั้นตอนต่าง ๆ ของกระบวนการ โฟโตลิโธกราฟีจะกล่าวถึงในหัวข้อลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้าง

กระบวนการแพร่สารเจือ

กระบวนการแพร่สารเจือเป็นการเติมและควบคุมปริมาณของอะตอมสารเจือให้เข้าไปในผลึกสารกึ่งตัวนำในบริเวณที่ต้องการทำให้เกิดรอยต่อพี-เอ็น โดยที่แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือสามารถแบ่งได้ตามประเภทของอะตอมสารเจือ 2 ประเภท คือ แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดเอ็น เช่น ฟลวง , สารหนู , ฟอสฟอรัสและแหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดพี เช่น โบรอน โดยในแต่ละประเภทก็จะสามารถแบ่งได้ตามสถานะของแหล่งจ่ายสารเจือ 3 ประเภท คือ 1) แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดของแข็งอย่างเช่น Sb_2O_3 , As_2O_3 และ SiP_2O_7 เป็นต้น 2) แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดของเหลวอย่างเช่น $POCl_3$ หรือ BBr_3 เป็นต้น 3) แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดก๊าซอย่างเช่น AsH_3 , PH_3 และ B_2H_2 เป็นต้น สำหรับในห้องปฏิบัติการสารกึ่งตัวนำของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง เลือกที่จะใช้แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดเอ็นเป็น SiP_2O_7 และแหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดพี เป็น BN ซึ่งทั้งสองชนิดมีสถานะเป็น ของแข็ง ทั้งนี้เนื่องจากแหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดของแข็ง ทำให้เกิดมลภาวะที่เป็นพิษเนื่องจากก๊าซพิษที่แพร่ออกมาจากปฏิกิริยาน้อยที่สุด และยังคงควบคุมอย่างง่ายในการใช้งาน

สำหรับขั้นตอนในการปฏิบัติของกระบวนการแพร่สารเจือสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอนคือ

1. การ Predeposition เป็นการแพร่ขึ้นต้นเพื่อกำหนดและควบคุมปริมาณของสารเจือที่เข้าไปในแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำ
2. การ Drive-in เป็นการควบคุมความลึกของรอยต่อและกำหนดการกระจายของสารเจือที่เข้าไปในแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการสร้างลวดลายโลหะ

กระบวนการสร้างลวดลายโลหะเป็นการนำโลหะมาเคลือบที่ผิวแผ่นผลึกเพื่อทำหน้าที่เป็นรอยสัมผัสโอห์มมิกหรือเป็นแกนความนำต่อเชื่อมภายในระหว่างสิ่งประดิษฐ์ต่าง ๆ ในวงจรรวมหรือเป็นขั้วสำหรับต่อกับอุปกรณ์ภายนอก โดยบริเวณที่ต้องการสร้างรอยสัมผัสจะต้องถูกเปิดช่องซลิคองไดออกไซด์ก่อนที่จะทำการเคลือบโลหะ โดยบริเวณที่ต้องการสร้างรอยสัมผัสจะต้องถูกเปิดช่องซลิคองไดออกไซด์ ก่อนที่จะทำการเคลือบโลหะ โดยลักษณะของโลหะที่จะเคลือบจะมีลักษณะเป็นฟิล์มบาง (Thin-Film) โดยมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้คือ

1. ทำให้เกิดรอยผิวสัมผัสกับซลิคองที่มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าต่ำ
2. โลหะที่ใช้ต้องมีความนำไฟฟ้าสูง
3. ทำให้ติดแน่นกับผิวของซลิคองไดออกไซด์หรือสารไดอิเล็กทริกอื่น ๆ ได้ดี
4. สามารถต่อเข้ากับสายลวดความนำภายนอกได้ดี

สำหรับกระบวนการสร้างลวดลายโลหะที่ทำการสร้างที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จะเลือกใช้โลหะ (Al) โดยใช้เครื่องเคลือบโลหะในสูญญากาศ ทำการเคลือบโลหะลงบนผิวของแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำความหนาประมาณ 1 μm แล้วจึงนำไปปล่อยฟิล์มโดยขบวนการโฟโตลิโธกราฟี และกัดเป็นลวดลายตามที่ต้องการแบบไว้ จากนั้นจึงนำไปผ่านขบวนการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500 °C ประมาณ 12 นาที เพื่อให้ รอยสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมกับซลิคองเป็นรอยสัมผัสแบบ โอห์มมิก

สปัตเตอร์ริง (Sputtering)

สปัตเตอร์ริงเป็นเทคนิคการเคลือบสารในระบบสูญญากาศอีกวิธีหนึ่งที่มีการใช้กันอย่างกว้างขวางในกระบวนการสร้างวงจรรวม ซึ่งเป็นกระบวนการที่อะตอมผิวหน้าของวัสดุถูกทำให้หลุดออกมา โดยการชนของอนุภาคพลังงานสูงซึ่งจะทำให้มีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิววัสดุดังกล่าว กระบวนการที่อนุภาควิ่งเข้าชนสารเคลือบเป็นเป้า ประกอบด้วย 3 ส่วนที่สำคัญคือ

1. เป้าโลหะ (target) ใช้อุณหภูมิพลังงานสูงวิ่งเข้าชนเป่าจนมีการปล่อยอะตอมสารเคลือบลงเคลือบบนแผ่นฐานรองรับ
2. อนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบ โดยปกติอนุภาคพลังงานสูงนี้อาจจะเป็นกลางทางไฟฟ้าก็ได้ แต่การทำให้อนุภาคเป็นกลางทางไฟฟ้า เพื่อใช้ในการสปัตเตอร์ริงทำได้ค่อนข้างยาก จึงจำเป็นต้องใช้วิธีการเร่งประจุภายใต้สนามไฟฟ้า ซึ่งสามารถควบคุมระดับของไอออนได้ตามต้องการ อิเล็กตรอนก็เป็นประจุไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่ย่อยต่อการผลิตและเร่งให้มีพลังงานสูงภายใต้สนามไฟฟ้าได้

แต่ถ้าอิเล็กตรอนมีมวลน้อยกว่าอะตอมของเป้าสารเคลือบมากและไม่

ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถทำให้เกิดกระบวนการสปีดเตอร์ริงได้ ดังนั้นการชนกันระหว่างอนุภาคจะต้องเกิดการถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมได้ดีที่สุด เมื่อมวลของอนุภาคมีขนาดเท่ากัน ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงใช้ไอออนของก๊าซอาร์กอน (Ar^+) ในสนามไฟฟ้าเป็นอนุภาควิ่งเขชนเป้าสารเคลือบ ซึ่งจะให้อัตราการปลดปล่อยอนุภาคสารเคลือบสูงเพียงพอกับความต้องการ

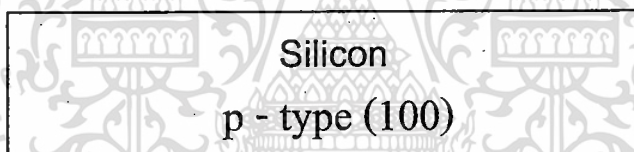
3. อนุภาคพลังงานสูงต้องถูกผลิตอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้กระบวนการเคลือบฟิล์มเป็นไปอย่างต่อเนื่องจนได้ความหนาฟิล์มตามต้องการ ซึ่งสามารถทำได้โดยอาศัยกระบวนการโกลว์ดีสชาร์จ

ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างไมโครฮาร์ดไดรฟ์

ในกระบวนการสร้างอุปกรณ์ชิ้นนี้ มีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังนี้

1. แผ่นผลึกซิลิคอนเริ่มต้น (Starting Wafer)

ใช้แผ่นผลึกเดี่ยวของซิลิคอนที่มีผิวหน้าขัดมันเป็นกระจกเงา ชนิดพีระนาบของผลึกคือ (100) มีค่าพิทักความต้านทาน 8-12 โอห์ม-เซนติเมตร มีค่าความหนาของแผ่นผลึก 400 μm โดยภาพตัดขวางแสดงดังในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ภาพตัดขวางของแผ่นผลึกซิลิคอนเริ่มต้น

2. การทำความสะอาดผิวแผ่นผลึกเริ่มต้น (Initial cleaning)

- ทำความสะอาดผิวด้วยน้ำบริสุทธิ์ (deionized Water) ในเครื่องล้างความถี่สูง (Supersonic cleaning)
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- กัดผิวหน้าด้วยกรดกัดแก้ว (HF) 5% เป็นเวลา 2 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในกรดไนตริก (HNO_3) เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดเศษโลหะที่ผิวหน้า
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์

- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

- ต้มในไตรโคลโรเอทิลีน (Trichloroethylene) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกประเภทไขมัน
- ล้างด้วยอะซีโตน (Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูง เป็นเวลา 3 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- จุ่มลงในกรดกัดแก้ว (HF) 5% เป็นเวลา 20 วินาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

3. กระบวนการออกซิเดชันเริ่มแรก (First oxidation)

เพื่อการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ให้มีความหนาไม่ต่ำกว่า 7000 \AA จึงทำการออกซิเดชันโดยการนำแผ่นผลึกซิลิคอนที่ทำความสะอาดแล้ว ทิ้งไว้ในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจนที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส

- ออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตรต่อนาที
- ออกซิเดชันแบบชื้นเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.0 ลิตรต่อนาที
- ออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตรต่อนาที แผ่นผลึกดังแสดงรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านกระบวนการออกซิเดชันเริ่มแรก

4. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี I

เป็นกระบวนการพิมพ์ลวดลายบนแผ่นผลึกซิลิคอนเพื่อเปิดช่องของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ด้านหลังสำหรับการกัดช่องของไดอะแฟรมบาง ในขั้นตอนนี้ใช้กระจก มาส์กที่ I โดยการเคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบลงบนแผ่นผลึกซิลิคอน ด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า Spinner แล้วทำการอบให้แห้ง แล้วนำไปทำการพิมพ์ภาพ ด้วยกระจกมาส์ก I สำหรับรายละเอียดของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีของน้ำยาไวแสงชนิดลบ Waycoat มีลำดับขั้นตอนดังนี้คือ

- อบแห้งเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- เคลือบน้ำยาไวแสงโดยใช้อุปกรณ์ Spinner ขนาด 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 วินาที

เอกสารนี้เป็นที่ด้านหลังวงไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อบครั้งแรกให้น้ำยาแห้งที่อุณหภูมิ 90-100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
- ฉายแสงผ่านกระจกมาสก์ที่ I ด้วยอุปกรณ์ Mask aligner ซึ่งจะให้แสงอุลตราไวโอเลตออกมา แหล่งของแสงคือหลอดเมอร์คิวรี $\lambda = 5000 \text{ \AA}$ เป็นเวลา 10 วินาทีที่ด้านหลัง
- การล้างภาพ จะทำการจุ่มในน้ำยาล้างภาพ (Xylene) 2 ครั้ง ๆ ละ 1.5 นาที จุ่มน้ำยาทำความสะอาด (Isopropyl) 3 ครั้ง ๆ ละ 30 วินาที ล้างในน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าแห้งทันทีด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบครั้งที่สองให้แผ่นฟิล์มที่เหลืออยู่แห้งที่อุณหภูมิ 90-100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
- ทาด้านหน้าแผ่นผลึกด้วย Waycoat
- อบครั้งที่สามให้ฟิล์มแห้งที่อุณหภูมิ 90-100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

5. การใช้สารละลายเคมีกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

เพื่อทำการกัดชั้นของซิลิคอน ไดออกไซด์ ใช้สารละลายเคมีที่มีส่วนผสมของกรดกัดแก้วเป็นหลัก ทำการละลายชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ตรงบริเวณที่ต้องการเปิดออก สารละลายที่ใช้ในการกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นี้ เรียกว่า สารละลายบัฟเฟอร์ (Buffer) ที่มีอัตราการกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ประมาณ 1000 อังสตรอมต่อนาที

6. การลอกชั้นสารไวแสง

สารไวแสงที่ถูกแสง และยังคงค้างอยู่บนแผ่นผลึกซิลิคอน สามารถลอกทิ้งได้โดย

- ต้มในกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) เป็นเวลา 10 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

7. การทำความสะอาดผิวผลึก

- ต้มในไตร โคร โลเอททิลีนเป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยอะซีโตนในเครื่องสั่นความถี่สูงเป็นเวลา 3 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- จุ่มในกรดกัดแก้ว 5% เป็นเวลา 10 วินาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

เมื่อถึงขั้นตอนนี้ จะได้แผ่นผลึกดังแสดงรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านขั้นตอนที่ 7

8. กระบวนการกัดเป็นไดอะแฟรมบาง

ใช้น้ำยาส่วนผสมของ Ethylene diamine : Pyrocatechol : DI Water (EPD) ในอัตราส่วน 50:8:16 ในขณะที่จะใช้อุณหภูมิ 95-100 องศาเซลเซียส กัดให้ได้ไดอะแฟรมตามขนาดที่ต้องการ

9. การลอกชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่ปกคลุม

ทำเหมือนข้อ 5

10. ทำความสะอาดผิวผลึก

ทำเหมือนข้อ 7

11. ทำการสร้างออกไซด์ครั้งที่สอง

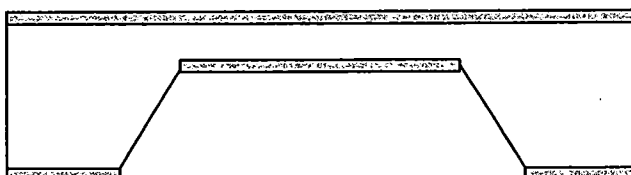
เมื่อได้ไดอะแฟรมตามขนาดที่ต้องการแล้ว ทำการสกัดออกไซด์เก่าทิ้งเรียบร้อยแล้ว ก็ทำการสร้างออกไซด์ใหม่ให้ได้ความหนาประมาณ 5000 Å ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส โดยมีขั้นตอนการออกซิเดชันดังนี้

- ออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตร ต่อนาที

- ออกซิเดชันแบบชื้นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.0 ลิตร ต่อนาที

- ออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตร ต่อนาที

เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้วจะได้แผ่นผลึกดังแสดงรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านขั้นตอนที่ 11

12. การเคลือบชั้นไททาเนียม (Ti) ในสุญญากาศ

โดยใช้อุปกรณ์สุญญากาศ (Vacuum evaporation)

ทำการเคลือบแผ่นผลึกด้วยชั้น

ไททาเนียม หนาประมาณ $0.5 \mu\text{m}$

13. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี II

ใช้กระจกมาสก์ที่ II เป็นต้นแบบสำหรับการกัดส่วนของไททาเนียม ที่ไม่ต้องการออก
ขั้นตอนนี้ใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ โดยมีขั้นตอนดังนี้คือ

- อบแห้งเพื่อไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 85-90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสง โดยใช้อุปกรณ์ Spinner ขนาด 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 วินาที
- อบครั้งแรกให้น้ำยาแห้งที่อุณหภูมิ 85-90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที
- ฉายแสงผ่านมาสก์ที่ II ด้วยอุปกรณ์ Mask aligner เป็นเวลา 10 วินาที
- ล้างภาพโดยจุ่มลงในน้ำยา AZ-Developer 2 ครั้ง ๆ ละ 30 วินาที ล้างในน้ำบริสุทธิ์

แล้วเป่าแห้งทันทีด้วยก๊าซไนโตรเจน

- อบครั้งที่สองให้แผ่นฟิล์มที่เหลืออยู่แห้งที่อุณหภูมิ 85-90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที

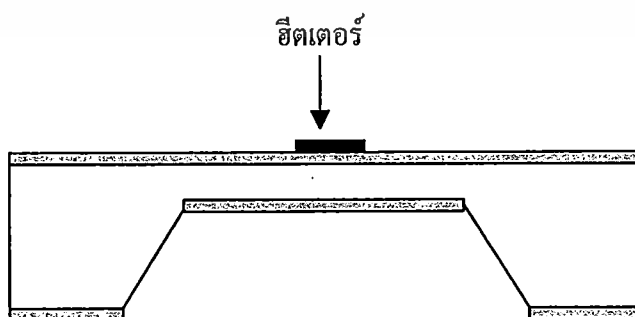
14. การกัดชั้นไททาเนียม [9,10]

สารละลายที่ใช้กัดชั้นไททาเนียมได้แก่ สารละลายซึ่งมีกรดฟอสฟอริกเป็นหลัก จุ่มแผ่น
ผลึกที่เสร็จจากขั้นตอนที่แล้วลงในสารละลาย

15. การลอกชั้นสารไวแสงชนิดบวก

- จุ่มแผ่นผลึกลงในอะซิโตน ประมาณ 1 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้วจะได้แผ่นผลึกดังแสดงรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 การสร้างแถบไททาเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16. การเคลือบชั้นอลูมิเนียมในสุญญากาศ

ทำการเคลือบแผ่นผลึกด้วยชั้นอลูมิเนียมหนาประมาณ $1 \mu\text{m}$

17. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี III

ทำเหมือนข้อ 13

18. การกัดชั้นอลูมิเนียม

สารละลายที่ใช้กัดชั้นอลูมิเนียมได้แก่ สารละลายซึ่งมีกรดฟอสฟอริกเป็นหลัก จุ่มแผ่นผลึกที่เสร็จจากขั้นตอนที่แล้วลงในสารละลาย ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1-2 นาที

19. การลอกชั้นสารไวแสงชนิดบวก

- ทำเหมือนข้อ 15

20. เคลือบชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

โดยเครื่องสปัตเตอร์ริง (sputtering) ทำการเคลือบชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

21. การเคลือบชั้นอลูมิเนียม

ทำเหมือนข้อ 12

22. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี IV

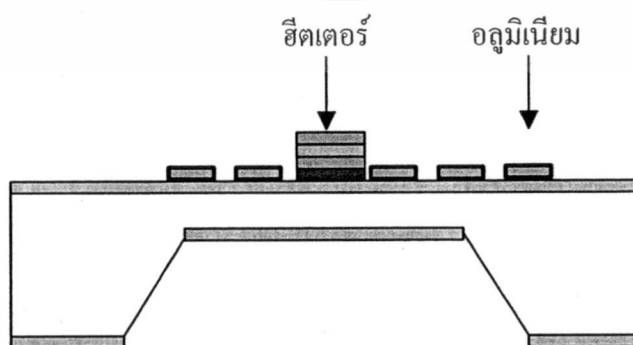
ทำเหมือนข้อ 13

23. ทำการลอกน้ำยาไวแสงชนิดบวก

ทำเหมือนข้อ 15

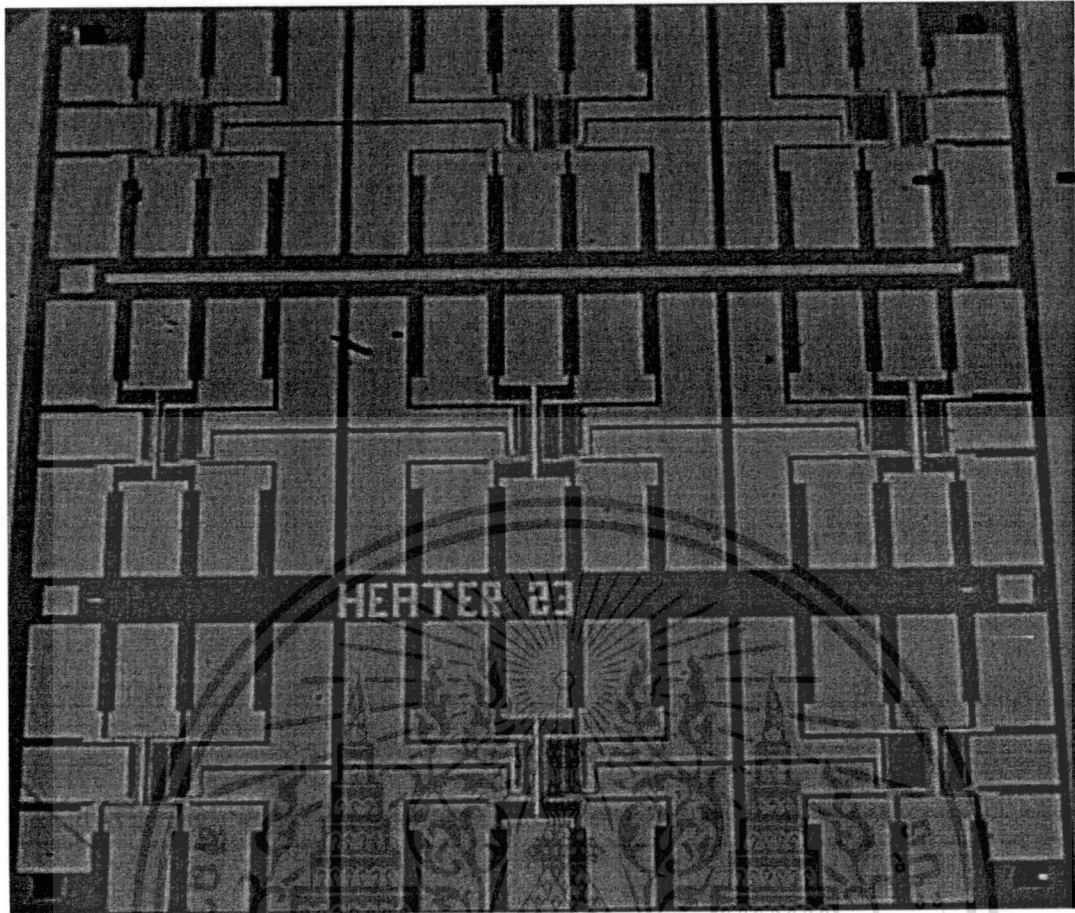
24. กระบวนการ Sintering

ทำการ Sintering เพื่อให้ส่วนโลหะกับเนื้อซิลิคอนในส่วนขั้วสัมผัสเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิกโดยการทิ้งแผ่นผลึกไว้ในบรรยากาศในโครเจนที่มีอัตราการไหล 1000 ลิตรต่ออนาที เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้วจะได้แผ่นผลึกดังรูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.12 ภาพตัดขวางโครงสร้างไมโครชิตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

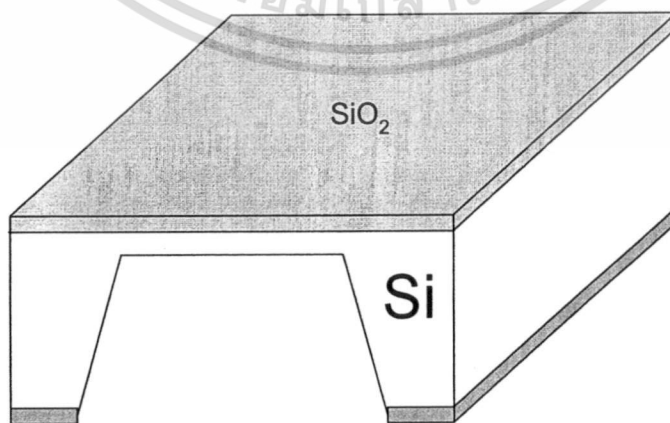


รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายด้านบนไมโครฮีตเตอร์ขั้นสุดท้าย

4.5 กระบวนการสร้างฮีตเตอร์และเทอร์โมคัปเปิล

ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างเทอร์โมคัปเปิลชนิดเอ็น

จากกระบวนการสร้างไมโครฮีตเตอร์ตามขั้นตอนที่ 1 ถึง 11 ดังที่กล่าวมาแล้วจะทำให้ได้
ชิ้นงานดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านขั้นตอนที่ 11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี II

เป็นกระบวนการพิมพ์ลวดลายบนแผ่นผลึกซิลิคอนเพื่อเปิดช่องของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ด้านหลังสำหรับการกัดช่องแพร่สารเจือ ในขั้นตอนนี้ใช้กระจก มาส์กที่ II โดยการเคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบลงบนแผ่นผลึกซิลิคอน ซึ่งจะทำเหมือนกับข้อ 4

13. การใช้สารละลายเคมีกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

เพื่อทำการกัดชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ ใช้สารละลายเคมีที่มีส่วนผสมของกรดกัดแก้วเป็นหลัก ทำการละลายชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ตรงบริเวณที่ต้องการเปิดออก สารละลายที่ใช้ในการกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นี้ เรียกว่า สารละลายบัฟเฟอร์ (Buffer) ที่มีอัตราการกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

14. การลอกชั้นสารไวแสง

สารไวแสงที่ถูกแสง และยังคงค้างอยู่บนแผ่นผลึกซิลิคอน จะทำเหมือนกับข้อ 6

15. ทำความสะอาดผิวผลึก

ทำเหมือนข้อ 7

16. กระบวนการ n deposition

เป็นการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสด้วยแหล่งจ่ายสารเจือ SiP_2O_7 (PH1000) ที่อุณหภูมิ 1040 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 0.8 ลิตรต่อนาที เมื่อผ่านขั้นตอนนี้จะได้อะตอมสารเจือที่ปริมาณความเข้มข้นต่างๆ กัน

17. การลอกชั้น Phosphorous glass

- จุ่มแผ่นผลึกลงในกรดกัดแก้ว 5% นาน 20 วินาที

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์

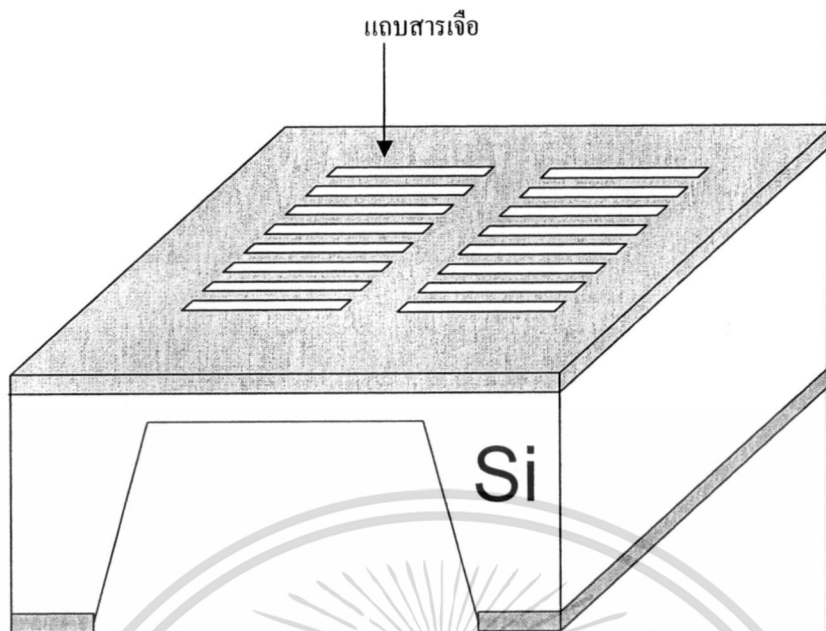
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

18. การทำความสะอาดผิวผลึก

เหมือนข้อ 7

19. กระบวนการ n drive-in

ทำการขับเคลื่อนฟอสฟอรัสพร้อมทั้งทำสร้างซิลิคอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตรต่อนาที แสดงดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ภาพตัดขวางแถบแพร่สารเจือ

20. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี III

เพื่อทำการเปิดช่องรอยต่อสัมผัสระหว่างผลึกซิลิคอนและขั้วโลหะ ซึ่งทำเหมือนข้อ 4

21. การกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

เหมือนข้อ 5

22. การลอกชั้นสารไวแสง

เหมือนข้อ 6

23. การทำความสะอาดผิวผลึก

เหมือนข้อ 7

24. การเคลือบชั้นไททาเนียม (Ti) ในสุญญากาศ

โดยใช้อุปกรณ์สุญญากาศ (Vacuum evaporation) ทำการเคลือบแผ่นผลึกด้วยชั้น

ไททาเนียม หนา ประมาณ $0.5 \mu\text{m}$

25. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี IV

ใช้กระจกมาสก์ที่ IV เป็นต้นแบบสำหรับการกัดส่วนของไททาเนียม ที่ไม่ต้องการออก
ขั้นตอนนี้ใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ โดยมีขั้นตอนดังนี้คือ

- อบแห้งเพื่อไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 85-90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสง โดยใช้อุปกรณ์ Spinner ขนาด 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20

วินาที

- อบครั้งแรกให้น้ำยาแห้งที่อุณหภูมิ 85-90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ฉายแสงผ่านมาสก์ที่ I V ด้วยอุปกรณ์ Mask aligner เป็นเวลา 10 วินาที
- ล้างภาพโดยจุ่มลงในน้ำยา AZ-Developer 2 ครั้ง ๆ ละ 30 วินาที ล้างในน้ำบริสุทธิ์

แล้วเป่าแห้งทันทีด้วยก๊าซไนโตรเจน

- รอบครั้งที่สองให้แผ่นฟิล์มที่เหลืออยู่แห้งที่อุณหภูมิ 85-90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที

26. การกัดชั้นไททาเนียม

สารละลายที่ใช้กัดชั้นไททาเนียมได้แก่ สารละลายซึ่งมีกรดฟอสฟอริกเป็นหลัก จุ่มแผ่นผลึกที่เสร็จจากขั้นตอนที่แล้วลงในสารละลาย

27. การลอกชั้นสารไวแสงชนิดบวก

- จุ่มแผ่นผลึกลงในอะซิโตน ประมาณ 1 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

28. การเคลือบชั้นอลูมิเนียมในสุญญากาศ

โดยใช้อุปกรณ์ Vacuum evaporation ทำการเคลือบแผ่นผลึกด้วยชั้นอลูมิเนียมหนาประมาณ 1 μm

29. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี V

เพื่อสร้างลวดลายอลูมิเนียม ซึ่งทำเหมือนข้อ 25

30. การกัดชั้นอลูมิเนียม

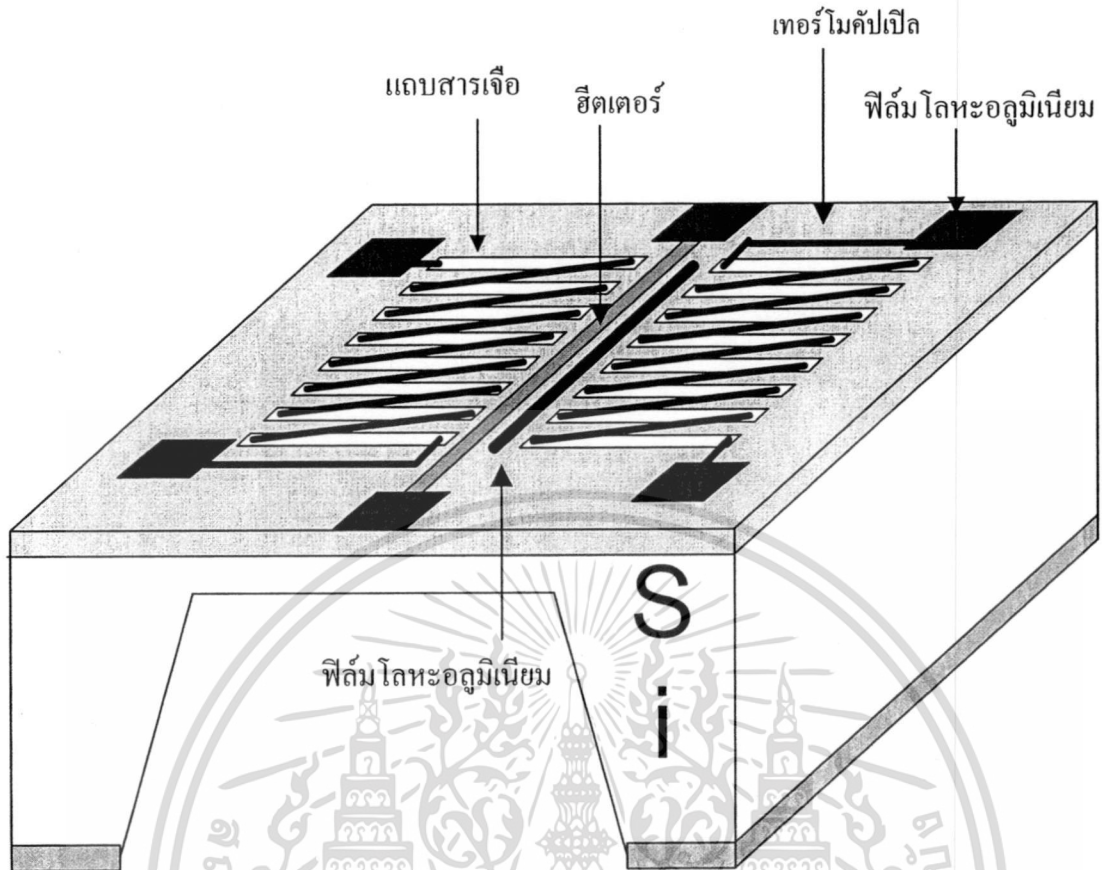
สารละลายที่ใช้กัดชั้นไททาเนียมได้แก่ สารละลายซึ่งมีกรดฟอสฟอริกเป็นหลัก จุ่มแผ่นผลึกที่เสร็จจากขั้นตอนที่แล้วลงในสารละลาย

31. การลอกชั้นสารไวแสงชนิดบวก

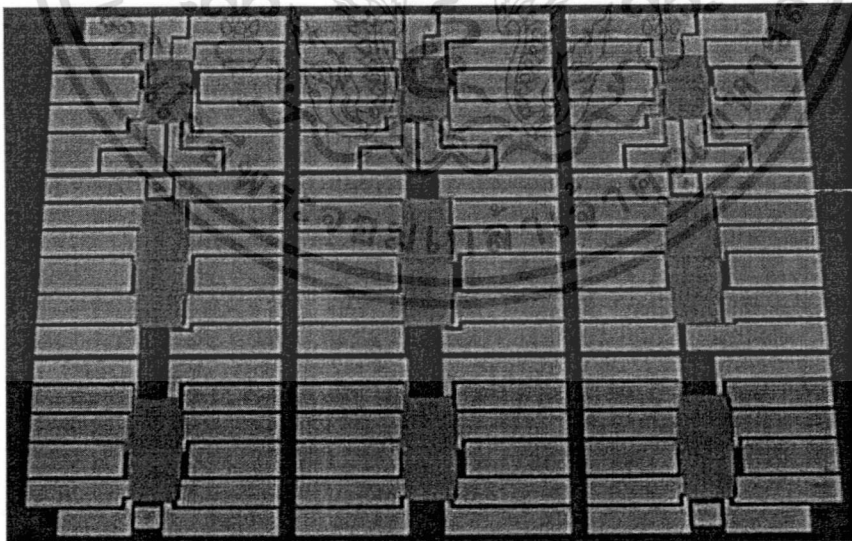
ทำเหมือนข้อ 27

32. กระบวนการ Sintering

ทำการ Sintering เพื่อให้ส่วนโลหะกับเนื้อซิลิคอนในส่วนขั้วสัมผัสเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิกโดยการทิ้งแผ่นผลึกไว้ในบรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1000 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้วจะได้แผ่นผลึกแสดงดังรูปที่ 4.16 และ 4.17



รูปที่ 4.16 ภาพตัดขวางเทอร์โมคัปเปิล



รูปที่ 4.17 รูปถ่ายด้านบนบนเทอร์โมคัปเปิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างเทอร์โมไฟลซ์ชนิดพี

ลำดับขั้นตอนการสร้างก็จะทำเหมือนกับลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างเทอร์โมไฟลซ์ชนิดเอ็น เพียงแต่เปลี่ยนฐานรองจากซิลิคอนชนิดพี มาเป็นชนิดเอ็นแล้วทำการแพร่สารเจือโบรอน



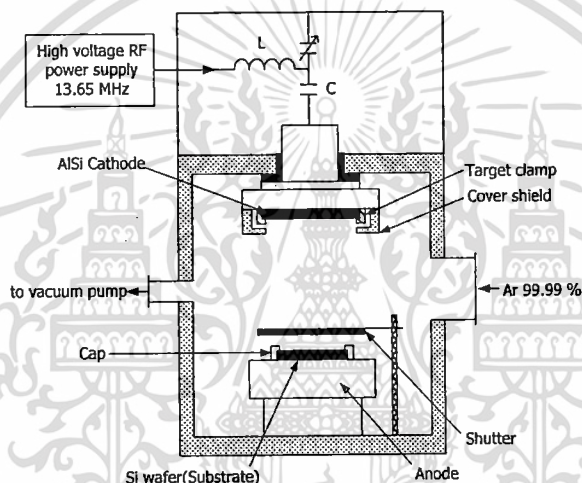
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า. ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

5.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มโลหะ[11]

ในการสร้างฟิล์มบางโลหะอลูมิเนียมโดยวิธีการสปัตเตอร์ริง แบบอาร์เอฟ ไดโอด (RF Diode Sputtering) ประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแรงดันสูง ซึ่งมีความถี่อยู่ในย่านความถี่วิทยุ (13.65 MHz), แหล่งจ่ายก๊าซ, ห้องสปัตเตอร์ (sputtering chamber), และปั๊มสุญญากาศ (rotary and diffusion pump) ภายในห้องสปัตเตอร์ประกอบด้วย ขั้วคาโทด (cathode) ขั้วแอโนด (anode) และชัตเตอร์ (shutter) โดยแผ่นอลูมิเนียมเป็นเป้าถูกติดไว้กับขั้วคาโทดดังแสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ระบบการสปัตเตอร์แบบ อาร์เอฟไดโอด

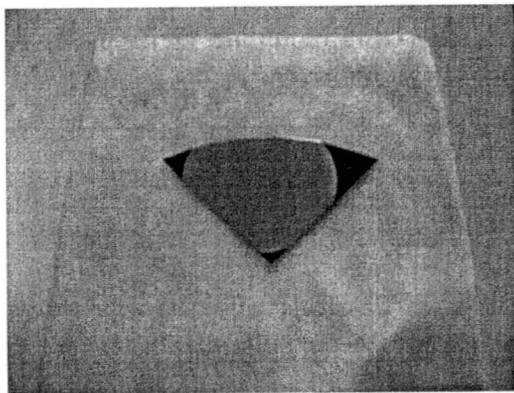
ขั้นตอนการสปัตเตอร์ เริ่มด้วยการนำแผ่นซิลิคอน วางลงบนขั้วแอโนด แล้วดูดอากาศออกจากห้องสปัตเตอร์จนกระทั่งเหลือความดันต่ำกว่า 5×10^{-7} มิลลิบาร์ แล้วปรับความดันให้ได้ 2×10^{-3} มิลลิบาร์ ปรับกำลัง RF จนได้ค่าที่จะทำการสปัตเตอร์ ทำการพรี-สปัตเตอร์ (pre-sputter) โดยปล่อยให้ระบบอยู่ในเงื่อนไขที่จะทำการสปัตเตอร์เป็นเวลา 30 นาที เพื่อทำความสะอาดผิวหน้าของอลูมิเนียม จึงเปิดชัตเตอร์ออกเพื่อเริ่มทำการสปัตเตอร์ ดังแสดงตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 เงื่อนไขการสปีดเตอร์อลูมิเนียมในการทดลอง

เงื่อนไข	รายละเอียด
ขั้วคาโทด	เป้าโลหะ อลูมิเนียม
บรรยากาศ	อาร์กอน 99.99 %
ความดัน	$2-5 \times 10^{-3}$ มิลลิบาร์
ระยะห่างของขั้วคาโทดและขั้วแอโนด	37 mm
กำลังงาน RF	100 - 150 วัตต์
อุณหภูมิของแอโนด	$25 - 30 ^\circ\text{C}$
ฐานรอง	ซิลิคอน ระนาบ(100) ปกคลุมด้วยซิลิคอนไดออกไซด์
	0.5 ไมครอน

กระบวนการสร้างฟิล์มโลหะเริ่มด้วยการปรับระยะห่างระหว่างขั้วคาโทดและขั้วแอโนด ซึ่งมีสองระยะคือ 27 และ 37 mm ที่ระยะความห่างที่ 27 mm จะมีขีดจำกัดเรื่องความดันที่ทำให้สร้างฟิล์ม ซึ่งจะมีช่วงการใช้งานได้ที่ความดันต่ำสุดที่ 2×10^{-2} มิลลิบาร์ ผลของฟิล์มโลหะที่ได้มีสีเทาดำและมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นฉนวน ดังนั้นจึงต้องมีการปรับระยะห่างระหว่างขั้วให้มากขึ้นไปที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 37 mm จะทำให้ช่วงความดันในการสปีดเตอร์ลดลงอยู่ในช่วง $2-5 \times 10^{-3}$ มิลลิบาร์ ทำให้ได้ฟิล์มโลหะมีคุณภาพดีขึ้น ในระหว่างกระบวนการสร้างฟิล์มโลหะจะเกิดความร้อนทั้งขั้วคาโทดและขั้วแอโนดเนื่องจากอะตอมของอาร์กอนวิ่งไปชนขั้วคาโทด ซึ่งมีโลหะอลูมิเนียม ทำให้อะตอมของโลหะกระเด็นตกลงมาที่แผ่นซิลิคอนและคลายความร้อนลงบนแผ่นซิลิคอน ซึ่งความร้อนนี้จะมีผลการเรียงตัวอะตอมโลหะ อลูมิเนียม ดังนั้นต้องควบคุมอุณหภูมิที่ขั้วแอโนดไม่ให้เกิน $40 ^\circ\text{C}$ จะได้

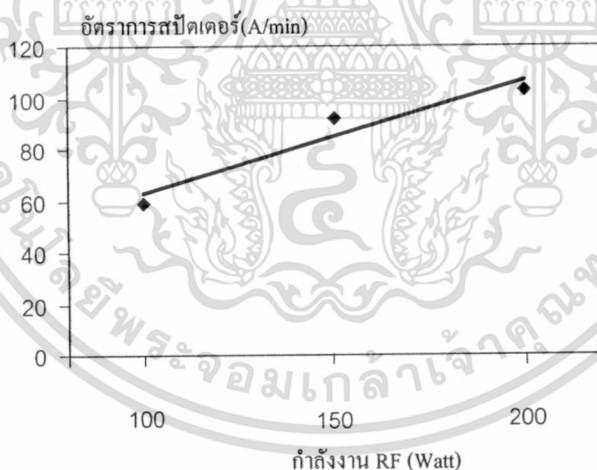
ในการทดลองนี้จะทำการสร้างฟิล์มอลูมิเนียมได้ฟิล์มอลูมิเนียม แสดงดังรูปที่ 5.2 อยู่ในห้องสปีดเตอร์ริง ซึ่งฟิล์มมีลักษณะเงาเหมือนกระจก



รูปที่ 5.2 फिल्मอลูมิเนียมที่ได้จากการสปัตเตอร์

5.1.1 อัตราการเกิดฟิล์มโลหะอลูมิเนียม

ในการทดลองนี้จะใช้กำลังงานในการสปัตเตอร์ที่ค่า 100, 150 และ 200 วัตต์ โดยใช้ที่ความดัน 2×10^{-3} มิลลิบาร์ เป็นเวลา 30 นาที ได้ผลดังรูปที่ 5.3 จากผลการทดลองจะให้ค่าอัตราการเกิดฟิล์มโลหะอลูมิเนียม จะมีความสัมพันธ์กับค่ากำลังงาน เมื่อให้กำลังงาน RF เพิ่มขึ้นจะได้อัตราการเกิดของฟิล์มมากขึ้นด้วย



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงาน RF และอัตราการสปัตเตอร์

5.1.2 ความเรียบของฟิล์มโลหะอลูมิเนียม

การวัดความเรียบของฟิล์มโลหะอลูมิเนียม โดยใช้เครื่อง TFM-120 เป็นเครื่องที่ใช้วัดความเรียบของฟิล์ม มีหลักการทำงานคือเครื่องจะส่งคลื่นแสงความยาวคลื่น 400 - 800 นาโนเมตร ไปที่แผ่นฟิล์มแล้วสะท้อนกลับมาที่หัววัด สำหรับการวัดความเรียบของฟิล์มนั้นจะต้องมีตัวอย่างมาตรฐานฟิล์มอลูมิเนียมก่อนเพื่อวัดเป็นตัวอ้างอิงแล้วนำฟิล์มที่ได้จากสปัตเตอร์มาวัดเทียบกัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยเครื่องจะบอกความเรียบออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์(%) แสดงดังตารางที่ 5.2 โดยการใช้กำลังงาน
คงที่ 100 วัตต์ และ ใช้เวลา 30 นาที

ตารางที่ 5.2 เงื่อนไขการสปีดเตอร์ ฟิล์มอลูมิเนียม และค่า Reflectance (%)

ความดันบรรยากาศ (มิลลิบาร์)	Reflectance (%)
2×10^{-3}	100
3×10^{-3}	100
4×10^{-3}	100
5×10^{-3}	100

5.2 สภาพความต้านทานของฟิล์มโลหะอลูมิเนียม

ทำการทดลองตรวจสอบคุณสมบัติสภาพความต้านทานของฟิล์มโลหะอลูมิเนียม โดยใช้
เงื่อนไขในการสปีดเตอร์เช่นเดียวกับหัวข้อ 5.1 คือใช้กำลังงานในการ สปีดเตอร์ค่าต่างๆ ที่ความดัน
 2×10^{-3} มิลลิบาร์ เป็นเวลา 30 นาที ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 5.3 โดยใช้เครื่องวัดสภาพความ
ต้านทาน (four point probe) โดยมีหลักการทำงานวัดความนำไฟฟ้าของฟิล์มโลหะโดยการวัด
กระแสที่ไหลผ่านฟิล์มโลหะและวัดค่าแรงดันตกคร่อมระหว่างปลายทั้งสองข้างแล้วนำค่าที่ได้มา
คำนวณหาค่าความต้านทานแผ่น

ตารางที่ 5.3 สภาพความต้านทานของฟิล์มโลหะอลูมิเนียม

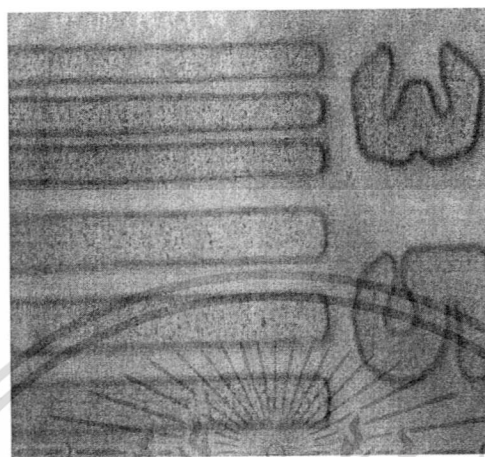
กำลังงาน RF (Watt)	ความต้านทานแผ่น (Ω/\square)
100	0.256
150	0.277
200	0.286

5.3 การทำให้เกิดลวดลายฟิล์มโลหะอลูมิเนียม

ผลการศึกษากระบวนการกัดฟิล์มโลหะอลูมิเนียม และลวดลาย โลหะอลูมิเนียม จะ
ทำการศึกษากระบวนการกัดฟิล์มโลหะอลูมิเนียม ด้วยเงื่อนไขดังต่อไปนี้ สารละลายที่ใช้ H_3PO_4 :
 HNO_3 : CH_3COOH : H_2O มีอัตราส่วนโดยปริมาตร 80 : 5 : 5 : 10 อุณหภูมิในการกัดประมาณ 40
องศาเซลเซียส อัตราการกัดโดยประมาณ 100 อังสตรอม/วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณภาพของการกัดฟิล์มโลหะอลูมิเนียม ด้วยเงื่อนไขและสารละลายได้ด้วยความคมชัดของลวดลายที่กัดได้ ดังในรูปที่ 5.4 จากรูปแสดงคุณภาพลวดลายของฟิล์มโลหะอลูมิเนียม มีความคมชัดต่อเนื่องเป็นอย่างดี ลวดลายเส้นเล็กสุดที่สามารถทำได้คือ 3 ไมครอน



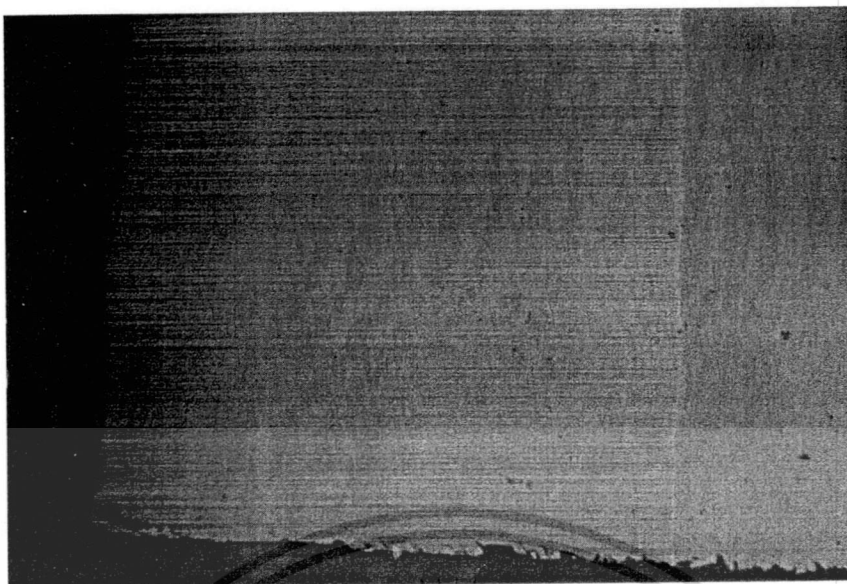
รูปที่ 5.4 ลวดลายฟิล์มโลหะอลูมิเนียม หลังการกัดด้วยกล้องจุลทรรศน์ อัตราขยาย 400 เท่า

การสร้างฟิล์มของอลูมิเนียม ด้วยวิธีการ อาร์เอฟไดโอด สปีดเตอร์ โดยการใช้ อลูมิเนียม เป็นเป้า ในบรรยากาศแก๊สอาร์กอน 99.99% ที่ความดัน $2-5 \times 10^{-3}$ มิลลิบาร์ ใช้ซิลิคอนเป็นฐานรองเพื่อตรวจสอบฟิล์ม พบว่าสามารถควบคุมความหนาด้วยการจับเวลา ลักษณะของฟิล์มที่ได้มีเป็นมันวาวเหมือนกระจกและได้ค่า Reflectance 100 % ความต้านทานแผ่น $0.2-0.3 \Omega/\square$ ความเรียบของฟิล์ม และคุณภาพลวดลายของอลูมิเนียมมีความคมชัดต่อเนื่องเป็นอย่างดี ลวดลายเส้นเล็กสุดที่สามารถทำได้คือ 3

5.4 การวิเคราะห์การแพร่สารเจือชนิดเอ็นและพี

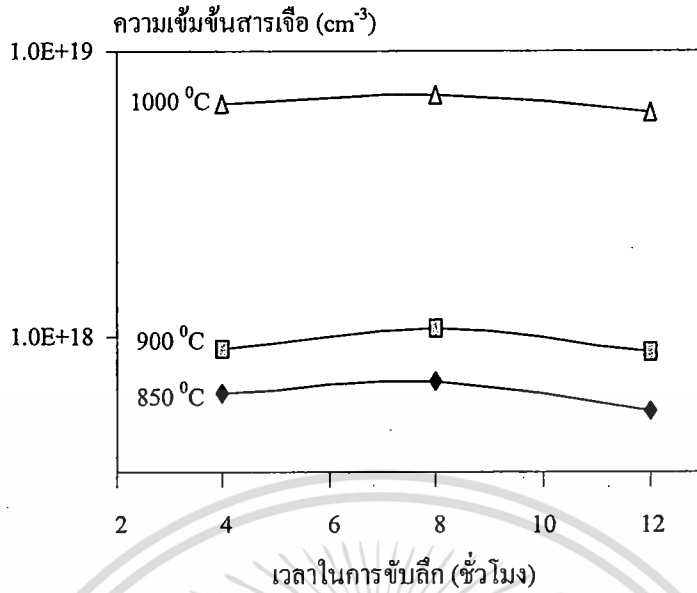
5.4.1 การศึกษาความเข้มข้นสารเจือชนิดเอ็นและชนิดพี

ในการทดลองนี้จะทำการศึกษาความเข้มข้นสารเจือชนิดเอ็นและพี ที่ได้จากการแพร่สารเจือ ถูกนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นสารเจือด้วยเครื่อง SR-210 (Spreading Resistance Profiler-210) ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดตรวจสอบความเข้มข้นสารเจือที่ลึกลงไปจากผิวระนาบ โดยการเริ่มจากการนำแผ่นซิลิคอนมาตัดให้มีขนาดเล็กประมาณ $2 \times 5 \text{ mm.}^2$ แล้วนำชิ้นงานไปขัดด้วยเครื่องขัดแสดงดังรูปที่ 5.5

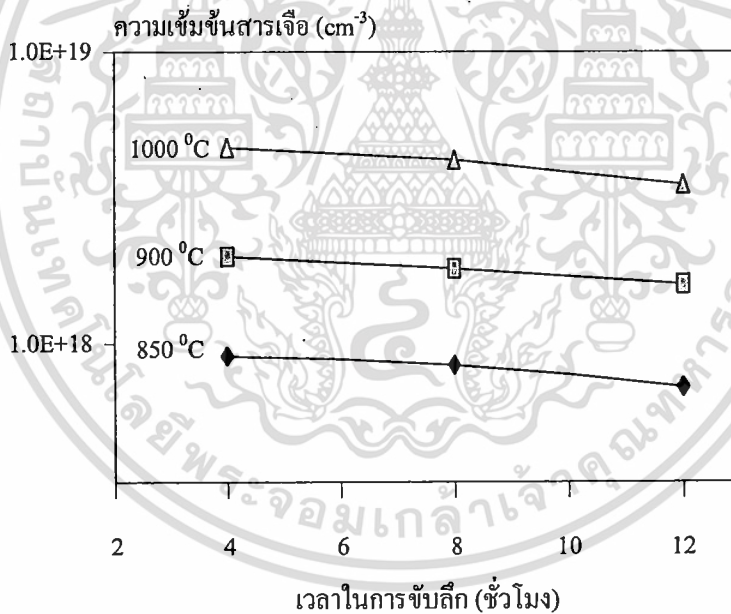


รูปที่ 5.5 ชิ้นงานที่ถูกขัดด้วยผงเพชร

จากรูปที่ 5.5 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของพื้นผิวที่ได้จากการขัดผิวหน้าด้วยผงเพชรขนาด $0.25 \mu\text{m}$ แล้วนำชิ้นงานนี้ไปวัดด้วยเครื่อง SR-210 จากรูปที่ 5.6 แสดงผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการขับเคลื่อนสารเจือฟอสฟอรัสต่อความเข้มข้นสารเจือที่ผิวของชิ้นงาน โดยการแพร่สารเจือเป็นเวลา 5 นาที และใช้อุณหภูมิต่างๆ กัน แล้วทำการขับเคลื่อนที่อุณหภูมิ 1100°C และเวลาต่างๆ กันคือ 4, 8 และ 12 ชั่วโมง เห็นว่าในช่วงแรกของขับเคลื่อนค่าความเข้มข้นสารเจือที่ผิวจะเพิ่มมากขึ้นเพราะว่าสารเจือฟอสฟอรัสเกิดการแพร่ออกมาที่ผิว (out of diffusion) และเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้นจะทำให้ค่าความเข้มข้นสารเจือที่ผิวหน้าลดลง ส่วนรูปที่ 5.7 แสดงผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการขับเคลื่อนสารเจือโบรอนต่อความเข้มข้นสารเจือที่ผิวของชิ้นงาน โดยทำการแพร่สารเจือเป็นเวลา 5 นาที และใช้อุณหภูมิต่างๆ กัน แล้วทำการขับเคลื่อนที่อุณหภูมิ 1100°C และเวลาในการขับเคลื่อนต่างๆ กันคือ 4, 8 และ 12 ชั่วโมง จะเห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไปค่าความเข้มข้นสารเจือที่ผิวจะมีค่าลดลง



รูปที่ 5.6 ผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการแช่ลิกอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสต่อความเข้มข้นสารเจือที่ผิวของขึ้นงาน



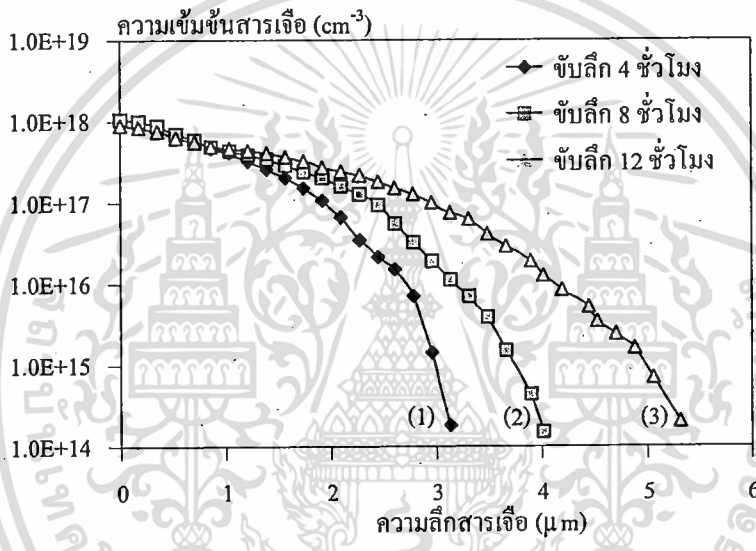
รูปที่ 5.7 ผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการแช่ลิกอะตอมสารเจือโบรอนต่อความเข้มข้นสารเจือที่ผิวของขึ้นงาน

5.4.2 การศึกษาความลึกของรอยฟิเอ็น

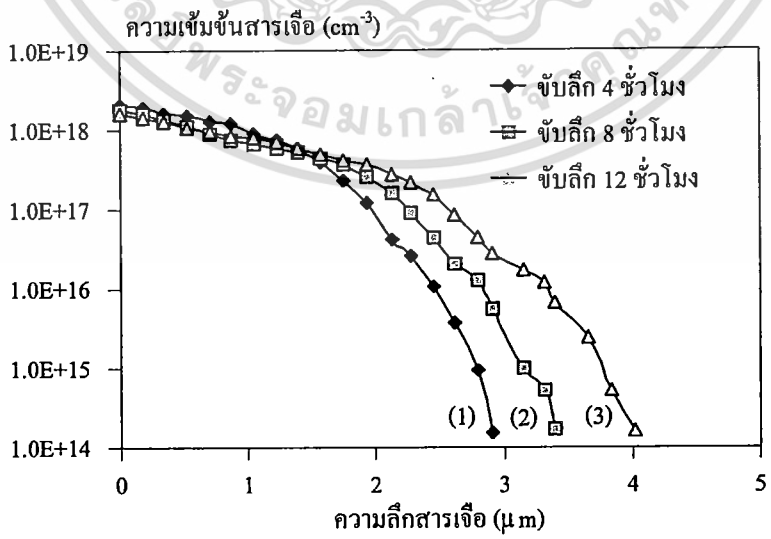
ในการทดลองนี้จะทำการศึกษาความลึกของรอยต่อฟิเอ็น โดยการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 5 นาที แล้วทำการแช่ลิกที่อุณหภูมิ 1100 °C ใช้เวลา 4, 8 และ 12 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 5.8 ความลึกและความเข้มข้นของสารเจือฟอสฟอรัสที่ใช้เวลาแช่ลิกต่างกันโดยเส้นที่ 1 แสดงการแช่ลิกเป็นเวลา 4 ชั่วโมง เส้นที่ 2 แสดงการแช่ลิกเป็นเวลา 8 ชั่วโมง

เอกร... การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเส้นที่ 3 แสดงการจับลิกเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากความสัมพันธ์ของรูปที่ 5.8 แสดงให้เห็นว่าในช่วงแรกของการจับลิก ค่าความเข้มข้นสารเจือที่ผิวและใต้ผิวจะมีค่าเพิ่มขึ้นและเมื่อทำการจับลิกใช้เวลานานขึ้นค่าความเข้มข้นสารเจือจะเริ่มลดลงและสารเจือแพร่ลงในผิวซึลิกอนจะเพิ่มมากขึ้น โดยการแพร่สารเจือโบรอนที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 5 นาที แล้วทำการจับลิกที่อุณหภูมิ 1100 °C ใช้เวลา 4, 8 และ 12 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 5.8 ความลึกและความเข้มข้นของสารเจือโบรอนที่ใช้เวลาจับลิกต่างกันโดยเส้นที่ 1 แสดงการจับลิกเป็นเวลา 4 ชั่วโมง เส้นที่ 2 แสดงการจับลิกเป็นเวลา 8 ชั่วโมง และเส้นที่ 3 แสดงการจับลิกเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากความสัมพันธ์ของรูปที่ 5.9 แสดงให้เห็นว่าการจับลิกใช้เวลานานขึ้นค่าความเข้มข้นสารเจือจะเริ่มลดลงและสารเจือจะแพร่ลงในผิวซึลิกอนจะเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 5.8 ความลึกและความเข้มข้นของสารเจือฟอสฟอรัสที่ใช้เวลาจับลิกต่างกัน



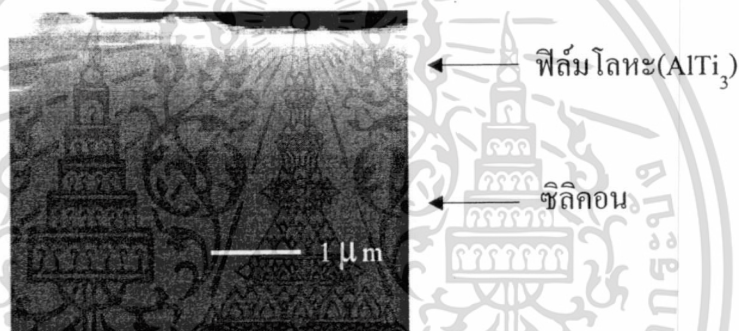
รูปที่ 5.9 ความลึกและความเข้มข้นของสารเจือโบรอนที่ใช้เวลาจับลิกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

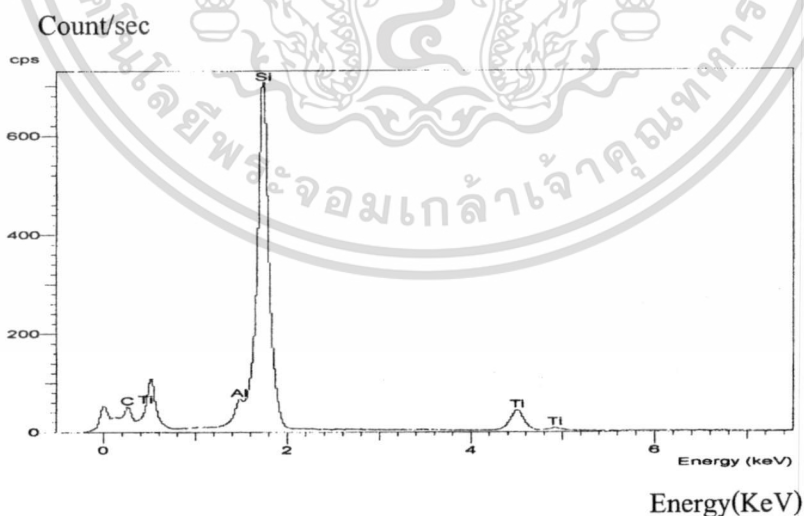
5.5 การศึกษาไมโครฮิตเตอร์บนฐานรองซิลิคอน

5.5.1 การวิเคราะห์วัสดุไมโครฮิตเตอร์ อลูมิเนียม-Ti

การเตรียมฟิล์มโลหะไททาเนียมและอลูมิเนียม ซึ่งถูกระเหยในระบบสุญญากาศ โดยการระเหยไททาเนียมและตามด้วยการระเหยอลูมิเนียม ซึ่งลักษณะเนื้อฟิล์มของไททาเนียมจะมีสีเทาและนำไปซินเตอร์ริงในบรรยากาศของไนโตรเจนจะเกิดปฏิกิริยาได้เป็นสารประกอบไททาเนียมไนไตรด์(TiN) ซึ่งมีสีทอง เมื่อนำฟิล์มไททาเนียมและอลูมิเนียม ไปซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 450 °C เป็นเวลา 5 นาที จะได้อัตลอคซ์ของ Tiอลูมิเนียม, โดยอยู่ระหว่างฟิล์มไททาเนียมและอลูมิเนียม สีที่ผิวของอลูมิเนียมฟิล์มยังเป็นสีเงินซึ่งเป็นสีของอลูมิเนียมฟิล์ม แสดงได้ว่าที่ผิวด้านบนยังเป็นฟิล์มโลหะอลูมิเนียม รูปที่ 5.10 แสดงการถ่ายภาพตัดขวางถ่ายด้วยเครื่อง SEM (Scanning Electron Microscopy) ให้ความหนาของฟิล์มอลูมิเนียม 0.8 μm และไททาเนียม 0.4 μm และรูปที่ 5.11 แสดงผลการวิเคราะห์ฟิล์มโลหะ(อลูมิเนียมTi₃) ด้วย EDS (Energy Dispersive Spectrometer)



รูปที่ 5.10 ภาพถ่ายตัดขวางของฟิล์มโลหะด้วย SEM



รูปที่ 5.11 ผลการวิเคราะห์ฟิล์มโลหะด้วย EDS

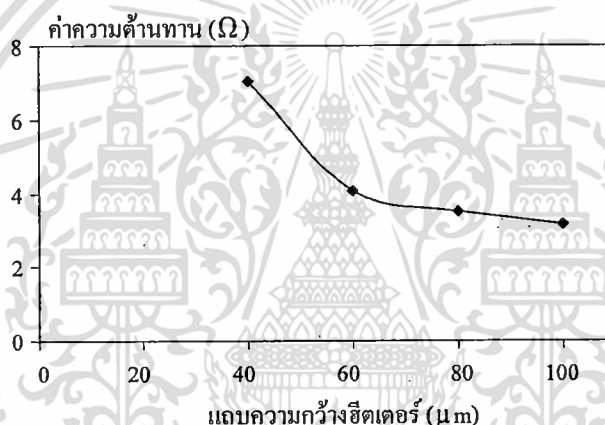
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5.2 ผลขนาดโครงสร้างไมโครฮีตเตอร์

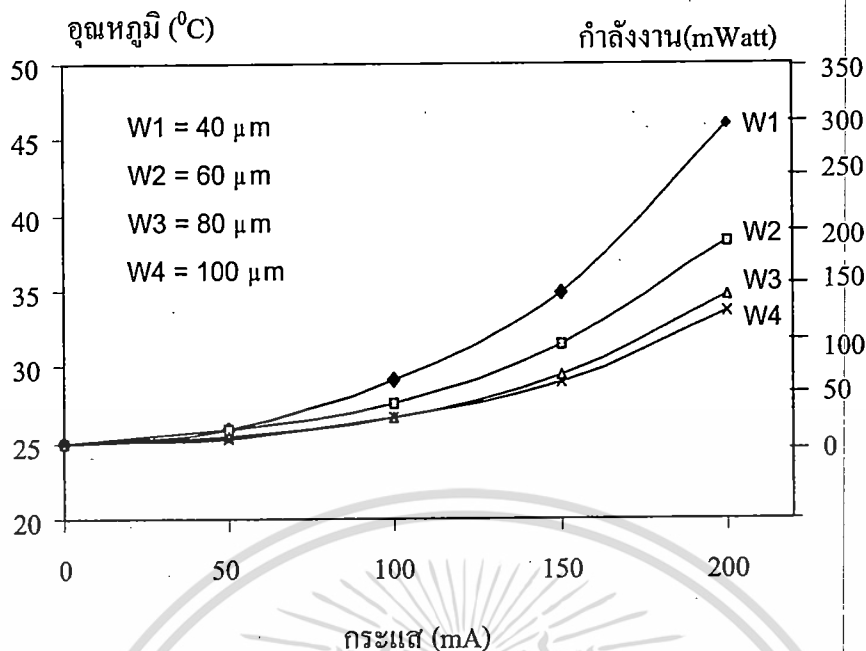
ในการทดลองนี้ได้ทำการออกแบบขนาดความกว้างฮีตเตอร์ให้มีขนาดต่างกันคือ 40, 60, 80 และ 100 μm ตามลำดับ และมีขนาดความยาวเท่ากันทั้ง 4 ชุด คือ 1400 μm ที่ขนาดฮีตเตอร์ต่างกันทำให้ค่าความต้านทานต่างกัน แสดงดังตารางที่ 5.4 และรูปที่ 4.12

ตารางที่ 5.4 ค่าความต้านทานของไมโครฮีตเตอร์

ไมโครฮีตเตอร์ชุดที่	ขนาดความกว้างไมโครฮีตเตอร์ (μm)	ค่าความต้านทาน (Ω)
1	40	7.03072
2	60	4.05873
3	80	3.48872
4	100	3.12810



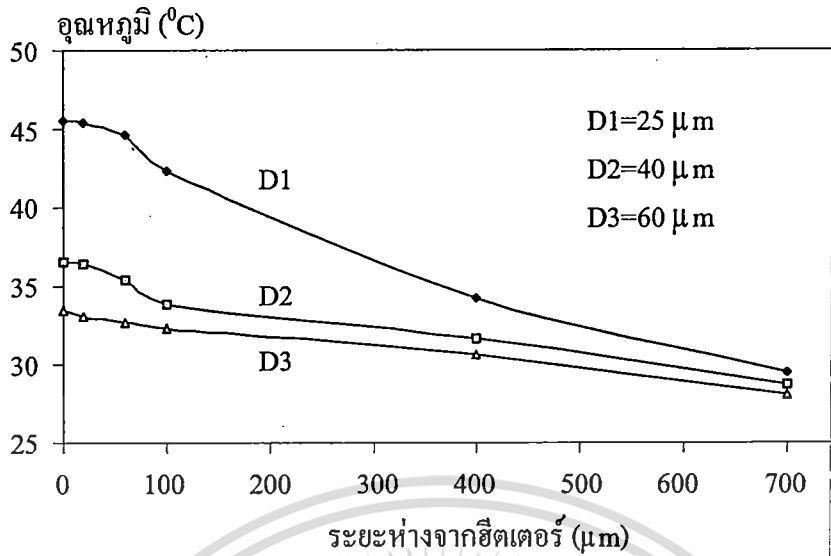
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความกว้างฮีตเตอร์และค่าความต้านทานฮีตเตอร์ก็คือตัวความต้านทาน เมื่อให้กระแสไหลผ่านตัวความต้านทานจะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานความร้อน โดยการทดลองนี้จ่ายกระแสในช่วง 0 – 200 mA และความหนาไดอะแฟรม 25 μm แสดงดังรูปที่ 5.13 การกระจายความร้อนบนไดอะแฟรมที่ฮีตเตอร์มีขนาดความกว้างต่างกันคือ 40, 60, 80 และ 100 μm ตามลำดับ ในช่วงแรกของการจ่ายกระแสจะไม่ค่อยเห็นความแตกต่างของอุณหภูมิ แต่เมื่อให้กระแสสูงขึ้นจะเห็นความแตกต่างของอุณหภูมิ ที่ขนาดความกว้าง 40 μm จะให้อุณหภูมิและพลังงานสูงสุด



รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและอุณหภูมิและกำลังงานของฮีตเตอร์ ที่มีขนาดความกว้าง (W) ต่างกัน

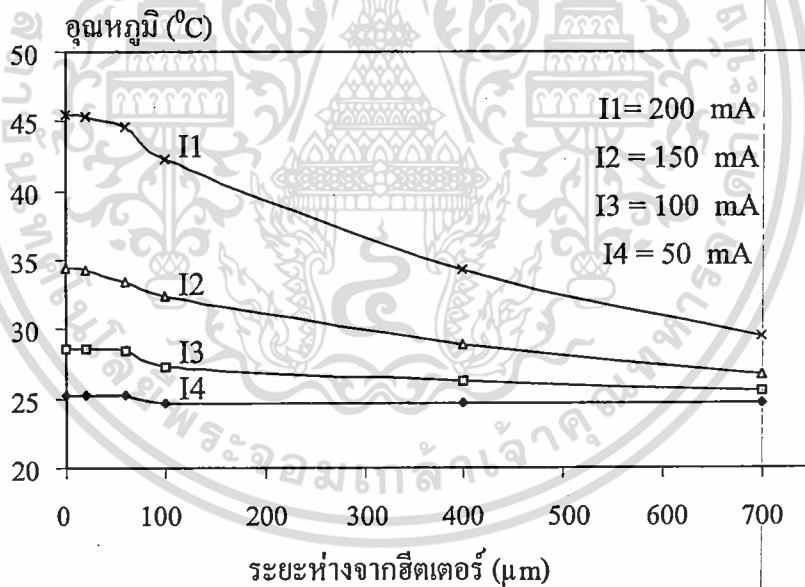
5.5.3 ผลของไมโครฮีตเตอร์บนไดอะแฟรม

ในการทดลองนี้ทำการศึกษาการกระจายความร้อนของฮีตเตอร์ที่มีความหนาต่างกัน คือ 25, 40 และ 60 μm ตามลำดับ และยังมีตัวตรวจวัดการกระจายความร้อนบนไดอะแฟรมซิลิคอน เป็นฟิล์มอลูมิเนียมที่มีระยะห่างจากไมโครฮีตเตอร์ 0, 20, 60, 100, 400 และ 700 μm ตามลำดับ จากรูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ของการกระจายความร้อนบนไดอะแฟรมที่มีความหนาต่างกัน คือ 25, 40 และ 60 μm ใช้ฮีตเตอร์ขนาดความกว้าง 40 μm โดยการจ่ายกระแสคงที่ 200 mA จากกราฟความสัมพันธ์จะเห็นได้ว่าที่ขนาดความหนาไดอะแฟรม 25 μm พบว่าจะให้อุณหภูมิของฮีตเตอร์และการกระจายความร้อนที่สูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากการสูญเสียความร้อนน้อยกว่าไดอะแฟรมที่หนากว่า



รูปที่ 4.14 การกระจายความร้อนบนไดอะแฟรมที่ความหนาต่างกัน

จากรูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ของการกระจายความร้อนที่จ่ายขนาดกระแสต่างกัน คือ 50, 100, 150 และ 200 mA



รูปที่ 4.15 การกระจายความร้อนของอิเล็กโทรดที่ขนาด 40 μm โดยความหนาของไดอะแฟรม 25 μm

5.6 ผลของการซินเตอร์กับรอยสัมผัสโอห์มมิก[12]

สิ่งสำคัญในการใช้กระบวนการทางเมทัลโลเซชัน สร้างรอยต่อสัมผัสระหว่างฐานรอง (Substrate) ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของเรคตีไฟย์และรอยต่อสัมผัส โอห์มมิก ดังนั้นเมื่ออุปกรณ์ที่จุดสัมผัสต้องการคุณสมบัติของไดโอดต้องพิจารณากำแพงศักย์ของโลหะที่จะนำมาใช้สำหรับการพิจารณาโอห์มมิกต้องให้รอยต่อสัมผัสมีความต้านทานต่ำ ซึ่งสามารถกำหนดคุณสมบัติของรอยต่อสัมผัสโอห์มมิกได้

จากผลของรอยสัมผัสโอห์มมิกที่ดีจะต้องมีความต้านทานต่ำแต่เนื่องมาจากผิวของสารกึ่งตัวนำกับชั้นของโลหะและชั้นสารกึ่งตัวนำกรณีเช่นนี้จะทำให้รอยสัมผัสที่ค่าความต้านทานสูงนั้นไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งานเพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว หลังจากสร้างชั้นโลหะบนผิวซิลิคอนที่มีความเข้มสูงบริเวณที่เป็นรอยสัมผัสแล้วรอยสัมผัสที่จะถูกนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงค่าหนึ่งเพื่อให้อะตอมของโลหะสามารถแพร่ผ่านออกไซด์บางและเข้าไปในชั้นสารกึ่งตัวนำได้ จะทำให้รอยสัมผัส โอห์มมิกที่ดีมีความต้านทานต่ำ วิธีการเช่นนี้ถูกเรียกว่า “การแอนนีสล” (annealing) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การซินเตอร์ (sintering)

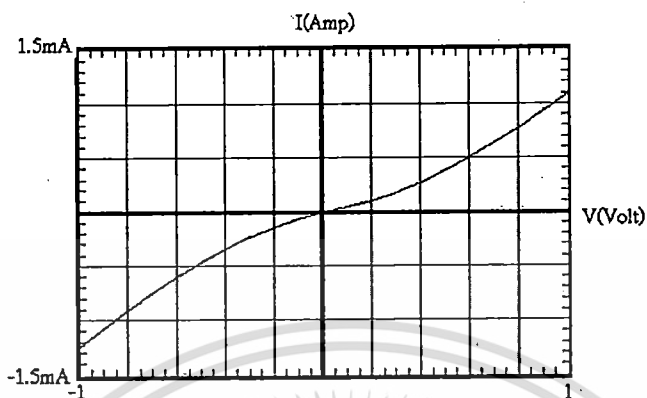
การซินเตอร์เป็นการให้ความร้อนที่พอเหมาะ กับ โลหะอลูมิเนียมเพื่อให้โลหะมีการยึดติดกับพื้นผิวสารกึ่งตัวนำได้ดีและทำให้ลดการเกิดช่องว่างระหว่างรอยสัมผัสให้น้อยที่สุด

จากการทดลองจะใช้อุณหภูมิในการซินเตอร์ ที่ต่างกันทำให้ทราบว่า การซินเตอร์ นั้นมีผลต่อกราฟเชิงเส้นของกระแสและแรงดันอย่างมาก โดยเฉพาะการกำหนดอุณหภูมิในการซินเตอร์ จะต้องให้อุณหภูมิที่พอเหมาะซึ่งถ้าให้อุณหภูมิที่ มากเกินไปก็อาจจะทำให้เกิดปรากฏการทะลุผ่านรอยต่อพีเอ็นที่เรียกว่าสไปค์ (spike) แต่ถ้าให้อุณหภูมิต่ำก็จะทำให้เกิดรอยต่อโอห์มมิกที่ไม่ดีดังแสดงในรูปที่ 4.16, 4.17 และ 4.18 ซึ่งใช้อุณหภูมิในการซินเตอร์ที่ค่าต่างๆกันไป โดยกำหนดเวลาในการซินเตอร์ที่ 30 นาที

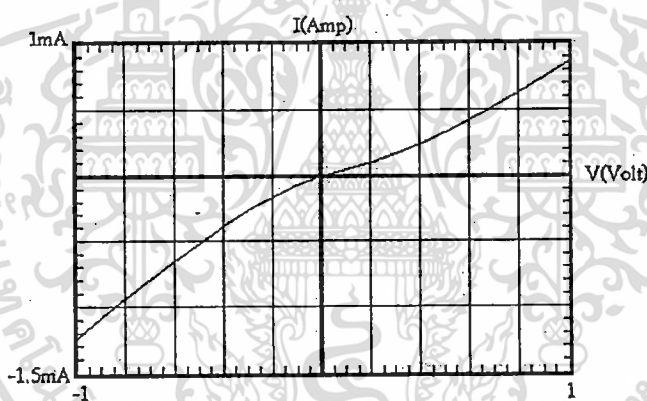
จากกราฟแสดงคุณลักษณะกระแสและแรงดัน ในกราฟต่างๆที่แสดงให้เห็น ในรูปที่ 4.16 เมื่อให้อุณหภูมิในการซินเตอร์ที่ 350°C จะพบว่า กราฟคุณลักษณะของกระแสและแรงดัน ที่ได้ยังไม่มีความเป็นเชิงเส้น ด้วยเหตุที่ว่าอุณหภูมิของการซินเตอร์ยังมีค่าน้อยอยู่จึงทำให้ รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำยังไม่เกิดเป็นรอยสัมผัสที่สมบูรณ์ซึ่งอาจจะเกิดจาก ระหว่างรอยสัมผัสดังกล่าวยังมีชั้นของออกไซด์บางชั้นอยู่ ส่งผลให้รอยสัมผัสนี้ยังไม่เป็นโอห์มมิก กราฟที่ได้จึงมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง (ในความเป็นจริงกราฟคุณลักษณะของกระแสและแรงดันจะต้องเป็นเชิงเส้น) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความต้านทานระหว่าง รอยสัมผัสมีค่าสูงมาก จากการทดลองเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไปเรื่อยๆจะพบว่าความชันของกราฟที่แสดงในรูปที่ 4.17, 4.18 เริ่มที่จะมีกราฟคุณลักษณะของกระแสและแรงดันที่มีความเป็นเชิงเส้นเรื่อยๆและค่าความต้านทานระหว่างรอยสัมผัสมีค่าลดน้อยลง จนเมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิในการซินเตอร์ ที่ 400°C กราฟแสดง

คุณลักษณะของกระแสและแรงดันมีความเป็นเชิงเส้นตลอดทั้งกราฟ ดังแสดงในรูปที่ 4.18 ซึ่งก็การคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

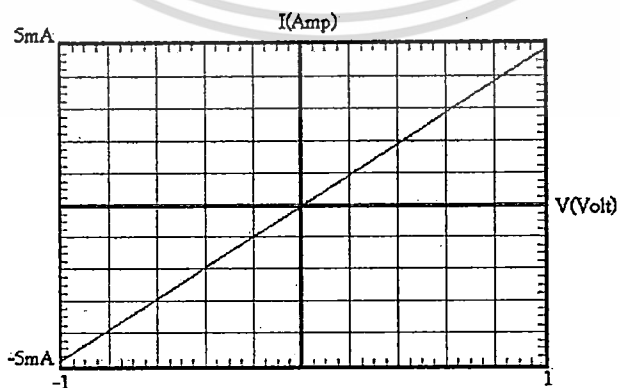
ตรงกับคุณสมบัติของรอยต่อแบบโอห์มิก และมีความต้านทานรอยสัมผัสที่ต่ำและนำกระแสได้ทั้งสองทิศทาง ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงใช้อุณหภูมิการซินเตอร์ที่ $400\text{ }^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงคุณลักษณะกระแสและแรงดัน ที่อุณหภูมิซินเตอร์ $350\text{ }^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงคุณลักษณะกระแสและแรงดัน ที่อุณหภูมิซินเตอร์ $380\text{ }^{\circ}\text{C}$



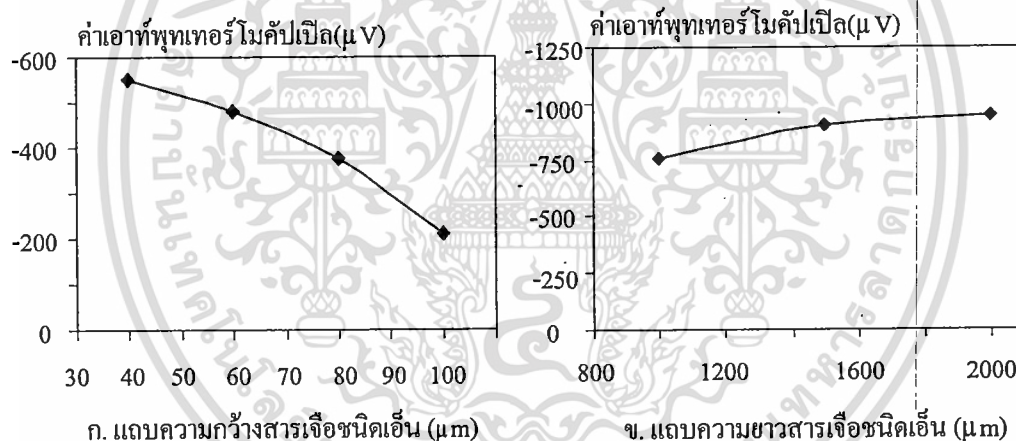
รูปที่ 4.18 กราฟคุณลักษณะกระแสและแรงดันของรอยต่อ Al/p^+ อุณหภูมิซินเตอร์ $400\text{ }^{\circ}\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

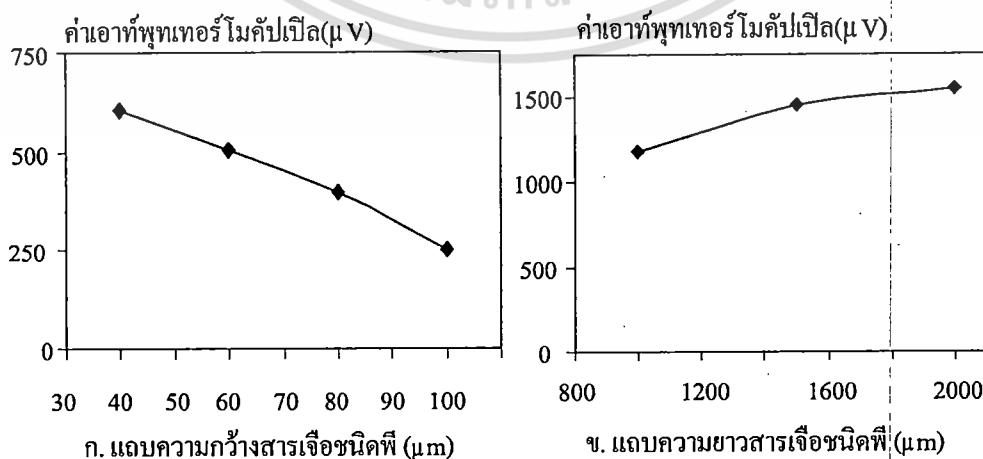
5.7 การศึกษาไมโครเทอร์โมคัปเปิล[12]

5.7.1 ผลของโครงสร้างต่อการเปลี่ยนแปลงสัญญาณเอาต์พุต

เมื่อทำการแพร่สารเจือเพื่อสร้างเป็นแถบสารเจือแล้วจะทำการสร้างฮีตเตอร์เป็นตัวกำเนิดความร้อน ซึ่งในการทดลองนี้ใช้แถบความกว้างสารเจือต่างกันคือ 40, 60, 80 และ 100 μm และทุกตัวมีความยาวแถบสารเจือเท่ากัน 6000 μm และเมื่อเปลี่ยนขนาดความยาวสารเจือต่างกันคือ 1000, 1500 และ 2000 μm และทุกตัวมีขนาดความกว้างแถบสารเจือ 40 μm แสดงผลดังรูปที่ 5.19(ก) และ 5.19(ข) ซึ่งแสดงค่าเอาต์พุตเทอร์โมคัปเปิลของแถบสารเจือชนิดเอ็น ซึ่งค่าเอาต์พุตเทอร์โมคัปเปิลเป็นลบ สำหรับรูปที่ 5.20(ก) และ 5.20(ข) แสดงค่าเอาต์พุตเทอร์โมคัปเปิลของแถบสารเจือชนิดพี มีค่าเอาต์พุตเทอร์โมคัปเปิลเป็นบวก เห็นได้ว่าเมื่อแถบความกว้างสารเจือมีขนาดเล็กลงและยาวขึ้น จะทำให้ได้ค่าเอาต์พุตเทอร์โมคัปเปิลเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าเอาต์พุตเทอร์โมคัปเปิลจะมีค่าทั้งเป็นบวกและเป็นลบ ซึ่งจะสามารถนำไปใช้บอกชนิดของสารเจือได้ ว่าเป็นชนิดเอ็นหรือชนิดพี โดยที่ค่าความต้านทานแผ่น (sheet resistance) 15 Ω/\square และลึกลง 3.4 μm ของสารเจือฟอสฟอรัส และค่าความต้านทานแผ่น 20 Ω/\square และลึกลง 3.0 μm ของสารเจือโบรอน ตามลำดับ



รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ของค่าเอาต์พุตเทอร์โมคัปเปิลและแถบความกว้างและยาวสารเจือชนิดเอ็น

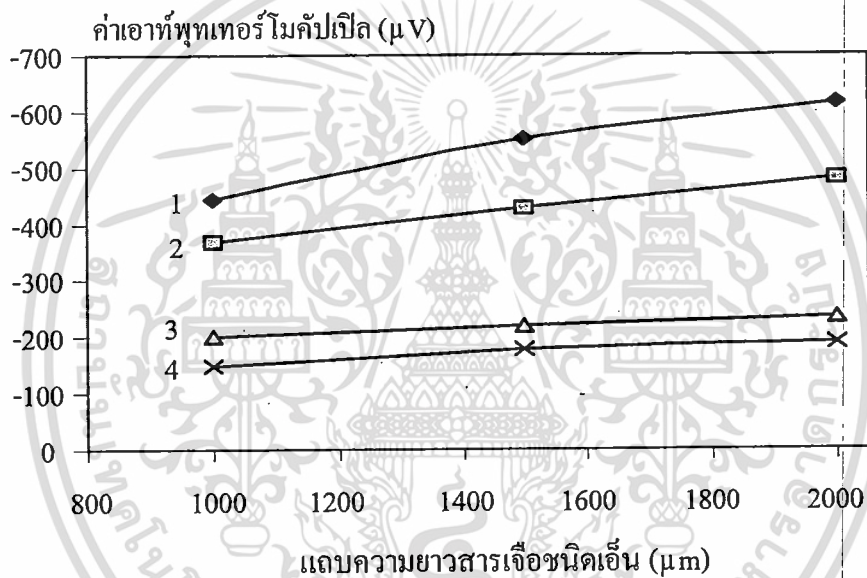


เอกสรูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ของค่าเอาต์พุตเทอร์โมคัปเปิลและแถบความกว้างและยาวสารเจือชนิดพี

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.7.2 ผลของความเข้มข้นสารเจือและความลึกของรอยต่อสารเจือที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเทอร์โมคัปเปิล

ในการทดลองนี้จะมีค่าความเข้มข้นสารเจือและความลึกสารเจือทั้งชนิดเอ็นและชนิดพี แสดงดังรูปที่ 5.21 แสดงค่าเอาท์พุทเทอร์โมคัปเปิลของสารเจือชนิดเอ็น และ รูปที่ 5.22 แสดงค่าเอาท์พุทเทอร์โมคัปเปิลของสารเจือชนิดพี จะเห็นได้ว่าค่าเอาท์พุทเทอร์โมคัปเปิลของสารเจือจะมีแนวโน้มค่าเอาท์พุทเทอร์โมคัปเปิลเพิ่มขึ้นเมื่อสภาพความต้านทานผิวมากขึ้นและความลึกเพิ่มขึ้น แต่บางครั้งก็ไม่เป็นตามที่คาดการณ์ ทั้งนี้เนื่องจาก การเปลี่ยนแปลงระดับเฟอร์มิ (change of fermi energy) การกระเจิงของประจุพาหะ (scattering of the charge carrier) และการดลากโฟนอน(phonon drag)



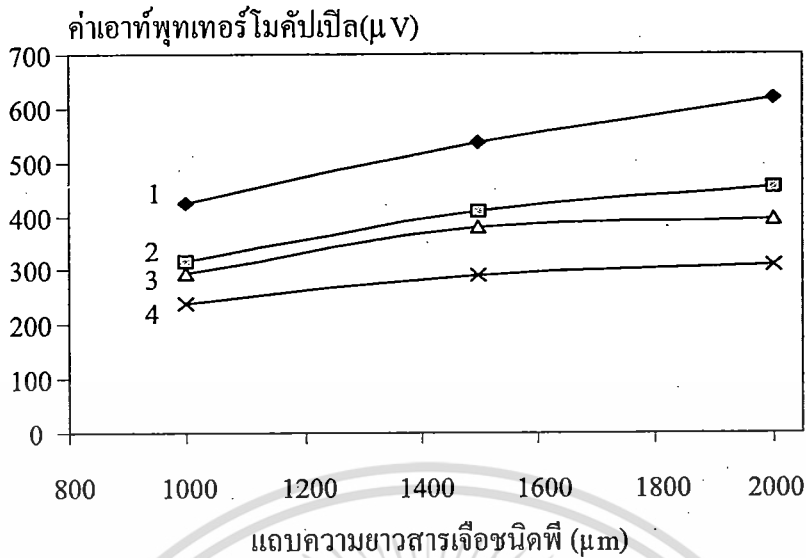
รูปที่ 5.21 ค่าเอาท์พุทเทอร์โมคัปเปิลของสารเจือชนิดเอ็น

$$1. \alpha = 1053 \mu\text{V/K}, \rho = 0.06 \Omega\text{cm}, \rho_{sh} = 134 \Omega/\square$$

$$2. \alpha = 811 \mu\text{V/K}, \rho = 0.02 \Omega\text{cm}, \rho_{sh} = 59 \Omega/\square$$

$$3. \alpha = 226 \mu\text{V/K}, \rho = 0.0014 \Omega\text{cm}, \rho_{sh} = 3 \Omega/\square$$

$$4. \alpha = 699 \mu\text{V/K}, \rho = 0.01 \Omega\text{cm}, \rho_{sh} = 32.9 \Omega/\square$$



รูปที่ 5.22 ค่าเอาต์พุตเทอร์โมคัปเปิลของสารเจือซิลิคอนชนิดพี

$$1. \alpha = 811 \mu\text{V/K}, \rho = 0.02 \Omega\text{cm} \rho_{sh} = 78.21 \Omega/\square$$

$$2. \alpha = 824 \mu\text{V/K}, \rho = 0.023 \Omega\text{cm} \rho_{sh} = 92.8 \Omega/\square$$

$$3. \alpha = 748 \mu\text{V/K}, \rho = 0.015 \Omega\text{cm} \rho_{sh} = 33.7 \Omega/\square$$

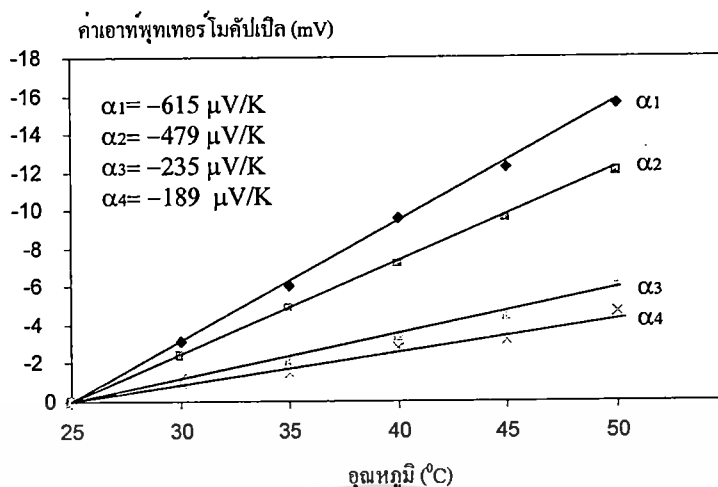
$$4. \alpha = 379 \mu\text{V/K}, \rho = 0.0028 \Omega\text{cm} \rho_{sh} = 8.75 \Omega/\square$$

5.8 การศึกษาคุณสมบัติของเทอร์โมคัปเปิลบนฐานรองไมโครฮีตเตอร์

ค่าเอาต์พุตการตอบสนองของเทอร์โมคัปเปิลต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

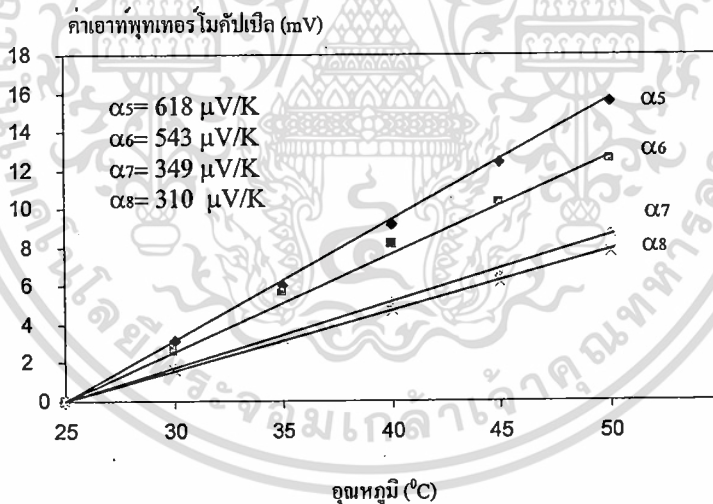
เทอร์โมคัปเปิลเป็นเซนเซอร์ที่เปลี่ยนพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยวัสดุตัวนำสองชนิดต่างกันคือ ซิลิคอนและอลูมิเนียม โดยที่ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะเกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้ง สอง ซึ่งเป็นไปตามการ $V_{AB} = \alpha_{AB}(T_2 - T_1)$ เริ่มทดสอบความเป็นเชิงเส้นของเทอร์โมคัปเปิลโดยการให้กระแสกับไมโครฮีตเตอร์ เพื่อกำเนิดความร้อนให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างรอยต่อร้อน (hot junction) และรอยต่ออ้างอิง (reference junction)

ดังรูปที่ 5.23 แสดงค่าเอาต์พุตเทอร์โมคัปเปิลชนิดเอ็น มีค่าสัมประสิทธิ์ซีบีแตกต่างกันคือ เส้นที่ (α1) -615 μV/K เส้นที่ (α2) -479 μV/K เส้นที่ (α3) -235 μV/K และเส้นที่ (α4) -189 μV/K โดยแกน X เป็นอุณหภูมิและแกน Y เป็นค่าเอาต์พุตของเทอร์โมคัปเปิล และค่าเอาต์พุตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าเอาต์พุตของเทอร์โมคัปเปิลและค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปมีลักษณะเป็นสมการเส้นตรง



รูปที่ 5.23 ค่าเอาต์พุตการตอบสนองของเทอร์โมคัปเปิลชนิดเอ็น

ส่วนรูปที่ 5.24 แสดงค่าเอาต์พุตเทอร์โมคัปเปิลชนิดพี มีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คต่างกันคือ เส้นที่ (α5) 618 μV/K เส้นที่ (α6) 543 μV/K เส้นที่ (α7) 349 μV/K และเส้นที่ (α8) 310 μV/K ค่าเอาต์พุตของเทอร์โมคัปเปิล และค่าเอาต์พุตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าเอาต์พุตของเทอร์โมคัปเปิลและค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปมีลักษณะเป็นสมการเส้นตรง



รูปที่ 5.24 ค่าเอาต์พุตการตอบสนองของเทอร์โมคัปเปิลชนิดพี

บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง

เทอร์โมคัปเปิล เป็นเซนเซอร์ชนิดหนึ่งที่เปลี่ยนพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเทอร์โมคัปเปิลประกอบด้วยวัสดุสองชนิดต่างกัน โดยมีปลายด้านถูกเชื่อมติดกันและเมื่อเกิดผลต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้งสองด้านจะเกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม โดยที่ค่าแรงดันจะแปรผันกับชนิดของวัสดุและผลต่างของอุณหภูมิ

กระบวนการสร้างไมโครเทอร์โมคัปเปิลนั้นจะใช้เทคโนโลยีกระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำซึ่งโครงสร้างจะอยู่บนโคอะเฟรมของซิลิคอนประกอบด้วย 2 ส่วน คือ เทอร์โมคัปเปิล และ ฮีตเตอร์ โดยที่เทอร์โมคัปเปิลจะประกอบด้วยวัสดุสองชนิดต่างกันคือ แถบฟิล์มบางโลหะอลูมิเนียม และ แถบแพร่สารเจือ มีด้วยกัน 2 ชนิด คือ ชนิดเอ็น(n-type) และ ชนิดพี(p-type) ในส่วนของฮีตเตอร์นั้นทำหน้าที่กำเนิดความร้อน

ศึกษาการสร้างฟิล์มโลหะด้วยวิธีการสปัตเตอร์ซึ่งใช้เป้าโลหะเป็นวัสดุโลหะอลูมิเนียม ด้วยเงื่อนไขของการสปัตเตอร์ ที่ความดันในห้องสปัตเตอร์ 5×10^{-7} บาร์ และความดันขณะทำการสปัตเตอร์ 2×10^{-3} บาร์ ใช้กำลังงาน RF 100 W 프리-สปัตเตอร์ (pre-sputter) เพื่อทำความสะอาดผิวหน้าเป้าโลหะ 30 นาที และทำการสปัตเตอร์ตามเงื่อนไขของความหนาที่ต้องการ

ฟิล์มโลหะที่ได้นำมาศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางไฟฟ้าของฟิล์มโลหะ จากเงื่อนไขการสปัตเตอร์กำหนดให้ความดันการสปัตเตอร์คงที่ 2×10^{-3} บาร์ โดยใช้กำลังงาน RF ต่างกันเป็น 100,150,200 วัตต์ จากเงื่อนไขดังกล่าวศึกษาอัตราการเกิดของฟิล์มโลหะด้วยวิธีการสปัตเตอร์ พบว่าเมื่อกำลังงาน RF เพิ่มขึ้นอัตราการเกิดของฟิล์มโลหะจะเพิ่มขึ้นด้วย การทดลองต่อมาศึกษาความเรียบของฟิล์มโลหะโดยใช้เงื่อนไขของความดันที่แตกต่างกันออกไปตั้งแต่ $2-5 \times 10^{-3}$ 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 2×10^{-3} บาร์ ระยะเวลาในการสปัตเตอร์เป็นเวลา 30 นาที การวัดสภาพความต้านทานตามเงื่อนไขของการสปัตเตอร์ดังกล่าวเห็นได้ว่า เมื่อกำลังงาน RF เพิ่มมากขึ้น จะทำให้ความต้านทานแผ่นเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้ก็เพราะว่า เมื่อกำลังงาน RF เพิ่มขึ้นจะทำให้ความร้อนบริเวณแผ่นเวเฟอร์เพิ่มขึ้นด้วยซึ่งเป็นผลให้เกิดการเรียงตัวของเม็ดเกรนภายในโลหะไม่ดีเท่าที่ควรเป็นผลทำให้สภาพความต้านทานแผ่นของโลหะเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิอนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อมาทำการศึกษาการทำให้เกิดลวดลายของฟิล์มโลหะอลูมิเนียมชนิดลึกลง เริ่มจากการสร้างลวดลายโลหะลงบนฟิล์มอลูมิเนียมชนิดลึกลงด้วยกระบวนการ โฟโตลิโทกราฟี แล้วทำการกัดด้วยสารละลาย ($H_3PO_4 : HNO_3 : CH_3COOH : H_2O$) เป็นวิธีการกัดแบบเปียก โดยให้อุณหภูมิที่สารละลาย 40 องศาเซลเซียส ผลที่ได้จากการกัดทำให้ทราบว่า การสร้างลวดลายโลหะ โดยใช้ pattern ของลวดลาย 5 ไมโครเมตร และ 3 ไมโครเมตร จะได้ฟิล์มที่ลวดลายโลหะที่ 5 ไมโครเมตร มีความสมบูรณ์ของลวดลายมาก และที่ 3 ไมโครเมตรก็ได้ลวดลายของฟิล์มโลหะที่ชัดเจน

จากการศึกษาการสร้างฟิล์มโลหะด้วยวิธีการระเหยในสุญญากาศโดยใช้เงื่อนไขของความดันภายใน chamber ได้ประมาณ 10^{-6} torr และให้แรงดันในการจุดไส้ทั้งสแตปประมาณ 40 วัตต์ ต่อมานำฟิล์มโลหะที่ได้มาศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มโลหะคือค่าความเรียบของฟิล์มโลหะ (Reflectance(%)) มีค่าเป็น 100% เทียบกับตัวอย่างฟิล์มมาตรฐาน และสภาพความต้านทานของฟิล์มโลหะที่วัดจากเครื่องวัดสภาพความต้านทานประมาณ $0.38 \Omega/\square$ โดยมีความหนาอยู่ที่ประมาณ 500 nm (ไส้โลหะ 7 เส้น)

ขั้นตอนต่อมา ศึกษากระบวนการซินเตอร์ โดยให้เงื่อนไขของอุณหภูมิในการซินเตอร์ที่ $320^\circ C, 350^\circ C, 380^\circ C$ และ $400^\circ C$ ใช้เวลาในการซินเตอร์ 30 นาที จากเงื่อนไขดังกล่าวสรุปได้ว่าอุณหภูมิที่พอเหมาะสำหรับโลหะอลูมิเนียมเพื่อให้โลหะมีการยึดติดกับพื้นผิวสารกึ่งตัวนำได้ดีและทำให้ลดการเกิดช่องว่างระหว่างรอยสัมผัสให้น้อยที่สุดเป็น $400^\circ C$

กระบวนการแพร่สารเจือแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอนคือ การแพร่สารเจือ และการขับลึก ในกระบวนการแพร่สารเจือจะให้อุณหภูมิในช่วง $850-1000^\circ C$ เป็นเวลา 5 นาที และทำการขับลึกที่อุณหภูมิ $1100^\circ C$ จากการศึกษาพบเมื่อทำแพร่สารเจือที่อุณหภูมิต่ำได้ค่าสภาพความต้านทานที่ผิวสูงกว่าที่ทำการแพร่สารเจือที่อุณหภูมิสูงกว่า จะได้ค่าความต้านทานที่ผิวอยู่ในช่วง $3-134 \Omega/\square$ และความลึกของสารเจืออยู่ในช่วง $3-5 \mu m$

ฮีตเตอร์คือตัวความต้านทานที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานความร้อน โดยการผ่านกระแสผ่านตัวความต้านทาน ซึ่งฮีตเตอร์ประกอบด้วยโลหะ 2 ชนิด คือ อลูมิเนียม และ ไททาเนียม ถูกระเหยในระบบสุญญากาศได้เป็นฟิล์มโลหะ ทำให้ฮีตเตอร์เทอร์ทอนกระแสได้สูงขึ้น ถ้าใช้ฟิล์มไททาเนียมอย่างเดียวโดยไม่มีฟิล์มอลูมิเนียมคลุมอยู่ที่ผิวหน้า ทำให้ไททาเนียมไม่สามารถทำงานได้เนื่องจากกระบวนการสร้างต้องผ่านกระบวนการซินเตอร์จึงจะได้ไททาเนียมไนไตรด์ (TiN) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวน โดยโครงสร้างฮีตเตอร์จะอยู่บนไดอะแฟรมที่มีความหนาต่างกันคือ 25 , 40 และ 60 μm เมื่อจ่ายกระแสมากขึ้นพบว่าอุณหภูมิของฮีตเตอร์จะสูงขึ้น และฮีตเตอร์ขนาด 40 μm ให้อุณหภูมิสูงสุด สำหรับการกระจายความร้อนบนไดอะแฟรมค่าอุณหภูมิจะลดลงเมื่อระยะห่างจากแหล่งกำเนิดความร้อนเพิ่มมากขึ้น ที่ไดอะแฟรมหนา 25 μm ให้อุณหภูมิสูงสุด $45.5^\circ C$ และการกระจายความร้อนจะมีอุณหภูมิสูงกว่าเมื่อเทียบกับไดอะแฟรมที่หนากว่า เพราะแหล่งกำเนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] G.R. Lahiji, Kensall D. Wise. "A Batch-Fabricated Silicon Thermopile Infrared Detector." IEEE transactions on electron devices. vol ed-29. Jan 1982. pp. 14-22.
- [2] David Moser and Henry Baltes. "A high sensitivity CMOS gas flow sensor on a thin dielectric membrane." Sensors and Actuators. A37-38, 1993. pp. 33-37.
- [3] U. Diller, E. Kessler, S. Poser, V. Baier, J. Muller. "Low power consumption thermal gas-flow sensor basee on thermopiles of highly effective materials." Sensors and Actuators. A60, 1997. pp. 1-4.
- [4] สมศักดิ์ กীরตวิฑูฒิเศรษฐ์. หลักการวัดและใช้งานเคลื่อนมือวัดอุณหภูมิ. กรุงเทพฯ : บริษัท ส. เอเซียเพรส จำกัด. 2536.
- [5] S. Middelhoek, S.A. Audet. Silicon Sensors. Times Acadmic press, Inc, 1989.
- [6] นักสิทธิ์ คุ้มฒนาชัย. การถ่ายเทความร้อน. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซนเตอร์. 2526.
- [7] นิमित ชมนาวัง สมศักดิ์ เขียวศรีวิฑูฒิ และ สมเกียรติ สุขเดช, "การศึกษากการกัดซิลิกอนด้วยสารละลาย KOH," วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 11 ฉบับที่1, หน้า 53-56 มิถุนายน 2537.
- [8] M.P. Wu, Q. H. Wu, and W.H. Ko, "A Study on Deep Etching of Silicon Using Ethylenediamine-Pyrocatechol-Water," Sensors and Actuators, Vol 9, pp. 333, 1986.
- [9] A. Accorst G. Delapierre C. Vauchier and D. Charit, "A New Microsensor for Environmental Measurements," Sensors and Actuators B, 4, pp. 539-543, 1991.
- [10] C. Y. Ting and B. L. Crowder, "Electrical Properties of Al/Ti Contact Metallurgy for VLSI Application," J. Electrochem. Soc., Vol 129, No. 11, pp. 2590-2594, November 1982.
- [11] รังสรรค์ เมืองเหล็ก, ทรงพล รอดทอง, โสภณ พรหมชัย, เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล. "การพัฒนากระบวนการโลหะสำหรับเทคโนโลยีวงจรรวมซิลิคอนระดับ 5 ไมครอน ในประเทศไทย."การประชุมวิชาการทางไฟฟ้า ครั้งที่ 26. หน้า 1371-1374, พฤศจิกายน 2546.
- [12] ทรงพล รอดทอง, รังสรรค์ เมืองเหล็ก, โสภณ พรหมชัย, เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล. "การพัฒนาระบวนการโลหะของรอยสัมผัสโอห์มมิกสำหรับเทคโนโลยีวงจรรวมซิลิคอนระดับ 5 ไมโครเมตร ในประเทศไทย. " การประชุมวิชาการทางไฟฟ้า ครั้งที่ 27. ปีที่ 27 , หน้า 1330-1334 , พฤศจิกายน 2547.
- [13] R. Muanghlua, N. Atiwongsangthong, Y. Wongprasert A. Rerkratn and S. Cheersirikul, "The Study of Silicon Thermopile", The International Conference on Smart Materials (SmartMat-04), Dec 1-3, 2004, pp. 199-201.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

1. ค่าคงที่ทางฟิสิกส์

ชื่อ	สัญลักษณ์	ขนาด	หน่วย
ประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอน	q	1.60×10^{-19}	C
ค่าคงที่ของ โบลซ์แมน	k	1.38×10^{23}	J/K
ค่าคงที่ของแพลงค์	h	6.63×10^{-34}	J-S
ค่าเพอร์มิตติวิตีของอากาศ	ϵ_0	8.85×10^{-14}	F/cm
ค่าคงที่สเติเฟน โบลซ์แมน	σ	5.67×10^{-8}	W/m ² K

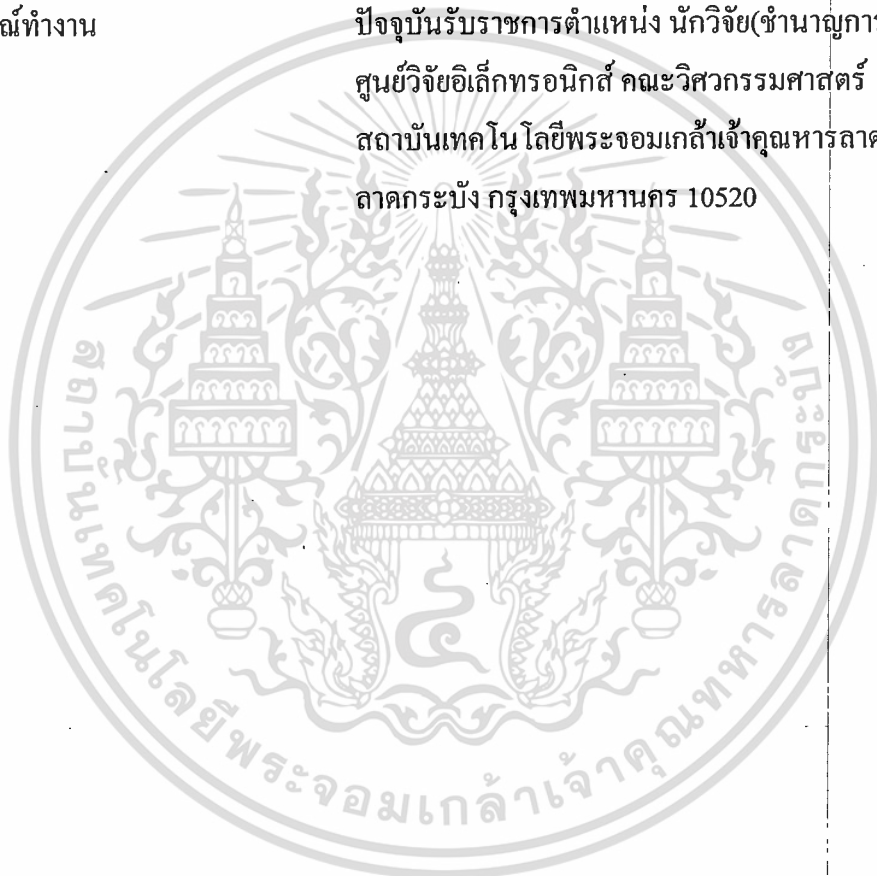
2. คุณสมบัติของซิลิคอน

เลขอะตอม	14	
น้ำหนักอะตอม	28.086	
ความหนาแน่นอะตอม	2.96×10^{22}	cm ³
ความหนาแน่น	2.328	g/cm ³
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	11.7	
พลังงานแถบต้องห้าม	1.115	eV
สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิของพลังงานแถบต้องห้าม	-2.3×10^{-4}	eV/ ⁰ C
จุดหลอมเหลว	1417	⁰ C
ดัชนีหักเห	3.420	
การขยายตัวเนื่องจากความร้อน	2.6×10^{-6}	(⁰ C) ⁻¹
ค่าคงที่ของผลึก	5.4307	⁰ A
ความดันต่อหน่วยปริมาตร	0.98×10^{12}	cm ² /dyn
ความร้อนในการละลาย	1000	J/g
ความหนาแน่นพาหะของซิลิคอนบริสุทธิ์	1.54×10^{10}	cm ⁻³
ความดันไอ	2.8×10^{-4}	mm Hg
โครงสร้างผลึก	F _{cc} , diamond	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายรังสรรค์ เมืองเหลือ
วันเดือนปีเกิด	วันที่ 12 มกราคม พ.ศ. 2513
ภูมิลำเนา	พิจิตร
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)
สถานที่สำเร็จการศึกษา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีที่สำเร็จการศึกษา	ปีการศึกษา 2544
ประวัติการทำงาน	ปัจจุบันรับราชการตำแหน่ง นักวิจัย(ชำนาญการ) 7 ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้