

การศึกษาความต้านทานของฟิล์มโพลีซิลิคอน และออมอร์ฟัสซิลิคอน หลัง
กระบวนการยิงฟุ้งประจุเพื่อใช้ในอุปกรณ์ตรวจจับความดัน

STUDY OF POLY-SI AND a-SI FILM RESISTANCE AFTER IMPLANTATION
PROCESS FOR PRESSURE SENSOR

การณ แซ่จอก
KAROON SAEJOK

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2550

การศึกษาความต้านทานของฟิล์มโพลีซิลิคอน และอมอร์ฟัสซิลิคอน หลัง
กระบวนการยึ่งฝังประจุเพื่อใช้ในอุปกรณ์ตรวจจับความดัน

STUDY OF POLY-Si AND a-Si FILM RESISTANCE AFTER IMPLANTATION
PROCESS FOR PRESSURE SENSOR

การุณ แซ่จอก

KAROON SAEJOK

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2550

**STUDY OF POLY-Si AND a-Si FILM RESISTANCE AFTER
IMPLANTATION PROCESS FOR PRESSURE SENSOR**

KAROON SAEJOK

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

2007

COPYRIGHT 2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาความต้านทานของฟิล์มโพลีซิลิคอน และอมอร์ฟัสซิลิคอน หลังกระบวนการยึ่งฝึ่งประจุเพื่อใช้ในอุปกรณ์ตรวจจับความดัน
นักศึกษา	นายการุณ แซ่จอก
รหัสประจำตัว	48061302
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.อัมพร โพธิ์ไย

บทคัดย่อ

ในวิทยานิพนธ์ จะกล่าวถึงการปรับปรุงการลดค่าความต้านทานของเปียโซรีซิสทีฟทีปรีซิสเตอร์ หรือ โพลีรีซิสเตอร์ที่อยู่ภายในอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่มีขนาดระดับไมโครเมตร โดยทำการศึกษาความแตกต่างกันของค่าความต้านทานเชิงแผ่นของโพลีรีซิสเตอร์ที่สร้างมาจากฟิล์มบางที่ต่างกัน 2 ชนิด คือ โพลีซิลิคอน และ อมอร์ฟัสซิลิคอน ที่ทำการสร้างด้วยวิธี LPCVD การปรับค่าปริมาณสารเจือในการยึ่งฝึ่งประจุที่ปริมาณสารเจือคั้งนี้คือ 1×10^{16} , 1.3×10^{16} , 1.6×10^{16} และ 2.0×10^{16} ไอออนต่อตารางเซนติเมตร และการปรับวิธีการแอนนัล ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 15 ชั่วโมง เป็นแบบมีการจ่ายก๊าซออกซิเจน กับไนโตรเจน และจ่ายก๊าซไนโตรเจนอย่างเดียว แล้วนำไปทำการวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่นด้วยเทคนิคโฟร์พอยท์โพรบ พบว่าค่าเฉลี่ยความต้านทานเชิงแผ่นที่ได้จากฟิล์ม อมอร์ฟัสซิลิคอน มีค่าน้อยกว่าโพลีซิลิคอนเท่ากับ 34.38 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสาเหตุมาจากหลังการแอนนัล ขนาดของเกรน ของ อมอร์ฟัสซิลิคอน มีขนาดใหญ่กว่าของโพลีซิลิคอน นอกจากนี้พบว่าเมื่อทำการ เพิ่มก๊าซออกซิเจนในการแอนนัลทำให้ ค่าความต้านทานเชิงแผ่นเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นได้นำไปประยุกต์ใช้และสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดัน พบว่าได้ค่าความไวในการตอบสนองของความดัน เท่ากับ $1.2 \mu\text{V/V/kPa}$ งานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ในการเลือกฟิล์มและเทคนิคการแอนนัลสำหรับการสร้างโพลีรีซิสเตอร์ ในการนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่มีขนาดระดับไมโครเมตร ซึ่งต้องการความต้านทานเปียโซรีซิสทีฟที่มีค่าต่ำ เพราะทำให้ได้ความต้านทานรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับโพลีซิลิคอนมีค่าลดลง และได้ค่า สัมประสิทธิ์ความต้านทานของอุณหภูมิ (TCR) อยู่ในช่วงบวก ซึ่งจะทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับอุณหภูมิเป็นเชิงเส้น นอกจากนี้วิธีการนี้ยังได้ช่วยลดปริมาณและเวลาในการเจือสารในการยึ่งฝึ่งประจุอีกด้วย

Thesis Title	Study of Poly-Si and a-Si Film Resistance after Implantation Process For Pressure Sensor
Student	Mr. Karoon Saejok
Student ID.	48061302
Degree	Master of Engineering
Program	Microelectronics Engineering
Year	2007
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr. Surasak Niemchareon
Thesis Co-Advisor	Dr. Amporn Poyai

ABSTRACT

This thesis presents methods to adjust sheet resistance (R_{sh}) of piezoresistor or polyresistor embedded in microscale pressure sensor. The research focused on the differences of sheet resistance between 2 types of thin film; namely polycrystalline silicon (polysilicon) and amorphous silicon (a-Si). The films were deposited by Low Pressure Chemical Vapor Deposition (LPCVD) technique. These films were implanted with dose of 1×10^{16} , 1.3×10^{16} , 1.6×10^{16} and 2.0×10^{16} ion/cm² and then annealed in nitrogen atmosphere with or without oxygen at 800 °C for 15 hours. Rsh is then measured with 4-point probe. The Rsh of polysilicon film is 34.48% higher than a-Si film, because, at the same temperature, annealing of a-Si film would produce larger grain size than polysilicon film. Furthermore, adding oxygen during annealing and including screen oxide technique will increase Rsh. The pressure sensor that used this condition of low Rsh of piezoresistor can achieve sensitivity of 1.2 μ V/V/kPa. This work will be useful for choosing film type and annealing technique for micro pressure sensors which need low Rsh. In addition, it can reduce contact resistance between metal and the polyresistor. The resulting temperature coefficient of resistance (TCR) is positive and will produce a linear relationship between resistance and temperature. Furthermore the dose and, hence, time for implantation can be reduced significantly.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และ อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม ดร.อัมพร โพธิ์ไย จากศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติที่ให้ความช่วยเหลือทุกด้าน ตั้งแต่ความรู้ในการวิจัย ที่มุ่งเน้นการปรับความต้านทานของโพลีรีซิสเตอร์ที่สัมพันธ์กับเนื้อหาในวิทยานิพนธ์ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตรวจทาน แก้ไขวิทยานิพนธ์และให้กำลังใจในการทำงานตลอดมา

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่วิจัยจากศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือในการทดลองและในการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดัน และให้คำปรึกษาในการใช้เครื่องมืออย่างดี

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ประจำปีการศึกษา 2548 จากบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

และสุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ พ่อและแม่ ที่คอยเป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนที่ดีตลอดมา

การุณ แซ่จอก

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	X
สารบัญรูป.....	XI
รายการคำย่อ.....	XV
รายการสัญลักษณ์.....	XVI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย.....	3
1.3 การดำเนินการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับจากงานวิจัย.....	4
1.5 รายละเอียดเนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	6
2.1 फिल्मโพลิซิติคอน และฟิล์มอมอร์ฟัสซิติคอน.....	6
2.1.1 โครงสร้างฟิล์มโพลิซิติคอน.....	6
2.1.2 ลักษณะโครงสร้างของฟิล์มอมอร์ฟัสซิติคอน.....	7
2.1.3 คุณสมบัติฟิล์มโพลิซิติคอน.....	8
2.1.4 กระบวนการสร้างฟิล์มโพลิซิติคอนและอมอร์ฟัสซิติคอน.....	9
2.1.5 เทคนิคกระบวนการวิเคราะห์ฟิล์มโพลิซิติคอน และอมอร์ฟัสซิติคอน.....	10
2.2 ตัวต้านทานที่สร้างในวงจรรวม และเซ็นเซอร์.....	11
2.2.1 ตัวต้านทานชนิดแพร่สารเจือ.....	12
2.2.2 ตัวต้านทานชนิดพินช์.....	13
2.2.3 ตัวต้านทานชนิดอิมแพกซ์เซชัน.....	14

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.2.4 ตัวต้านทานชนิดขึงฝิ่งประจุ.....	15
2.3 กระบวนการขึงฝิ่งประจุ	15
2.3.1 เทคนิคการขึงฝิ่งประจุ.....	16
2.3.2 เทคนิคการแอนนihilหลังการขึงฝิ่งประจุ.....	19
2.4 อุปกรณ์ตรวจจับความดันขนาดจุลภาค.....	20
2.4.1 โครงสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดันขนาดจุลภาคแบบเปียโซรีซีฟทิป.....	20
2.4.2 สัมประสิทธิ์เปียโซรีซีฟทิปตามยาวและสัมประสิทธิ์เปียโซรีซีฟทิปตามขวาง.....	22
2.4.3 ความเค้นตามความยาวและความเค้นตามขวาง.....	24
2.4.4 ความเค้นและสัมประสิทธิ์เปียโซรีซีฟทิปในตัวต้านทาน.....	26
2.5 วงจรวิทสโตนบริดจ์.....	29
2.6 ความไวในการตอบสนอง.....	30
2.7 เทคนิควัด R_c ด้วยโครงสร้าง CBK.....	31
2.8 ทีซีอาร์.....	32
บทที่ 3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และการวัด.....	34
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติฟิล์ม โพลีซิลิคอนและอมอร์ฟัส.....	34
3.1.1 จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	34
3.1.2 เครื่องวัดความหนา อิลลิปโซมิเตอร์.....	37
3.2 เครื่องวัดคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของโพลีซิลิคอน.....	39
3.2.1 เครื่องโพร์พอยท์โพรบ.....	39
3.2.2 ชุดเครื่องมือที่ใช้ในการวัดและทดสอบความดัน.....	43
บทที่ 4 โครงสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดันและการออกแบบการทดลอง.....	44
4.1 โครงสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ใช้ในงานวิจัย.....	44
4.2 โครงสร้างตัวต้านทานเปียโซรีซีฟทิป ชนิดโพลีซิลิคอนใน อุปกรณ์ตรวจจับความดัน	45

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.3 การออกแบบลดทลายตัวตรวจจับความดันแบบเปียโซรีซีฟทิป.....	47
4.4 ลำดับการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดัน.....	48
4.5 การออกแบบการทดลองสร้างโพลิรีซีสเตอร์.....	50
4.6 การออกแบบการทดลองสร้างรอยสัมผัสระหว่างโพลิซิลิคอนที่รับ การเชื่อมกับโลหะ.....	51
4.7 การออกแบบการทดลองสร้างโครงสร้างสำหรับวัด ทีซีอาร์ ของโพลิรีซีสเตอร์.....	53
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง.....	55
5.1 การเตรียมชิ้นงาน ฟิล์ม Poly-Si และ a-Si.....	55
5.1.1 การหาเงื่อนไขการปลูกฟิล์ม Poly-Si และ a-Si โดยการปรับอัตราการ จ่ายก๊าซ SiH_4	55
5.1.2 การหาเงื่อนไขการปลูกฟิล์ม Poly-Si และ a-Si โดยการปรับความดัน ภายในท่อควอทซ์.....	58
5.1.3 การทดสอบชิ้นงาน ฟิล์ม Poly-Si และ a-Si.....	59
5.2 ศึกษาคุณสมบัติของ ฟิล์ม Poly-Si และ a-Si หลังกระบวนการยิงฝั้งประจุ.....	62
5.2.1 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการศึกษาคุณสมบัติฟิล์ม Poly-Si และ a-Si หลังกระบวนการยิงฝั้งประจุ.....	62
5.2.2 ผลการวัดความต้านทานเชิงแผ่นด้วยเครื่องโพร์พอยท์โพรบ.....	62
5.2.3 ผลการวัดด้วยเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	63
5.3 ศึกษาความต้านทานของ โพลิรีซีสเตอร์ที่สร้างจาก ฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ที่เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเจือในกระบวนการยิงฝั้งประจุ.....	65
5.3.1 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการศึกษาความต้านทานของ โพลิรีซีสเตอร์ ที่สร้างจากฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ที่เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงปริมาณ สารเจือในกระบวนการยิงฝั้งประจุ.....	65
5.3.2 ผลการวัดความต้านทานเชิงแผ่นด้วยเครื่องโพร์พอยท์โพรบ.....	66

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

5.4	ศึกษาโครงสร้างและความต้านทานของ โพลีซิลิไซด์ที่สร้างจาก ฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ที่การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการแอนนัล.....	67
5.4.1	การเตรียมชิ้นงานสำหรับการศึกษา โครงสร้างและความต้านทานของ โพลีซิลิไซด์ที่สร้างจาก ฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ที่การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการแอนนัล.....	67
5.4.2	ผลการวัดความต้านทานเชิงแผ่นด้วยเครื่องโพร์พอยท์โพรบ.....	68
5.5	ศึกษาความต้านทานของ โพลีซิลิไซด์ที่สร้างจาก ฟิล์ม Poly-Si และ a-Si โดยการเพิ่มขึ้นซิลิคอน ไดออกไซด์.....	70
5.5.1	การเตรียมชิ้นงานสำหรับการศึกษาความต้านทานของ โพลีซิลิไซด์ที่สร้างจาก ฟิล์ม Poly-Si และ a-Si โดยการเพิ่มขึ้นซิลิคอน ไดออกไซด์.....	71
5.5.2	ผลการวัดความต้านทานเชิงแผ่นด้วยเครื่องโพร์พอยท์โพรบ ที่เงื่อนไขเพิ่มขึ้นซิลิคอน ไดออกไซด์.....	71
5.6	ศึกษาความต้านทานรอยสัมผัสระหว่างผิว โพลีซิลิไซด์ที่ได้รับการเจือสาร กับ โลหะ.....	72
5.6.1	การเตรียมชิ้นงานสำหรับการศึกษาความต้านทานรอยสัมผัสระหว่าง ผิวโพลีซิลิคอนที่ได้รับการเจือสาร กับ โลหะ	73
5.6.2	ผลการทดลองศึกษาความต้านทานรอยสัมผัสระหว่างผิวโพลีซิลิคอน ที่ได้รับการเจือสาร กับ โลหะ	75
5.7	ศึกษาหาค่า ทีซีอาร์ ของโพลีซิลิไซด์.....	77
5.7.1	การเตรียมชิ้นงานสำหรับศึกษาหาค่า ทีซีอาร์ ของโพลีซิลิไซด์.....	77
5.7.2	ผลการวัดค่า ทีซีอาร์	79
5.8	การทดสอบนำ โพลีซิลิไซด์ไปใช้ในกระบวนการสร้างเซ็นเซอร์ ตรวจจับความดัน.....	81
5.8.1	การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ความต้านทานเปียโซรีซีฟทิบ หรือโพลีซิลิไซด์ กับการเปลี่ยนแปลงความดัน.....	82

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.8.1.1 การทดลองศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ความต้านทาน เปียโซรีซีฟทิป หรือ โพลีรีซิสเตอร์ กับการเปลี่ยนแปลงความดัน.....	82
5.8.1.2 ผลการทดลองศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ความต้านทานเปีย โซรีซีฟทิป หรือ โพลีรีซิสเตอร์ กับการเปลี่ยนแปลงความดัน.....	83
5.8.2 การศึกษาหาค่าความไวของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน.....	84
5.8.2.1 การทดลองศึกษาหาค่าความไวของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน.....	84
5.8.2.2 ผลการทดลองศึกษาหาค่าความไวของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน.....	85
5.8.3 การทดลองศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเปียโซรีซีฟทิป กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบนอุปกรณ์ตรวจจับความดัน.....	86
บทที่ 6 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	87
6.1 การวิเคราะห์ผลการศึกษาโครงสร้างจาก พิล์ม Poly-Si และ a-Si ก่อนและหลัง กระบวนการยึงฝังประจุ.....	87
6.2 การวิเคราะห์ผลการศึกษาความต้านทานของโพลีรีซิสเตอร์ที่สร้างจาก พิล์ม Poly-Si และ a-Si ที่เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเจือในการยึงฝังประจุ.....	89
6.3 การวิเคราะห์การศึกษาโครงสร้างและความต้านทานของ โพลีรีซิสเตอร์ที่สร้างจาก ฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ที่การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการแอนนัล	91
6.4 การวิเคราะห์การศึกษาความต้านทานของ โพลีรีซิสเตอร์ที่สร้างจาก ฟิล์ม Poly-Si และ a-Si โดยการเพิ่มขึ้นซิลิคอนไดออกไซด์.....	91
6.5 การวิเคราะห์การศึกษาหา ทีซีอาร์	92
บทที่ 7 สรุป.....	93

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง.....	96
ภาคผนวก ก. ค่าคงที่ทางฟิสิกส์.....	99
ภาคผนวก ข. ตารางมาตรฐานการวัดเครื่องอิลลิปโซมิเตอร์.....	100
ภาคผนวก ค. ผลการวัด a-Si จากเครื่อง XRD.....	101
ภาคผนวก ง. ความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณสารเจือกับความหนาแน่นอะตอมสารเจือ กับพลังงานการยิงรังประจุ.....	102
ภาคผนวก จ. ตารางความถี่ในการยิงรังประจุ.....	103
ภาคผนวก ฉ. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	104
ประวัติผู้เขียน.....	141

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 อัตราการเติบโตของตลาดโลกของเซ็นเซอร์ที่สร้างมาจากซิลิคอนสำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์ จาก Sullivan (1993).....	1
2.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของฟิล์มโพลีซิลิคอนกับสารชนิดอื่นๆ.....	8
5.1 เงื่อนไขการทำความสะอาดแผ่นเวเฟอร์.....	56
5.2 เงื่อนไขการเตรียมฟิล์ม Poly-Si และ a-Si โดยการปรับอัตราการจ่ายก๊าซ SiH_4 ด้วย LPCVD.....	56
5.3 เงื่อนไขการเตรียมฟิล์ม Poly-Si และ a-Si โดยการปรับความดัน ด้วย LPCVD.....	58
5.4 เงื่อนไขการเตรียมฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ด้วย LPCVD ในงานวิจัยนี้.....	60
5.5 ผลการวัดคุณสมบัติของฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ด้วยเครื่องอิลลิปโซมิเตอร์.....	60
5.6 ผลการทดลองการวัดความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ด้วยเครื่องโพร์พอยท์โพรบก่อนและหลังกระบวนการยิงฝังประจุ.....	62
5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานรอยสัมผัสระหว่างผิวโพลิรีซีสเตอร์ที่ได้รับการเจือสาร กับโลหะกับความต้านทานเชิงแผ่น.....	75
5.8 ค่าความต้านทานของ โพลิรีซีสเตอร์ ที่อุณหภูมิ 25-99 องศาเซลเซียส.....	80

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 อุปกรณ์ตรวจจับความดันชนิด เปียโซรีซีฟทิปแบบบนเชิงผิว (surface).....	2
2.1 (ก) โครงสร้างโพลีซิลิคอน และ (ข) โครงสร้างผลึกซิลิคอน.....	6
2.2 ผิวหน้าของโครงสร้างโพลีซิลิคอน.....	7
2.3 วัตถุประสงค์ฐานระคับอะตอม.....	7
2.4 โครงสร้างเครื่อง LPCVD แบบเตาความร้อนในแนวนอน.....	9
2.5 เครื่อง LPCVD แบบเตาความร้อนในแนวนอน ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์	10
2.6 โครงสร้างในการคำนวณหาความต้านทานเชิงแผ่น.....	11
2.7 การแพรร็อกค้ำข้างของตัวต้านทานชนิดแพรร่สารเจือ.....	13
2.8 โครงสร้างตัวต้านทานชนิดฟิล์ม.....	14
2.9 ชั้นอิพิแทกซ์เซี่ยลบนแผ่นซิลิคอนฐานรอง.....	14
2.10 โครงสร้างของเครื่องยิงฝิ่งประจุ.....	17
2.11 โครงสร้างของแหล่งกำเนิดประจุชนิดเบอร์นาด.....	17
2.12 เครื่องยิงฝิ่งประจुरू่น NH-20SR ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์.....	18
2.13 โครงสร้างของ เตาแบบแนวนอน.....	19
2.14 เตาแอนนูลแบบแนวนอน ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์.....	20
2.15 (ก) อุปกรณ์ตรวจจับความดันชนิดเปียโซรีซีฟทิปขนาดจ้วแบบบัลค์ (ข) อุปกรณ์ตรวจจับความดันชนิดเปียโซรีซีฟทิปขนาดจ้วแบบเชิงผิว.....	21
2.16 ทิศทางของแรงที่มากระทำกับวัสดุที่ประกอบด้วย (ก) แรงดึงตามยาว (ข) แรงดึงตามขวาง.....	24
2.17 การกระจายค่าความเค้นไคเมนชันเลสใน 1 ควอเทแรนที่บริเวณต่างๆ กับบน ไดอะแฟรมรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส.....	25
2.18 ตัวต้านทาน 4 ตัวบน ไดอะแฟรม.....	26
2.19 วงจรวิทสโตนบริดจ์.....	29
2.20 โครงสร้าง CBK.....	31
3.1 ส่วนประกอบของเครื่อง SEM.....	35
3.2 เครื่อง SEM รุ่น S-4700.....	36

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3 การทำงานของ อีลลิปโซมิเตอร์.....	37
3.4 เครื่องอีลลิปโซมิเตอร์ รุ่น Rudolph FEIII.....	38
3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีโพร์พอยท์โพรบ.....	40
3.6 เครื่องโพร์พอยท์โพรบรุ่น Prometrix Rs-30.....	42
3.7 แสดงส่วนประกอบของอุปกรณ์วัดแรงดัน.....	43
4.1 โครงสร้างภาพตัดขวางของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน.....	44
4.2 ภาพโครงสร้างด้านบนของฟิล์ม โพลีซิลิคอน ไดอะแฟรมและ โพลีรีซิสเตอร์.....	45
4.3 ขนาด โครงสร้าง โพลีรีซิสเตอร์.....	46
4.4 ลักษณะต้นแบบตัวตรวจจับความดันในงานวิจัยนี้.....	47
4.5 (ก)- (ข) ลำดับกระบวนการสร้างตัวตรวจจับความดันแบบเปียโซรีซีฟทิป.....	48-49
4.6 (ก)- (จ) ลำดับกระบวนการสร้างโพลีรีซิสเตอร์.....	50
4.7 โครงสร้างมาสก์ (CBK).....	51
4.8 (ก)- (ฉ) ลำดับกระบวนการสร้างโครงสร้าง CBK.....	51-52
4.9 โครงสร้างสำหรับวัด ที่ซีอาร์ ของโพลีรีซิสเตอร์.....	53
4.10 (ก)- (ฉ) ลำดับกระบวนการสร้างโครงสร้าง สำหรับวัด ที่ซีอาร์ ของโพลีรีซิสเตอร์.....	53-54
5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบฟิล์ม a-Si กับ อัตราการจ่ายก๊าซ SiH_4 และ Uniformity	56
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบฟิล์ม Poly-Si กับ อัตราการจ่ายก๊าซ SiH_4 และ Uniformity.....	57
5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบฟิล์ม a-Si กับ ความดัน และ Uniformity	58
5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบฟิล์ม Poly-Si กับ ความดัน และ Uniformity.....	59
5.5 (ก) รูปผิวหน้าฟิล์มของ a-Si (ข) รูปผิวหน้าฟิล์ม poly-Si.....	61
5.6 (ก) รูปผิวหน้าฟิล์มของ a-Si หลังการยิงฝึงประจุ และ แอนนิต ข) รูปผิวหน้าฟิล์มของ poly-Si หลังการยิงฝึงประจุ และ แอนนิต.....	64
5.7 ขั้นตอนการทดลองในหัวข้อ 5.3.....	65

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงแผ่นกับปริมาณสารเจือของฟิล์ม a-Si กับ Poly-Si.....	66
5.9 ขั้นตอนการทดลองในหัวข้อ 5.4.....	68
5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงแผ่นกับปริมาณสารเจือ ของฟิล์ม a- Si กับ Poly-Si ที่มีการปรับเงื่อนไขการจ่ายก๊าซในการแอนนிட.....	69
5.11 ขั้นตอนการทดลองในหัวข้อ 5.5.....	70
5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงแผ่นกับปริมาณสารเจือ ของฟิล์ม a- Si กับ Poly-Si โดยการเพิ่มชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์.....	71
5.13 มาตรฐานของ CBK ที่เขียนโดยโปรแกรม L-edit	
(ก) มาตรฐานสำหรับโพลิรีซิสเตอร์ (ข) มาตรฐานสำหรับกัคเปิดช่อง.....	73
(ค) มาตรฐานสำหรับขั้วโลหะ (ง) โครงสร้างมาตรฐาน (CBK) เมื่อเสร็จสมบูรณ์.....	73
5.14 ชิ้นงานที่สร้างเป็นโครงสร้าง CBK	74
5.15 โครงสร้าง CBK.....	75
5.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความต้านทานเชิงแผ่น กับ Rc.....	77
5.17 มาตรฐานของวัดความต้านทานโพลิรีซิสเตอร์ ที่เขียนโดยโปรแกรม L-edit	
(ก) มาตรฐานสำหรับโพลิรีซิสเตอร์ (ข) มาตรฐานสำหรับกัคเปิดช่อง	
(ค) มาตรฐานสำหรับขั้วโลหะ (ง) โครงสร้างมาตรฐาน ในการวัดความต้านทานโพลิรีซิสเตอร์ เมื่อเสร็จสมบูรณ์.....	78
5.18 ทดลองสำหรับวัดความต้านทานโพลิรีซิสเตอร์ หลังการเตรียมชิ้น.....	79
5.19 ความสัมพันธ์ค่าปริมาณสารเจือกับ TCR ของ ฟิล์ม Poly Si และ a-Si.....	80
5.20 อุปกรณ์ตรวจจับความดันที่สร้างในงานวิจัยนี้.....	82
5.21 (ก) ชุดแท่นจับ (ข) ถังอัดความดัน.....	83
5.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง Pressure กับ Resistance.....	84
5.23 วงจรวิทสโตนบริดจ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้	85
5.24 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความดัน-แรงดันไฟฟ้า.....	85
5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเปียโซรีซีฟทีป กับอุณหภูมิ.....	86

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.1 โครงสร้างอย่างง่ายที่ต่อเป็นอนุกรมของโพลิรีซีสเตอร์.....	89
6.2 โครงสร้างของแถบพลังงานที่ขอบเขตเกรน (ก) ปริมาณสารเจือมาก (ข) ปริมาณสารเจือน้อย.....	91

รายการคำย่อ

อักษรย่อ	คำเต็มภาษาอังกฤษ	คำแปลภาษาไทย
SEM	Scanning Electron Microscopy	จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
Si	Silicon	ซิลิคอน
Poly-Si	Poly Silicon	โพลีซิลิคอน
a-Si	amorphous Silicon	อมอร์ฟัสซิลิคอน
R_c	Contact Resistance	ความต้านทานรอยสัมผัส
TCR	Temperature Coefficient Resistivity	สัมประสิทธิ์ความต้านทานของอุณหภูมิ
SiH_4	Silane	ก๊าซซิลเลน

รายการสัญลักษณ์

H_2	คือ ก๊าซไฮโดรเจน
ρ	คือ สภาพความต้านทาน
R_s	คือ ความต้านเชิงแผ่น
x_j	คือ ความลึกที่ได้จากการแพร่สารของตัวต้านทานชนิดแพร่สารเจือ
π_l	คือ สัมประสิทธิ์เพียโซรีซีฟทิปตามยาว
π_t	คือ สัมประสิทธิ์เพียโซรีซีฟทิปตามขวาง
σ_l	คือ ความเค้นตามยาว (Longitudinal Stress)
σ_t	คือ ความเค้นตามขวาง (Transverse Stress)
$\langle \pi_l \rangle$	คือ ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์เพียโซรีซีฟทิปตามยาว
$\langle \pi_t \rangle$	คือ ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์เพียโซรีซีฟทิปตามขวาง
$\langle Y \rangle$	คือ ยิงโมดูลัสเฉลี่ยของฟิล์มโพลีซิลิคอน
GF_l	คือ เกจแฟคเตอร์ตามยาว (Longitudinal Gage Factor)
GF_t	คือ เกจแฟคเตอร์ตามขวาง
J	คือ ความหนาแน่นกระแส
ε_l	คือ ความเครียด
S	คือ ความไวของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน
Rc	คือ ความต้านทานรอยสัมผัสระหว่างเนื้อสารกับโลหะ
V_H	คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ระดับสูง
V_L	คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ระดับต่ำ
I_{in}	คือ กระแสไฟฟ้าที่เป็นแหล่งจ่าย
R_1	คือ ค่าความต้านทานที่อุณหภูมิห้อง
R_2	คือ ค่าความต้านทานที่อุณหภูมิต่างๆ
T_1	คือ อุณหภูมิห้อง
T_2	คือ อุณหภูมิต่างๆ
q	คือ 1.6×10^{-19} คูโลมปี
k	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
n	คือ ค่าดัชนีหักเหแสง
δ	คือ ความหนาของขอบเกรน

รายการสัญลักษณ์(ต่อ)

μ_n	คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอน
μ_p	คือ สภาพคล่องของโฮล
ϕ_m	คือ ฟังก์ชันงาน (Work function) ของ โลหะ
χ_s	คือ อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (electron affinity)
ϕ_b	คือ กำแพงศักย์ที่ผิว(surface potential barrier)
m_e	คือ มวลสัมประสิทธิ์ผล(effective mass)
N_A	คือ ความเข้มข้นสารเจือชนิด Acceptor
h	คือ ค่าคงที่ของแพลงค์ (Plank constant)
ϵ_{si}	คือ เปรอรัมิติวิตีในซิลิคอน
ϵ_0	คือ เปรอรัมิติวิตีในสุญญากาศ
ρ_m	คือ ความหนาแน่นสาร
T_{mp}	คือ จุดหลอมเหลว
T_{bp}	คือ จุดเดือด
E_c	คือ ระดับพลังงานต่ำสุด (ขอบล่าง) ของแถบนำไฟฟ้า
E_F^m	คือ ระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะ
E_F	คือ ระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ
E_v	คือ ระดับพลังงานขอบบนของแถบเวเลนซ์

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

อุปกรณ์ตรวจจับความผันผวนขนาดจุลภาคตัวแรกได้สร้างขึ้นเมื่อปี ค.ศ 1950[1] ปัจจุบันอุปกรณ์ตรวจจับความผันผวนขนาดจุลภาคที่ทำจากซิลิคอนได้นำมาใช้กันอย่างกว้างขวางในเชิงพาณิชย์ โดยเฉพาะอุตสาหกรรมรถยนต์ในตารางที่ 1.1 แสดงถึงอัตราการเติบโตของตลาดโลกของอุปกรณ์ตรวจจับความผันผวนที่สร้างมาจากซิลิคอนสำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์[1] ตั้งแต่ปี 1989 ถึง 1999 โดยส่วนใหญ่จะเป็นอุปกรณ์ตรวจจับความผันผวนขนาดจุลภาคและ อุปกรณ์ตรวจจับความเร่งขนาดจุลภาค (micro accelerometer) ซึ่งจะเห็นว่าอัตราการเติบโตขึ้นทุกปี

ตารางที่ 1.1 อัตราการเติบโตของตลาดโลกของเซ็นเซอร์ที่สร้างมาจากซิลิคอนสำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์ จาก Sullivan (1993)

Year	Revenue ^a (MEuro)	Growth-rate (%)	Year	Revenue ^a (MEuro)	Growth-rate (%)
1989	175	-	1995	376	21
1990	283	62	1996	463	23
1991	323	14	1997	564	22
1992	321	-1	1998	679	20
1993	285	-11	1999	804.2	18
1994	312	10			

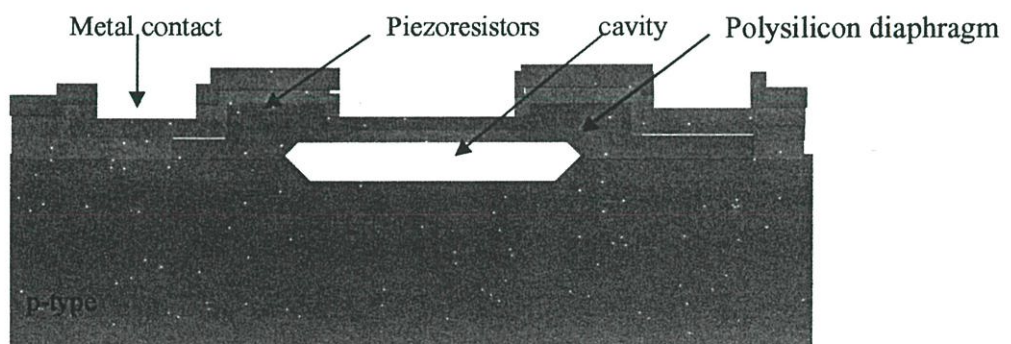
^a 1 euro = \$1.1 สำหรับ เดือน กันยายน 2000

นอกจากอุตสาหกรรมยานยนต์ อุปกรณ์ตรวจจับความผันผวนขนาดจุลภาคได้ถูกนำมาใช้งานอย่างหลากหลาย เช่น ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมทางการแพทย์ และอื่นๆ โดยมีการพัฒนาขนาดของอุปกรณ์ตรวจจับความผันผวนให้มีขนาดเล็กลงเรื่อยมาตามวัตถุประสงค์การใช้งาน ในปัจจุบันความต้องการใช้งานอุปกรณ์ตรวจจับความผันผวนไปตรวจจับความผันผวนในบริเวณที่มีขนาดจุลภาคที่มีขนาดเล็กลงมีจำนวนเพิ่มขึ้น เช่น ความต้องการวัดความผันผวนเส้นเลือดขณะผ่าตัดหัวใจซึ่งจำเป็นต้องใช้

ความสัมพันธ์กับความเครียดเพื่อใช้เป็นไมโครโฟนขนาดเล็ก เป็นต้น และการสร้างความต้านทานเพียโซรีซิสทีฟ สร้างจากใช้ฟิล์มโพลีซิลิคอนแทนซิลิคอนผลึกรูปเดี่ยว (single crystal silicon) เพราะว่ามี ความง่ายในการสร้างเพียงใช้เทคนิค LPCVD ซึ่งใช้เวลาผลิตอันสั้นและมีต้นทุนที่ถูกกว่า จึงนิยมใช้ใน อุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดันขนาดจุลภาคที่มีขนาดเล็กมากเช่น ขนาด 100 x 100 ไมครอน ทำให้ต้องสร้างบริเวณเพียโซรีซิสทีฟหรือ โพลีรีซิสเตอร์ที่มีขนาดในระดับ ไมครอน เช่น 10 ไมครอน ทำให้พบปัญหาค่าความต้านทานที่มีค่าค่อนข้างสูงในบริเวณ เพียโซรีซิสทีฟ รีซิสเตอร์ หรือ โพลีรีซิสเตอร์จะทำให้เกิดปัญหาหลายอย่างคือ

1. ทำให้ค่าความต้านทานรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับโพลีซิลิคอน (contact resistant) มีค่าสูง ซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหาคือ ทำให้รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับโพลีซิลิคอนเกิดความร้อนสูงขึ้นเมื่อมี กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน แล้วนำไปสู่อายุการใช้งานน้อยลงของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน[2] นอกจากนี้ยัง จำกัลดการนำกระแสไฟฟ้าให้ลดลง

2. ค่าความต้านทานที่สูงนี้จะทำให้ ค่า TCR (Temperature Coefficient Resistivity) มีค่าเป็น เป็นลบ ซึ่งหมายถึง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานจะลดลง ซึ่งเป็นคุณสมบัติในทางสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะให้มีคุณสมบัติคล้ายกับ พหุติกรรมช็อคกี้ (Schottky barrier) เป็นเหตุให้เมื่อนำไปสร้างเป็น อุปกรณ์ตรวจจับความดันจะไม่สามารถควบคุมให้เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิในลักษณะเชิงเส้นได้[1] เมื่อนำไปสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดัน ค่าความต้านทานเพียโซรีซิสทีฟรีซิสเตอร์หรือโพลีรีซิสเตอร์ จะมีการเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิแบบพหุติกรรมช็อคกี้ ทำให้ไม่ทราบว่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง จากอุณหภูมิหรือความดัน [1]



รูปที่ 1.1 อุปกรณ์ตรวจจับความดันชนิด เพียโซรีซิสทีฟแบบเชิงผิว (surface)

ดังนั้นจึงได้มีการวิจัยเทคนิคการลดค่าความต้านทานเพื่อให้ค่า TCR มีค่าเป็นบวกซึ่งหมายถึงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานจะเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นคุณสมบัติของตัวนำโดยความสัมพันธ์การเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานกับอุณหภูมิจะเป็นลักษณะเชิงเส้น ทำให้สามารถกำหนดค่าเพื่อนำไปใช้งานได้

3. เนื่องจากโครงสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดันแบบเชิงผิว (surface) ดังรูปที่ 1 มีช่องว่าง (cavity) และไดอะแฟรม (diaphragm) เป็นตัวจำกัดอุณหภูมิในการแอนนีสหลังการเจือสารไม่เกิน 800 องศาเซลเซียสในสร้างตัวต้านทานเปียโซรีซิสทีฟหรือโพลารีซิสเตอร์ เพราะการใช้อุณหภูมิที่มากกว่า 800 องศาเซลเซียส มีโอกาสจะทำให้ตัวไดอะแฟรมแตกได้ ทำให้ต้องใช้ปริมาณสารเจือที่สูงมากในการลดค่าความต้านทาน ซึ่งทำให้ต้องเสียเวลาในการสร้างและใช้วัตถุดิบในการผลิตมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย

ในการวิจัยนี้ได้พัฒนาอุปกรณ์ตรวจจับความดันชนิดเปียโซรีซิสทีฟ ที่มีโครงสร้างแบบไดอะแฟรม ที่มีขนาดเล็กมีขนาดเท่ากับ 100 x 100 ไมครอน โดยมุ่งพัฒนาปรับลดค่าความต้านทานของตัวต้านทานเปียโซหรือตัวต้านทานโพลารีซิสเตอร์ เพื่อให้ได้ค่าความต้านทานภายในเนื้อฟิล์มมีค่าต่ำลง ทำให้ได้ความต้านทานระหว่างโลหะกับโพลีสซิลิกอนมีค่าลดลงและทำให้ค่า TCR มีค่าเป็นบวก นอกจากนี้ยังทำการลดปริมาณสารเจือในการสร้างเพื่อลดเวลาในการผลิตและลดวัตถุดิบในการผลิต

ในการพัฒนาปรับลดค่าความต้านทานของตัวต้านทานเปียโซหรือตัวต้านทานโพลารีซิสเตอร์ในการวิจัยนี้ จะทำการวิจัยศึกษาผลของฟิล์มที่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน คือ อมอร์ฟัสซิลิกอน กับโพลีสซิลิกอนเมื่อนำไปทำเป็นตัวต้านทานโพลารีซิสเตอร์ว่าจะมีผลต่อความต้านทานอย่างไร นอกจากนี้การปรับค่าสารเจือในกระบวนการยิงฝัງประจุ การเพิ่มชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์และปรับเพิ่มชนิดก๊าซออกซิเจนในการแอนนีส ในการสร้างจะมีผลต่อความต้านทานหรือไม่ ซึ่งจะทำการพิสูจน์ในงานวิจัยนี้

1.3 การดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยนี้ได้ทำการใช้เทคนิคลดค่าความต้านทานเปียโซหรือโพลารีซิสเตอร์ด้วยทั้งหมด 4 แบบ ดังนี้

1. ทำการเปลี่ยนกระบวนการสร้างโพลารีซิสเตอร์ ซึ่งสร้างจากฟิล์มบางโพลีสซิลิกอนมาเป็นอมอร์ฟัสซิลิกอน

2. ได้ทำการเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณสารเจือในการยิงฝึงประจุ โดยมีค่าปริมาณสารเจือดังนี้ 1.0×10^{16} , 1.3×10^{16} , 1.6×10^{16} และ 2×10^{16} ไอออนต่อตารางเซนติเมตร
3. ปรับเงื่อนไขของการแอนนihil โดยการเพิ่มก๊าซออกซิเจน
4. สร้างฉนวนซิลิคอนไดออกไซด์ก่อนการยิงฝึงประจุ

1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับจากงานวิจัย

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้มี 3 ประการ ดังนี้

1. ปรับลดค่าความต้านทานของตัวต้านทานเปียโซ ทำให้ค่า TCR มีค่าเป็นบวก ซึ่งหมายถึงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานจะเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นคุณสมบัติของตัวนำโดยความสัมพันธ์การเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานกับอุณหภูมิจะเป็นลักษณะเชิงเส้น ทำให้สามารถกำหนดค่าเพื่อนำไปใช้งานได้
2. ปรับลดค่าความต้านทานของตัวต้านทานเปียโซเป็นเหตุให้ความต้านทานรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับโพลีซิลิคอน (contact resistance) [2, 3] ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับความดันดีขึ้น
3. การปรับลดค่าความต้านทานโดยใช้เทคนิคการเปลี่ยนคุณสมบัติของฟิล์มจากโพลีซิลิคอนไปเป็นอมอร์ฟิซิลิคอน จะได้ค่าความต้านทานลดลงทำให้สามารถลดต้นทุนการผลิตจากการลดปริมาณสารเจือในการยิงฝึงประจุทำให้ใช้เวลาในการเจือสารลดลง

1.5 รายละเอียดเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ แบ่งเนื้อหาออกเป็น 7 บท โดยในแต่ละบทมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำกล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัยของอุปกรณ์ตรวจจับความดันขนาดจุลภาค โดยเริ่มสร้างราวปี ค.ศ 1950 จนถึงปัจจุบันซึ่งได้นำมาทำเป็นเชิงพาณิชย์มากมายและได้มีการพัฒนาลดขนาดลงเป็นระดับไมครอน ซึ่งได้กล่าวถึงปัญหาที่ตามมาคือความต้านทานภายในตัวตรวจจับความดันมีค่าสูงขึ้นเมื่อทำการลดขนาดตัวตรวจจับความดันลง การวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาวิธีการลดค่าความต้านทานตัวตรวจจับความดัน หลังจากนั้นได้กล่าวถึงวัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย การดำเนินการวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย รวมถึงรายละเอียดของเนื้อหาเพื่อให้ผู้อ่านได้ทราบถึงขอบเขตของวิทยานิพนธ์เล่มนี้

บทที่ 2 บทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยนี้ได้กล่าวถึงฟิล์มโพลีซิลิคอนและฟิล์มอมอร์ฟิซิลิคอน ตัวต้านทานที่สร้างในวงจรรวมและเซ็นเซอร์ กระบวนการยิงฝึงประจุและอุปกรณ์

ตรวจจับความดันขนาดจุลภาค วงจรวิทสโคนบริดจ์ เทคนิควัด R_c ด้วยโครงสร้าง CBK และ ทีซีอาร์ (TCR)

บทที่ 3 ได้กล่าวถึงเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และการวัด โดยเริ่มจากเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติฟิล์มโพลีซิลิคอนและอมอร์ฟัสซิลิคอน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เครื่องมือวัดความหนาอิลลิปโซมิเตอร์ หลังจากนั้นกล่าวถึงเครื่องมือวัดคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของโพลีซิลิคอน โดยใช้เครื่องโพรพอยท์โพรบและสุดท้ายได้กล่าวถึงชุดเครื่องมือที่ใช้ในการวัดและทดสอบความดันในงานวิจัยนี้

บทที่ 4 ได้กล่าวถึงการออกแบบและการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ถูกนำไปใช้ในงานวิจัยนี้ โดยทำการออกแบบไดอะแฟรมฟิล์มโพลีซิลิคอน ออกแบบตัวต้านทานเปียโซรีซิสทีฟและออกแบบตัวตรวจจับความดันแบบเปียโซรีซิสทีฟที่ปและสุดท้ายได้กล่าวถึงลำดับการสร้าง

บทที่ 5 ได้กล่าวถึงผลการทดลองโดยเริ่มจากการเตรียมชั้นงาน Poly-Si และ a-Si โดยทำการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสร้างฟิล์ม หลังจากนั้นนำไปศึกษาคุณสมบัติฟิล์ม หลังยิงฝังประจุที่เงื่อนไขการปรับปริมาณสารเจือที่ค่าต่างๆ หลังจากนั้นนำไปศึกษาศึกษาคุณสมบัติฟิล์มหลังยิงฝังประจุที่เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงการแอนนัลและ ที่เงื่อนไขการเพิ่มขึ้นซิลิคอนไดออกไซด์ หลังจากนั้นทำการศึกษาความต้านทานรอยสัมผัสระหว่างผิวโพลีซิลิคอนที่ได้รับการเจือสารกับ โลหะ ที่โครงสร้าง CBK และทำการวัดค่า ทีซีอาร์ ของโพลีซิลิคอนและสุดท้ายทำการนำฟิล์มโพลีซิลิคอนที่ได้จากเงื่อนไขการทดลองไปใช้ในเซ็นเซอร์ตรวจจับความดัน

บทที่ 6 ได้กล่าวถึงการวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยทำการวิเคราะห์ผลการศึกษาโครงสร้างจากฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ก่อนและหลังกระบวนการยิงฝังประจุ การวิเคราะห์ผลการศึกษาความต้านทานของโพลีซิลิคอนที่สร้างจากฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ที่เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเจือในการยิงฝังประจุ การวิเคราะห์โครงสร้างและความต้านทานของโพลีซิลิคอนที่สร้างจากฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ที่เงื่อนไขการเปลี่ยนเงื่อนไขการแอนนัลและที่เงื่อนไขการเพิ่มขึ้นซิลิคอนไดออกไซด์ หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ผลการศึกษาความต้านทานรอยสัมผัสระหว่างผิวโพลีซิลิคอนที่ได้รับการเจือสารกับ โลหะและสุดท้ายทำการวิเคราะห์การศึกษาหาค่าทีซีอาร์

บทที่ 7 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะของงานที่ทำทั้งหมด ซึ่งผลที่ได้จากการสรุปและข้อเสนอแนะทั้งหลายเหล่านี้ จะเป็นแนวทางสำหรับการศึกษาและพัฒนาการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดันต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎี

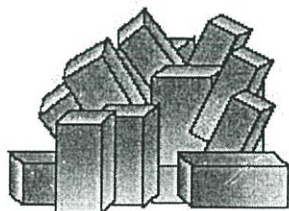
2.1 फिल्मโพลีซิลิคอน และฟิล์มอมอร์ฟัสซิลิคอน[4]

โครงสร้างของฟิล์มซิลิคอน มี 3 ชนิด คือ ผลึกซิลิคอน โพลีซิลิคอนและอมอร์ฟัสซิลิคอน แต่ในที่นี้เราจะกล่าวเฉพาะ ในส่วนของโพลีซิลิคอนและอมอร์ฟัสซิลิคอนเท่านั้น โดยมีรายละเอียดดังนี้

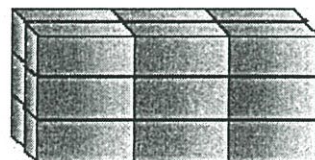
2.1.1 โครงสร้างฟิล์มโพลีซิลิคอน

โพลีคริสตอล (poly crystal) เป็นสารของแข็งที่เป็น หน่วยเซลล์ (unit cell) ที่มีการเรียงตัวอย่างไม่ต่อเนื่อง ลักษณะโครงสร้างของโพลีซิลิคอน คล้ายกับก้อนอิฐที่นำมาวางดังรูปที่ 2.1(ก) ที่มีการวางก้อนอิฐกันอย่างกระจัดกระจายโดยก้อนอิฐแต่ละก้อนเปรียบเหมือน หน่วยเซลล์ และกองของก้อนอิฐเปรียบเหมือนโพลีซิลิคอน

ผลึกโมโนคริสตอลเป็นสารของแข็งที่เป็นหน่วยเซลล์ที่มีการเรียงตัวอย่างต่อเนื่อง เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ผลึกรูปเดี่ยว (single crystal) ลักษณะโครงสร้างของผลึกรูปเดี่ยว คล้ายกับก้อนอิฐที่นำมาวางเรียงกันดังรูปที่ 2.1(ข) ที่มีการวางก้อนอิฐอย่างเป็นระเบียบโดยก้อนอิฐเปรียบเหมือน หน่วยเซลล์ และกองของก้อนอิฐเปรียบเหมือนผลึกรูปเดี่ยว ตัวอย่างเช่น ผลึกซิลิคอน เป็นต้น



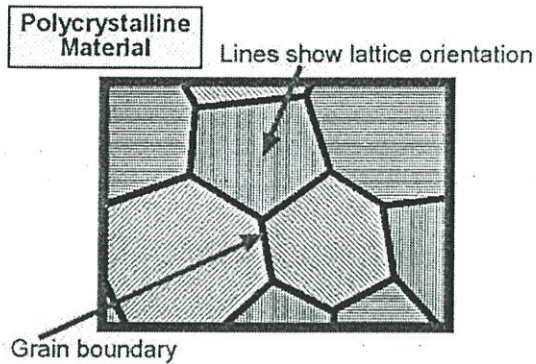
(ก)



(ข)

รูปที่ 2.1 (ก) โครงสร้างโพลีซิลิคอน และ (ข) โครงสร้างผลึกซิลิคอน

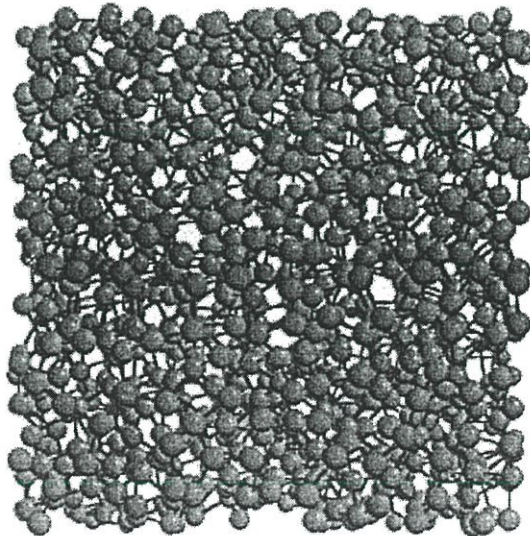
เมื่อทำการดูที่ผิวหน้าของโพลีซิลิคอนมีลักษณะดังรูปที่ 2.2 โดยภายในมีผลึกแต่ละก้อนที่แบ่งแยกด้วยขอบเขตเกรน (grain boundary) และผลึกในแต่ละก้อนนี้มี ระบายผลึก (lattice orientation) หลายระนาบผลึกอยู่ในเนื้อฟิล์มเดียวกัน เช่น $[111]$ และ $[100]$ เป็นต้น



รูปที่ 2.2 ผิวหน้าของโครงสร้างโพลีซิลิคอน

2.1.2 ลักษณะโครงสร้างของฟิล์มอมอร์ฟัสซิลิคอน

อมอร์ฟัสซิลิคอน (amorphous silicon) เป็นซิลิคอนที่มีโครงสร้างแบบวัสดุอสัณฐานซึ่งลักษณะโครงสร้างของสารของแข็ง ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของอะตอมเป็นไปอย่างไม่เป็นระเบียบและไม่เป็นรูปแบบที่แน่นอนไม่เป็นผลึกพิจารณาได้ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งมีลักษณะตรงกันข้ามกับผลึก ตัวอย่างของวัสดุอสัณฐาน คือ อมอร์ฟัสซิลิคอน เป็นต้น



รูปที่ 2.3 วัสดุอสัณฐานระดับอะตอม

2.1.3 คุณสมบัติฟิล์มโพลีซิลิคอน [1, 2, 3]

โพลีซิลิคอนมีคุณสมบัติพิเศษหลายอย่าง เช่น สร้างได้ง่ายและทำการควบคุมความหนาได้ง่าย ดังในตารางที่ 2.1 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของฟิล์มโพลีซิลิคอนกับสารชนิดอื่นๆ เนื่องจากสร้างจากเทคนิค LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) ซึ่งเป็นเครื่องที่มีอยู่ทั่วไปในอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับอัตราการเกิดเนื้อฟิล์มโดยทั่วไปจะเท่ากับ 1,000 อังสตรอมต่อชั่วโมงที่เปอร์เซ็นต์ความสม่ำเสมอ (uniformity) เท่ากับ 0.5 แต่สำหรับเพชรใช้เครื่อง CVD สร้างใช้ อุณหภูมิในการสร้างเพชรอยู่ที่ 800-900 องศาเซลเซียส และเมื่อไปสร้างร่วมกับกระบวนการอื่น กระบวนการสร้างฟิล์ม ซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งต้องใช้อุณหภูมิมากกว่า 1,000 องศาเซลเซียส ทำให้เพชรมีการเปลี่ยนแปลงสภาพได้ สำหรับวัสดุผลึกซิลิคอน, แกลเลียมอาร์เซไนด์ ส่วนมากจะสร้างจากเทคนิค MBE (Molecular Beam Epitaxy) ซึ่งราคาเครื่องค่อนข้างสูง และอัตราการเกิดเนื้อฟิล์มค่อนข้างต่ำ

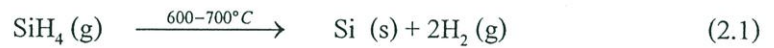
ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของฟิล์มโพลีซิลิคอนกับสารชนิดอื่นๆ

คุณสมบัติ	หน่วย	วัสดุ				
		โพลีซิลิคอน	ผลึกซิลิคอน	เยอรมันเนียม	เพชร	แกลเลียมอาร์เซไนด์
Density, ρ_m	(kg/m ³)	2320	2330	5350	3510	5316
Melting point, T_{mp}	(°C)	-	1410	937	3827	1238
Boiling point, T_{bp}	(°C)	-	2355	2830	4827	N/A
Electrical conductivity, σ	(10 ³ S/cm)	-	4 x 10 ⁻³	3 x 10 ⁻⁵	~10 ⁻¹⁷	~10 ⁻⁵
Energy band gap, E	(eV)	1.1	1.1	0.67	5.4	1.35
Thermal conductivity, K	(W/m/K)	34	168	60	1000-2600	370
Specific heat capacity, c_p	(J/K/kg)	678	678	310	523	-
Temperature expansivity, α_1	(10 ⁻⁶ /K)	2-2.8	2.6	5.7	1	5.7
Dielectric constant, ϵ_r	-	-	11.7	16.3	5.1	12
Yong's modulus, E_m	(GPa)	161	190	-	542	-
Breakdown field	(MV/cm)	-	0.3	0.1	-	0.5

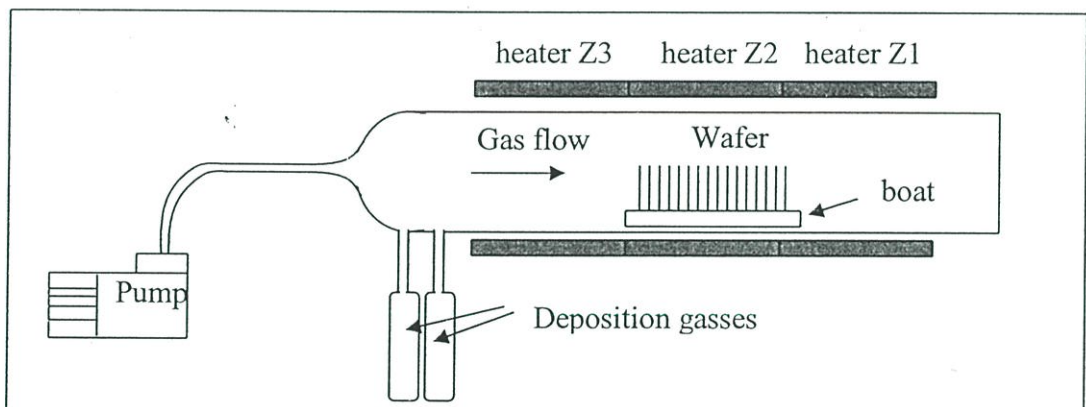
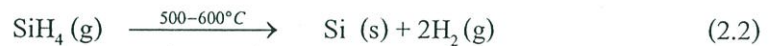
2.1.4 กระบวนการสร้างฟิล์มโพลีซิลิคอนและอมอร์ฟัสซิลิคอน [2, 3]

ในการสร้างฟิล์มโพลีซิลิคอนและอมอร์ฟัสซิลิคอน ในงานวิจัยนี้เราใช้เครื่อง LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) ซึ่งเป็นแบบเตาความร้อนในแนวนอน (horizontal hot wall furnace) มีลักษณะเป็นท่อควอทซ์ (quartz tube) ทรงกระบอกวางในแนวนอนซึ่งถูกล้อมรอบด้วยฮีทเตอร์ 3 โซน โครงสร้างของระบบ LPCVD แสดงดังรูปที่ 2.4 และ 2.5

การสร้างฟิล์มโพลีซิลิคอน ก๊าซที่ใช้คือ Silane (SiH_4) ที่อุณหภูมิ 600-700 องศาเซลเซียส



การสร้างฟิล์มอมอร์ฟัสซิลิคอน ก๊าซที่ใช้คือ Silane (SiH_4) ที่อุณหภูมิ 500-600 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.4 โครงสร้างเครื่อง LPCVD แบบเตาความร้อนในแนวนอน



รูปที่ 2.5 เครื่อง LPCVD แบบเตาความร้อนในแนวนอน ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์

2.1.5 เทคนิคกระบวนการวิเคราะห์ฟิล์มโพลีซิลิคอน และอมอร์ฟัสซิลิคอน

- ทำการวัดค่าความหนาของฟิล์มด้วยเครื่องเอลลิปโซมิเตอร์ (Elipsometer)
- ทำการวัดค่าดัชนีหักเหของฟิล์มด้วยเครื่องเอลลิปโซมิเตอร์
- ทำการวัดค่าทางกายภาพ เช่น ขนาดเกรน (Grain size) บนผิวหน้าเนื้อฟิล์มด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
- ทำการวัดค่าความต้านทานของฟิล์มด้วยเครื่องโฟร์พอยท์โพรบ (Four-Point- Probes)

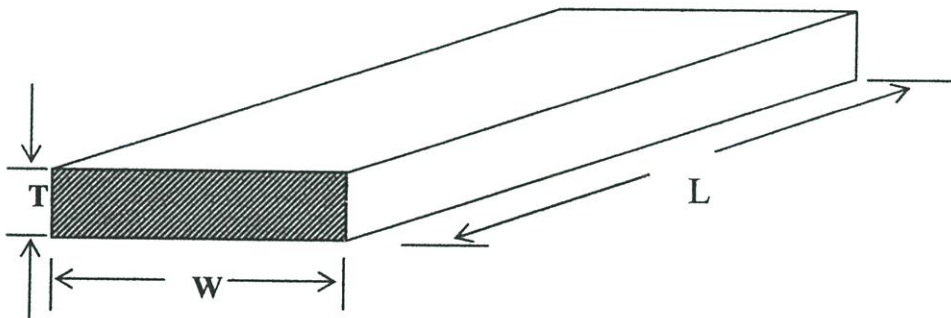
สำหรับรายละเอียดเครื่องมือวัดจะกล่าวในบทที่ 3

2.2 ตัวต้านทานที่สร้างในวงจรรวม และเซ็นเซอร์[5]

ตัวต้านทานในสารกึ่งตัวนำสามารถแบ่งออกเป็น 4 ชนิด คือ ตัวต้านทานชนิดแพร่สารเจือ (diffused resistor), ตัวต้านทานชนิดพินช์ (pinched resistor), ตัวต้านทานชนิดอีพิแทกซ์เชียล (epitaxial resistor) และ ตัวต้านทานชนิดยิงฝังประจุ (ion implanted resistor) ตัวต้านทานในสารกึ่งตัวนำส่วนใหญ่จะเป็นแบบ โมโนลิธิค (monolithic resistor)

ความต้านทานของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการนำไปวิเคราะห์ทางไฟฟ้าเรามาก เรียกว่า ความต้านทานเชิงแผ่น (sheet resistance) พิจารณาแท่งสารกึ่งตัวนำที่มีค่าการกระจายความต้านทานอย่างสม่ำเสมอที่ระยะความยาว L กว้าง W และ ความหนา T แสดงดังในรูปที่ 2.6 ความต้านทาน (R) สามารถเขียนได้ดังสมการ 2.3

$$R = \frac{\rho L}{TW} \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.6 โครงสร้างในการคำนวณหาความต้านทานเชิงแผ่น

โดยที่ ρ (ohm-cm) คือ สภาพความต้านทาน (resistivity) ของวัสดุ เพื่อความสะดวกได้ทำการกำหนดตัวแปร R_s (Ω/\square) ซึ่งเรียกว่า ความต้านทานเชิงแผ่น (Ω/\square) ซึ่งแสดงลงในสมการที่ 2.4 ดังนี้คือ

$$R_s = \frac{\rho}{T} \quad (2.4)$$

หน่วยของความต้านทานเชิงแผ่น คือ ohms ต่อ square (Ω/\square) ซึ่งกำหนดให้ความต้านทานรวม เท่ากับความต้านทานเชิงแผ่นก็ต่อเมื่อค่า W เท่ากับ L ดังนั้นค่าความต้านทานรวมมีความสัมพันธ์กับ ความต้านทานเชิงแผ่นดังสมการ 2.5

$$R = R_s \frac{L}{W} \quad (2.5)$$

2.2.1 ตัวต้านทานชนิดแพร่สารเจือ

ตัวต้านทานชนิดแพร่สารเจือ (diffused resistor) คือ ตัวต้านทานภายในเนื้อสาร (bulk resistance) ที่สร้างจากการแพร่ของสารเจือเข้าไปในเนื้อสาร โดยอาศัยเตาแพร่สารและทำการแพร่ สารเจือที่อุณหภูมิสูง เช่น การเจือสารชนิดเอ็นด้วยฟอสฟอรัสใช้อุณหภูมิในช่วง 900 ถึง 1,050 องศา เซลเซียส

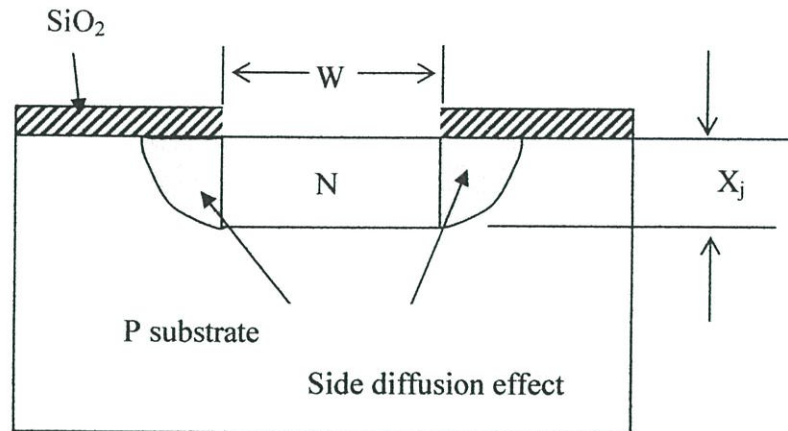
การคำนวณหาค่าความต้านทานคำนวณได้จากสมการ 2.6

$$R = \frac{\bar{\rho}}{x_j} \frac{L}{W} = R_s \frac{L}{W} \quad (2.6)$$

โดย x_j คือ ความลึกที่ได้จากการแพร่สารของตัวต้านทานชนิดแพร่สารเจือ

$\bar{\rho}$ คือ ค่าเฉลี่ยของสภาพความต้านทานของตัวต้านทานชนิดแพร่สารเจือ

ปัญหาของตัวต้านทานชนิดแพร่สารเจือ คือ การแพร่ด้านข้าง (side-diffusion effects) เนื่องจากการสร้างตัวต้านทานชนิดแพร่สารเจืออาศัยอุณหภูมิสูงจากเตาแพร่สารเพื่อให้สารเจือแพร่เข้าไปในเนื้อสารทำให้เกิดการแพร่ทุกทิศทางทำให้เกิดการแพร่ออกทางด้านข้าง ทำให้ระยะความกว้างมากกว่าค่าที่กำหนดไว้ ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.7 ซึ่งแสดงการแพร่ด้านข้างของสารเจือชนิดเอ็นในแผ่น ซิลิคอนฐานรองชนิดพี



รูปที่ 2.7 การแพร่ออกด้านข้างของตัวต้านทานชนิดแพร่สารเจือ

2.2.2 ตัวต้านทานชนิดพินซ์

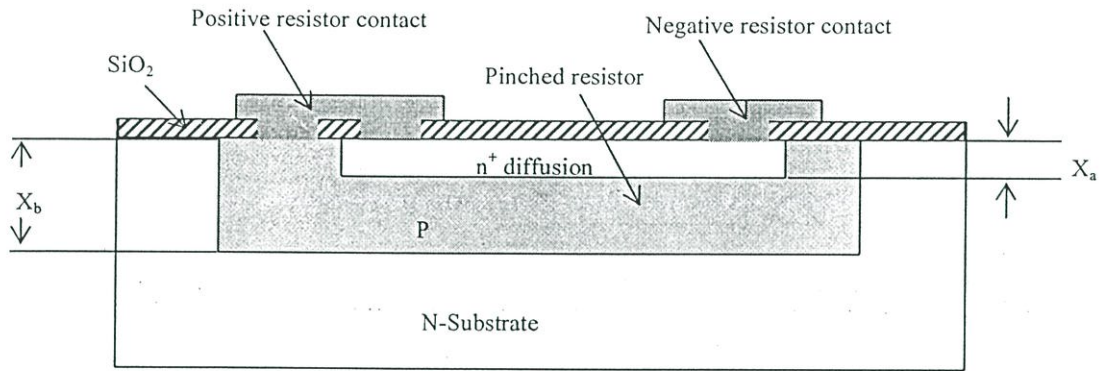
เราสามารถเพิ่มตัวต้านทางเชิงแผ่นภายในบริเวณสารกึ่งตัวนำ ด้วยการลดพื้นที่ภาคตัดขวาง (effective cross-sectional area) เทคนิคนี้เป็นเทคนิคการสร้างตัวต้านทานชนิดพินซ์ (pinched resistor) ดังตัวอย่างดังรูปที่ 2.8 โดยเริ่มต้นทำการสร้างสารเจือชนิดพีที่มีความลึกเท่ากับ X_b หลังจากนั้นทำการแพร่สารเจือชนิดเอ็นที่เข้มข้นสูง (n^+) ที่ความลึกเท่ากับ X_a เพื่อปรับค่าความต้านทานตัวต้านทานที่ได้นี้ เราเรียกว่าตัวต้านทานชนิดพินซ์

ค่าความต้านทานเชิงแผ่นของตัวต้านทานชนิดพินซ์ สามารถหาได้จากสมการ 2.7

$$R_s = \frac{\rho}{X_b - X_a} \quad (2.7)$$

โดยที่ X_b คือ ความลึกสารเจือของตัวต้านทานชนิดพินซ์ ก่อนปรับค่าความต้านทาน

X_a คือ ความลึกสารเจือของตัวต้านทานชนิดพินซ์ หลังปรับค่าความต้านทาน

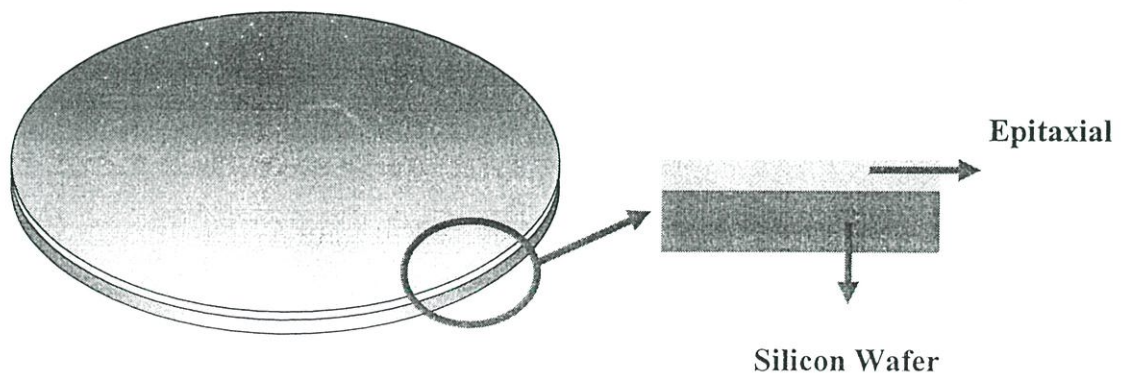


รูปที่ 2.8 โครงสร้างตัวต้านทานชนิดพินช์

2.2.3 ตัวต้านทานชนิดอีพิแทกซ์เซียล

ในบางกรณีเราต้องการสร้างแผ่นฟิล์มบนแผ่นเวเฟอร์โดยแผ่นฟิล์มนี้มีโครงสร้างผลึกชนิดคอนรูปเดี่ยว เช่นเดียวกับผลึกของแผ่นเวเฟอร์และสามารถควบคุมความเข้มข้นของสารเจือปนเป็นอิสระจากฐานรองหรือแผ่นเวเฟอร์ เราเรียกฟิล์มชั้นนี้ว่า อีพิแทกซ์เซียล (epitaxial) ซึ่งมาจากภาษากรีกโดยคำว่า อีพิ (epi) มีความหมายว่า บน และ แทกซิส (taxis) มีความหมายว่า ลำดับ เมื่อนำมารวมกันจึงแปลว่าการจัดวางให้ซ้อนกัน

ชั้นอีพิแทกซ์เซียล (Epitaxial layer) มีโครงสร้างผลึกชนิดคอนรูปเดี่ยวเหมือนกับฐานรอง และชนิดของสารเจือปนสามารถเป็นชนิดพีหรือชนิดเอ็นเป็นอิสระกับสารเจือปนของฐานรองหรือแผ่นซิลิคอนฐานรอง สำหรับรูปของอีพิแทกซ์เซียลของซิลิคอน แสดงดังในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ชั้นอีพิแทกซ์เซียลบนแผ่นซิลิคอนฐานรอง

ตัวต้านทานชนิดอีพิแทกซ์เซียล (epitaxial resistor) เป็นตัวต้านทานที่ได้จากการปรับค่าเจือสารลงชั้นอีพิแทกซ์เซียล โดยสามารถปรับค่าความต้านทานได้ง่ายโดยไม่ขึ้นกับฐานรอง ค่าความต้านทานเชิงแผ่นของตัวต้านทานชนิดอีพิแทกซ์เซียล สามารถหาได้จากสมการ 2.8

$$R_s = \frac{\rho_e}{d} \quad (2.8)$$

โดยที่ ρ_e คือ สภาพความต้านทานของชั้นอีพิแทกซ์เซียล

d คือ ความหนาของชั้นอีพิแทกซ์เซียล

ข้อดีของตัวต้านทานชนิดอีพิแทกซ์เซียล คือ สามารถหาค่าความต้านทานและสามารถกำหนดค่าความต้านทานได้ง่าย เพราะว่าเป็นชั้นฟิล์มที่สร้างขึ้นใหม่ไม่ขึ้นกับปริมาณสารเจือของแผ่นซิลิคอนฐานรอง

ข้อเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นสำหรับการสร้างชั้นอีพิแทกซ์เซียล

2.2.4 ตัวต้านทานชนิดยิงฝังประจุ

ตัวต้านทานชนิดยิงฝังประจุ (ion implanted resistor) เป็นตัวต้านทานที่ได้จากเทคนิคการเติมสารเจือด้วยการยิงฝังประจุซึ่งกระบวนการการยิงฝังประจุสามารถควบคุมระดับความลึก (junction depth : x_j) ได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมการกระจายสารเจือไม่ให้ขยายออกด้านข้างได้ ในขณะที่การเจือสารแบบแพร่สารเจือไม่สามารถควบคุมความลึก และการกระจายออกด้านข้างให้แม่นยำได้ ดังนั้นตัวต้านทานชนิดยิงฝังประจุที่ได้จะมีค่าความต้านทานที่ถูกต้อง ในการวิจัยนี้จึงสร้างตัวต้านทานด้วยเทคนิคนี้ สำหรับรายละเอียดของเทคนิคการยิงฝังประจุจะได้กล่าวต่อไป

2.3 กระบวนการยิงฝังประจุ [6, 7]

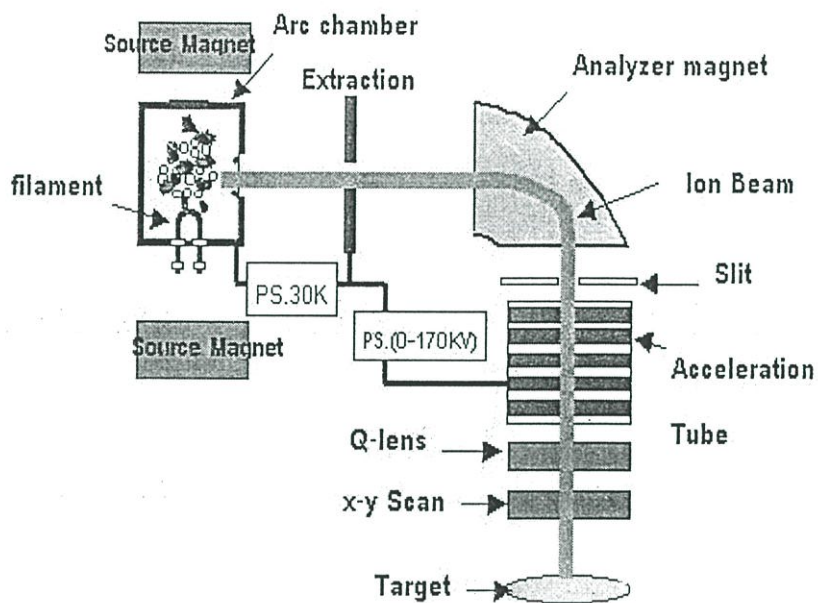
กระบวนการยิงฝังประจุ (ion implantation) คือ กระบวนการเติมสารเจือด้วยกระบวนการยิงฝังประจุลงในวัสดุเป้าหมายเพื่อเปลี่ยนคุณสมบัติของวัสดุเป้าหมาย เช่น การเปลี่ยนชนิดของสารกึ่งตัวนำซิลิคอนจากสารชนิดเอ็นเป็นชนิดพีเป็นต้น ในกระบวนการยิงฝังประจุจะมีกระบวนการด้วยกัน 2 กระบวนการคือ (1) การยิงฝังประจุ เป็นกระบวนการเติมสารเจือโดยยิงประจุลงในเนื้อสารของวัสดุเป้าหมายและ (2) กระบวนการแอนนัลเป็นกระบวนการปรับโครงสร้างของเนื้อวัสดุเป้าหมายหลังการ

ยิงฝังประจุ เพื่อทำการซ่อมแซมส่วนที่ไม่สมบูรณ์ของผลึกที่เกิดจากการยิงสารเจือหรือสร้างโครงสร้างผลึกขึ้นมาอีกครั้ง (regrowth of crystal) และเป็นการรวมตัวพันธะระหว่างอะตอมสารเจือกับอะตอมซิลิคอน หรือเรียกว่า แอคติเวชัน (activation)

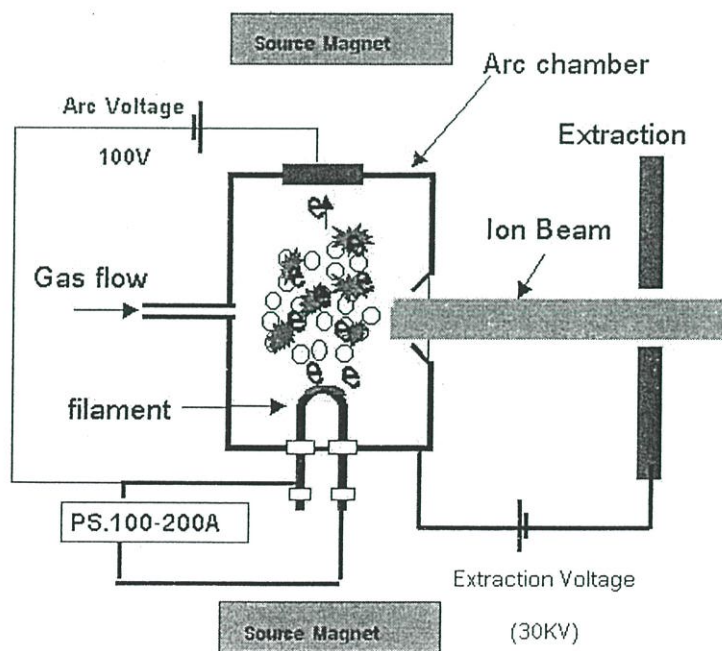
2.3.1 การยิงฝังประจุ

การยิงฝังประจุ คือ กระบวนการปรับโครงสร้างของเนื้อของวัตถุเป้าหมาย หลังการยิงฝังประจุ โดยทั่วไปเราจะนำเทคนิคไปใช้ในการสร้างสารเจือในอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำ เพื่อสร้างสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น หรือ ชนิดพี โดยสารเจือที่ใช้ในการสร้างสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น คือ สารเจือหมู่ 5 ของตารางธาตุเช่น ฟอสฟอรัส (phosphorus) และ อาร์เซนิก (arsenic) เป็นต้น สำหรับในการสร้างสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะใช้สารเจือในหมู่ 3 ของตารางธาตุเช่น โบรอน (boron) เป็นต้น ในการเติมสารเจือด้วยการยิงฝังประจุจะต้องใช้เครื่องจักรที่สำคัญ คือ เครื่องยิงฝังประจุ (ion implanter) สำหรับหลักการทำงานของเครื่องยิงฝังประจุ คือ ประจุจะถูกสร้างด้วยแหล่งกำเนิดประจุ (ion source) ชนิดเบอรันาสแล้วประจุบวกจะถูกดึงออกมาด้วยศักย์ไฟฟ้า แอ็กซ์เทรคชัน (extraction) ประมาณ 30 กิโลโวลต์แล้วเคลื่อนที่ไปสู่อานาไลเซอร์แมกเนต (analyzer magnet) และประจุที่ไม่ต้องการจะถูกกรองออกที่ตำแหน่งนี้ หลังจากนั้นประจุที่ผ่านการกรองจะเคลื่อนที่ผ่าน ช่องสลิต (slit) และถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าเพิ่มอีก 0-170 กิโลโวลต์ที่ท่อเร่ง (acceleration tube) หลังจากนั้นจะถูกโฟกัสด้วยเลนส์ควอดรูโพล (quadrupole-lens) และกวาดลำประจุไอออนด้วย เอ็กวายแสกน (X-Y scan) ไปยังเป้าหมาย รายละเอียดโครงสร้างของเครื่องยิงฝังประจุแสดงในรูปที่ 2.10

แหล่งกำเนิดประจุ (ion source) มีการทำงานคือแหล่งกำเนิดประจุชนิดเบอรันาสจะประกอบไปด้วยอาร์คแชมเบอร์ (arc chamber), ขดลวดทั้งสแตน (filament), แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก (source magnet) และ แหล่งจ่ายก๊าซ ดังรูปที่ 2.11 โดยมีการทำงานด้วยการจ่ายกระแสให้ขดลวดประมาณ 200 แอมแปร์ และมีการจ่ายค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างอาร์คแชมเบอร์ และขดลวด 100 โวลต์ อิเล็กตรอนจากขดลวดทั้งสแตนจะเคลื่อนไปยังอาร์คแชมเบอร์ จะไปชนกับกลุ่มก๊าซก่อให้เกิดการไอออไนเซชัน (ionization) ซึ่งอิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกเหนี่ยวนำด้วยแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กทำให้เกิดการหมุนตัว (spin) เพื่อเพิ่มอัตราการชนทำให้มีประจุมากขึ้น ส่วนประจุบวกจะถูกดูดไปยังแอคเทรคชันเพลท (extraction plate) ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ 30 กิโลโวลต์เมื่อเทียบกับอาร์คแชมเบอร์



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของเครื่องยิงฟิงประจุ



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของแหล่งกำเนิดประจุชนิดเบอร์นาส

สิ่งที่ใช้ในการวัดผลของการเจือสาร โดยใช้เทคนิคการเจือสารด้วยเครื่องยิงฝัประจุ คือปริมาณสารเจือ (Dose) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 2.9

$$D = \frac{IT}{NqA} \quad (2.9)$$

D คือ ปริมาณสารเจือ หน่วย ไอออน / ซม²

T คือ เวลาในการยิง หน่วย วินาที

I คือ กระแสไอออน หน่วยเป็น แอมแปร์

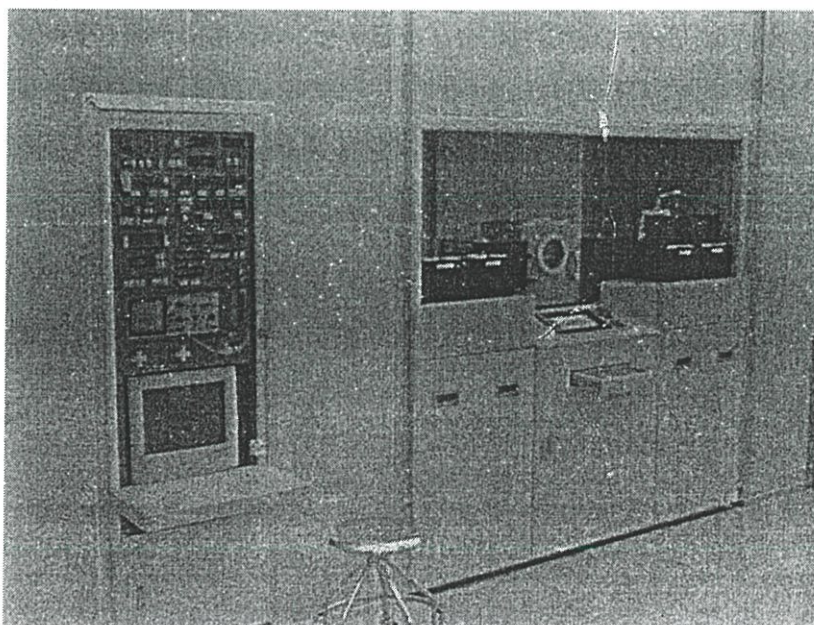
N คือ จำนวนประจุต่อไอออน 1 ตัว เช่น $_{11}\text{B}^+$ เท่ากับ 1

q คือ 1.6×10^{-19} คูลอมป์

A คือ เป็นพื้นที่หน่วยเป็นตารางเซนติเมตร

จะเห็นว่าปริมาณสารเจือแปรผันโดยตรงกับกระแสไอออน และเวลา แต่การยิงสารเจือใช้เวลามากเกินไปจะเป็นผลให้ชั้นโฟโตรีซิสแข็งตัวทำให้กำจัดยากมาก นอกจากนี้ผลผลิตในการสร้างก็ลดลง เพราะต้องใช้เวลามากขึ้นดังนั้นการเพิ่มกระแสหรือลดปริมาณสารเจือจะทำให้สามารถลดเวลาในการผลิตได้

เครื่องยิงฝัประจุที่ใช้ในงานวิจัยนี้เราใช้เครื่องรุ่น NH-20SR เป็นชนิด Medium Current ซึ่งแสดงดังรูป 2.12

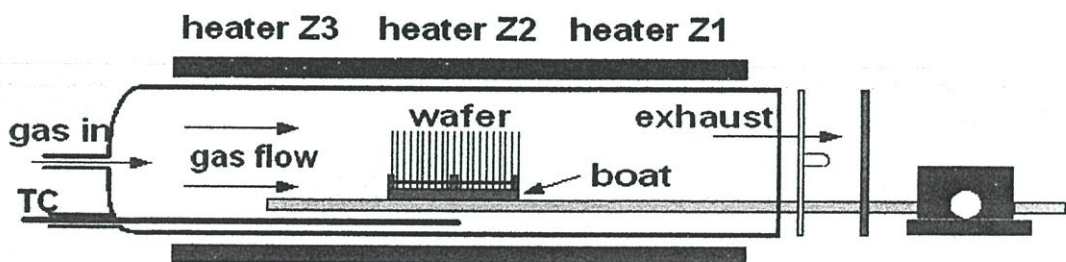


รูปที่ 2.12 เครื่องยิงฝัประจุรุ่น NH-20SR ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์

2.3.2 เทคนิคการแอนนีสหลังการยึ่งฝึ่งประจุ[8,9]

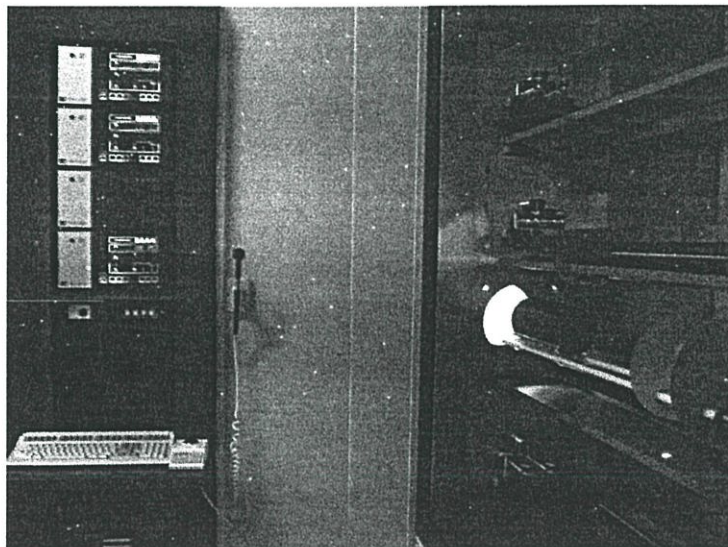
หลังจากทำการยึ่งฝึ่งประจุแล้วผิวของแผ่นซิลิคอนหรือวัสดุที่ได้รับการยึ่งฝึ่งประจุจะมีลักษณะคล้าย อมอร์ฟัส ไอออนที่ถูกยึ่งเข้ามาในนั้นจะชนกับอะตอมในแผ่นซิลิคอนหรือวัสดุที่ได้รับการยึ่งฝึ่งประจุ จนกลายเป็นอะตอมแบบอมอร์ฟัส นอกจากนี้อะตอมที่เกิดจากการยึ่งฝึ่งประจุส่วนใหญ่ จะถูกตั้งอยู่ในลักษณะ อินเตอร์สติเชียล (interstitially) นั่นคือมันจะถูกตั้งอยู่ด้านนอกของโครงสร้างผลึกของซิลิคอน การแอนนีสทำให้อะตอมที่สารเจือเคลื่อนที่เข้ามาในพันธะซิลิคอนหรือวัสดุที่ได้รับการยึ่งฝึ่งประจุ โดยเคลื่อนที่ไปในตำแหน่งบนแลตทิซ ไซท์ ซับสติทิวติง (lattice sites-substituting) ของซิลิคอน บนอะตอม ช่วงอุณหภูมิในการแอนนีสมีดังนี้ ที่อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส โครงสร้างผลึกที่ถูกทำลายจะทำให้กลับมาเป็นผลึกใหม่อีกครั้ง ที่อุณหภูมิ 750-800 องศาเซลเซียสใช้สำหรับทำให้เกิดจับพันธะระหว่างสารเจือกับวัสดุซึ่งวัสดุที่ได้รับการยึ่งฝึ่งประจุสามารถนำไฟฟ้าได้ ดีขึ้นและที่อุณหภูมิมากกว่า 900 องศาเซลเซียส[8]ที่ใช้ในการขับไล่สารเจือเข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำหรือวัสดุที่ได้รับการยึ่งฝึ่งประจุซึ่งความลึกขึ้นกับปัจจัยของสัมประสิทธิ์ของการเคลื่อนที่ของอะตอมสารเจือในวัสดุเป้าหมายโดยจะแปรตามชนิดของสารเจือ ระบายผลึกของแผ่นเป้าหมายและอุณหภูมิ ดังนั้นการแอนนีสหลังการยึ่งฝึ่งประจุจะทำให้ได้ผลประโยชน์ 3 ประการคือ (1) เพื่อทำการซ่อมแซมส่วนที่ไม่สมบูรณ์ของผลึกที่เกิดจากการยึ่งสารเจือหรือสร้างโครงสร้างผลึกขึ้นมาอีกครั้ง (2) เพื่อเป็นการรวมตัวพันธะระหว่างอะตอมสารเจือกับอะตอมซิลิคอนและ (3) การขับไล่สารเจือ

ในการแอนนีสเราใช้เตาแบบแนวนอน ซึ่งมีลักษณะเป็นท่อควอทซ์รูปร่างเป็นทรงกระบอกวางในแนวนอนล้อมรอบด้วยฮีตเตอร์ 3 โจน คือ โจน Z1, Z2 และ Z3 เราจะทำกาใส่แผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ไว้ที่ตำแหน่งโจน Z2 เพราะเป็นตำแหน่งที่อุณหภูมิมีค่าคงที่ พิจารณาลักษณะโครงสร้างเตาแบบแนวนอน ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของเตาแบบแนวนอน

เตาแบบแนวนอน ที่ใช้ในการวิจัยนี้ใช้ รุ่น SVG THERMCO TMX2604 Diffusion Furnace ซึ่งมีแสดงผังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 เตาแอนนัลแบบแนวนอน ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์

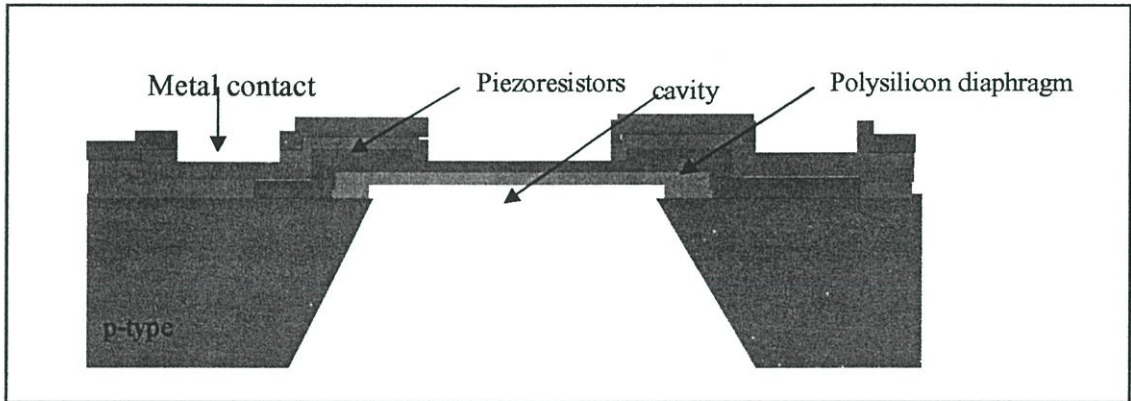
2.4 อุปกรณ์ตรวจจับความดันขนาดจุลภาค

อุปกรณ์ตรวจจับความดันขนาดจุลภาค (pressure microsensors) ในระดับไมโครเมตร ได้ถูกนำมาใช้งานอย่างหลากหลาย เช่น ใช้ใน อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมทางการแพทย์ และอื่นๆ โดยมีการพัฒนาขนาดของอุปกรณ์ตรวจจับความดันให้มีขนาดเล็กลงเรื่อยมาตามวัตถุประสงค์การใช้งาน ในปัจจุบันความต้องการใช้งานอุปกรณ์ตรวจจับความดัน ไปตรวจจับความดันในบริเวณที่มีขนาดจุลภาคที่มีขนาดเล็กลงมีจำนวนเพิ่มขึ้น และอุปกรณ์ตรวจจับความดันขนาดจุลภาคชนิดเพียโซรีซีฟทีฟ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่สามารถพัฒนาให้มีขนาดเล็กลงในระดับไมครอน

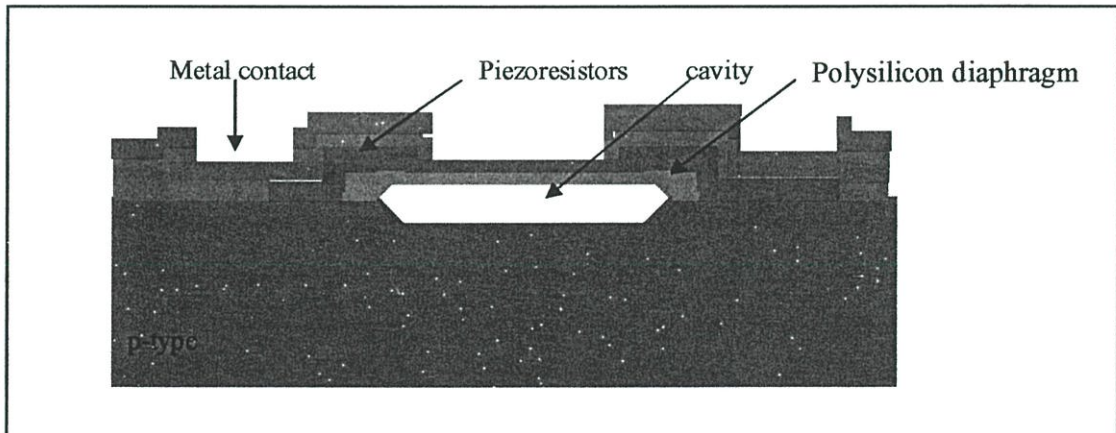
2.4.1 โครงสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดันขนาดจุลภาคแบบเพียโซรีซีฟทีฟ[1]

โดยทั่วไปอุปกรณ์ตรวจจับความดันขนาดจุลภาคที่ใช้มี 2 วิธีการ คือ หลักพื้นฐานของเพียโซรีซีฟทีฟ โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของตัวต้านทานขณะเกิดการยุบตัวของไดอะแฟรม เมื่อให้ความดัน และ หลักพื้นฐานของคาปาซิทีฟ (capacitive) โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของตัวเก็บประจุขณะเกิดการยุบตัวของไดอะแฟรม เมื่อให้ความดัน แต่ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะในส่วนของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน

ยูนิตของไดอะแฟรม เมื่อให้ความดัน แต่ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะในส่วนของอุปกรณ์ตรวจจับความดันขนาดจุลภาคที่ใช้หลักพื้นฐานของเพียโซรีซิสทีฟเพราะจะนำเทคนิคนี้ไปทำการวิจัยต่อไป และเทคนิคการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดันขนาดจุลภาคที่สร้างจะประกอบด้วย 2 แบบ คือ บัลก์ (bulk) และ เชิงผิว (surface) ดังในรูปที่ 2.15 (ก) และ (ข) ตามลำดับ แสดงหลักพื้นฐานของอุปกรณ์ตรวจจับ เพียโซรีซิสทีฟ



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.15 (ก) อุปกรณ์ตรวจจับความดันชนิดเพียโซรีซิสทีฟขนาดจุลภาคแบบบัลก์

(ข) อุปกรณ์ตรวจจับความดันชนิดเพียโซรีซิสทีฟขนาดจุลภาคแบบเชิงผิว

เทคนิคการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดันชนิดเปียโซรีซีฟทีป ขนาดจุลภาคแบบบัลก์ จะอาศัยการกัดเปิดช่องว่าง (cavity) ด้านหลังแผ่นด้วยวิธีการกัดด้วยสารเคมี (wet etching) ได้แก่ KOH, TMAH เป็นต้น สำหรับเทคนิคการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดันชนิดเปียโซรีซีฟทีป ขนาดจุลภาคแบบเชิงผิวจะอาศัยการกัดเปิดช่องที่ด้านหน้าแผ่น โดยอาศัยการเปิดรูแล้วทำการกัดด้วยวิธีการใช้สารเคมี

การเปลี่ยนแปลงความดันสามารถวัดได้ด้วยการวัดตัวต้านทานหรือเปียโซรีซีฟทีป สเตรนเกจ (strain gauges) ที่วางบนตำแหน่งด้านบนแผ่นไดอะแฟรม โดยที่ตัวต้านทานนี้ทำจากโพลีซิลิคอนที่ได้รับการเจือสารและได้รับการออกแบบเป็นคู่ของวงจรถ่วง เช่น วิทสโตนบริดจ์ มีการเปลี่ยนแปลงความเค้นของเปียโซรีซีฟทีป สเตรนเกจ สัมพันธ์กับแรงดัน ($P-P_0$) ค่าความเที่ยงตรงจะแปรผันขึ้นตรงกับสัมประสิทธิ์เปียโซรีซีฟทีป (piezoresistive coefficient : π) ของวัสดุของแผ่นไดอะแฟรม [1] โดยมีความสัมพันธ์ตามสมการ 2.10

$$V_{out} \propto \Delta R \propto \pi (P-P_0) \quad (2.10)$$

2.4.2 สัมประสิทธิ์เปียโซรีซีฟทีปตามยาวและสัมประสิทธิ์เปียโซรีซีฟทีปตามขวาง[10, 11]

เมื่อมีแรงใดๆมากระทำกับวัสดุแล้วทำให้วัสดุนั้นมีความเค้นเกิดขึ้น พบว่าสนามไฟฟ้า (\vec{E}) จะมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นกระแส (J) และความเค้น (σ) ดังสมการที่ 2.11

$$\vec{E} = \rho J + \pi J \sigma \quad (2.11)$$

เมื่อ ρ คือ สภาพความต้านทาน

π คือ สัมประสิทธิ์เปียโซรีซีฟทีปเทนเซอร์

สำหรับสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในทิศทางใดๆในโครงผลึก เมื่อพิจารณาจากสมการที่ 2.12 จะสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\vec{E} = \rho_0 J_1 + \pi_1 \rho_0 J_1 \sigma_1 \quad (2.12)$$

เมื่อ ρ_1 คือ สภาพความต้านทานเริ่มต้น

π_l คือ สัมประสิทธิ์เพียโซรีซีฟที่ปตามยาว (longitudinal piezoresistive coefficient)

จากกฎของโอห์ม สนามไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์กับสภาพต้านทานและความหนาแน่นกระแส ดังสมการที่ 2.13

$$\vec{E} = \rho J \quad (2.13)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ 2.13 ลงในสมการที่ 2.12 จะได้ว่า

$$\rho_1 J_1 = \rho_0 J_1 + \pi_l \rho_0 J_1 \sigma_1 \quad (2.14)$$

หรือ

$$\rho_1 = \rho_0 + \pi_l \rho_0 \sigma_1 \quad (2.15)$$

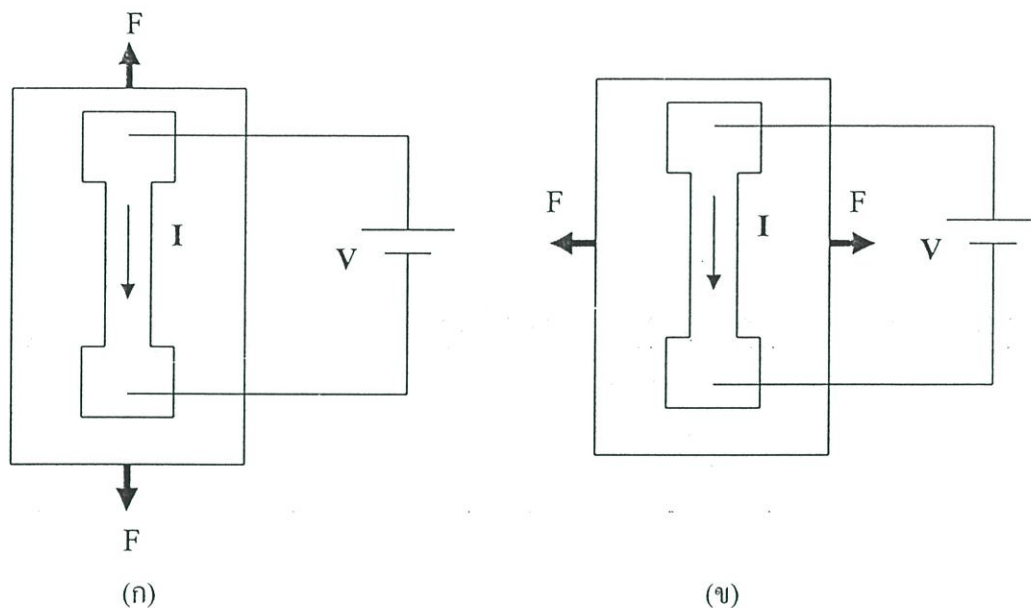
$$\frac{\rho_1 - \rho_0}{\rho_0} = \pi_l \sigma_1 \quad (2.16)$$

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} = \pi_l \sigma_1 \quad (2.17)$$

ในการทำงานเดียวกันเมื่อกำหนดให้ π_t คือ สัมประสิทธิ์เพียโซรีซีฟที่ปตามขวาง (transverse piezoresistive coefficient) ดังนั้นจากสมการที่ 2.12 ถึง 2.17 จะได้ว่า

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} = \pi_t \sigma_1 \quad (2.18)$$

จากสมการที่ 2.17 และ 2.18 พบว่าทั้งสัมประสิทธิ์เพียโซรีซีฟที่ปตามยาวและสัมประสิทธิ์เพียโซรีซีฟที่ปตามขวาง เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำกับวัสดุแล้วทำให้เกิดความเค้นขึ้น โดยสัมพันธ์กับอัตราเปลี่ยนแปลงของสภาพต้านทานในวัสดุ ซึ่งขึ้นอยู่กับทิศทางของแรง (F) ที่มากระทำโดยสัมประสิทธิ์เพียโซรีซีฟที่ปตามยาวนี้จะเกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำกับวัสดุดังรูปที่ 2.16 (ก) ส่วนสัมประสิทธิ์เพียโซรีซีฟที่ปตามขวางจะเกิดเมื่อมีแรงตามขวางมากระทำกับวัสดุดังรูปที่ 2.16 (ข)



รูปที่ 2.16 ทิศทางของแรงที่มากระทำกับวัสดุที่ประกอบด้วย (ก) แรงดึงตามยาว (ข) แรงดึงตามขวาง

2.4.3 ความเค้นตามความยาวและความเค้นตามขวาง [12]

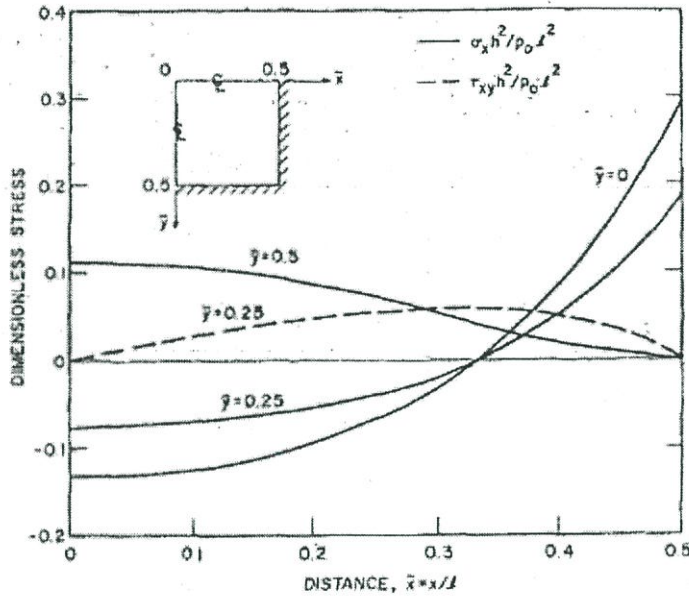
เมื่อให้ความดันกับไดอะแฟรมแล้ว ไดอะแฟรมจะเกิดการแอ่นตัวทำให้เกิดความเค้นขึ้นในตัวต้านทาน ซึ่งประกอบด้วยความเค้นตามความยาว (σ_l) และความเค้นตามขวาง (σ_t) โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.19

$$\sigma_{(x,y)} = \bar{\sigma}_{(x,y)} \left[\frac{l}{h} \right]^2 p \quad (2.19)$$

- เมื่อ $\sigma_{(x,y)}$ คือ ตำแหน่งความเค้นบนไดอะแฟรม
 $\bar{\sigma}_{(x,y)}$ คือ ความเค้นไดเมนชันเลส (dimensionless stress)
 l คือ ความกว้างของไดอะแฟรม
 h คือ ความหนาของไดอะแฟรม
 p คือ ความดันที่ให้กับไดอะแฟรม

จากสมการที่ 2.19 จะเห็นว่า ความเค้นที่เกิดขึ้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับขนาดความกว้างของไดอะแฟรม ความหนาของไดอะแฟรม และความดันที่ป้อนให้กับไดอะแฟรมแล้วยังขึ้นอยู่กับความ

เค้นโดเมนชั้นเลสเป็นส่วนสำคัญอีกด้วยซึ่งค่าของความเค้นโดเมนชั้นเลสนี้จะมีค่าแตกต่างกันไปตามตำแหน่งการวางตัวด้านทานไดอะแฟรมดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.17 การกระจายค่าความเค้นโดเมนชั้นเลสใน 1 คอทเรนที่บริเวณต่างๆ กับบนไดอะแฟรมรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

จากรูปที่ 2.17 เป็นกราฟแสดงการกระจายค่าความเค้นโดเมนชั้นเลสใน 1 คอทเรนที่บริเวณต่างๆ กันบนไดอะแฟรมรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ความเค้นโดเมนชั้นจะมีค่ามากที่สุดที่บริเวณขอบของไดอะแฟรมทั้ง 2 ด้าน ดังนั้นเมื่อป้อนความดันให้กับไดอะแฟรมจะทำให้ความเค้นตามความยาวและความเค้นตามขวางเกิดการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด โดยที่ความเค้นตามความยาวจะเกิดการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดที่ตำแหน่ง $\bar{x} = 0, \bar{y} = 0.5$ บนไดอะแฟรมและความเค้นตามขวางอยู่ที่ตำแหน่ง $\bar{x} = 0.5, \bar{y} = 0$ บนไดอะแฟรม และเมื่อแทนค่าความเค้นโดเมนชั้นเลสที่ตำแหน่งดังกล่าวลงในสมการที่ 2.19 จะทำให้สามารถคำนวณหาความเค้นตามยาวและความเค้นตามขวางได้ดังสมการที่ 2.20 และ 2.21 ดังนี้

$$\begin{aligned} \sigma_l &= \sigma(0,0.5) \\ &= 0.155 \left[\frac{l}{h} \right]^2 p \end{aligned} \tag{2.20}$$

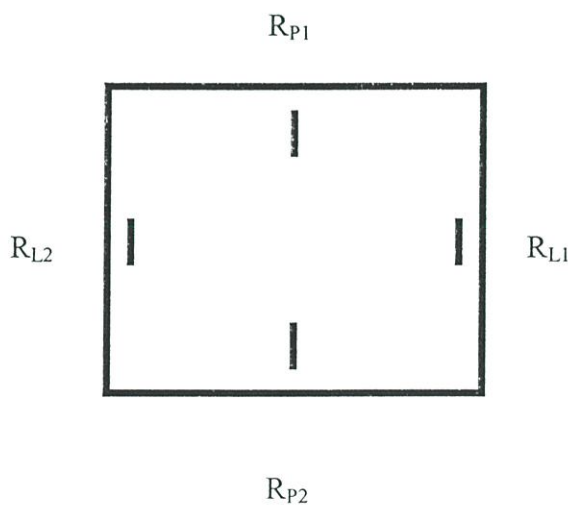
$$\sigma_r = \sigma(0.5,0)$$

$$= 0.294 \left[\frac{l}{h} \right]^2 p \quad (2.21)$$

เมื่อให้ความดันกับไดอะแฟรม ไดอะแฟรมจะเกิดการแอ่นตัว ทำให้มีความเค้นขึ้นซึ่งที่บริเวณตำแหน่งขอบของไดอะแฟรมจะมีความเค้นเกิดขึ้นมากที่สุดดังสมการที่ 2.20 และ 2.21 ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการออกแบบการวางตำแหน่งของตัวต้านทานบนไดอะแฟรมจึงควรออกแบบให้ตัวต้านทานอยู่ชิดขอบไดอะแฟรม เพื่อให้เกิดความเค้นในตัวต้านทานมากที่สุดใน 1 ควาทแรน ดังนั้นเมื่อพิจารณาครบทั้ง 4 ควาทแรน บริเวณที่เกิดความเค้นในตัวต้านทานมากที่สุด คือ บริเวณตรงกลางของขอบ

2.4.4 ความเค้นและสัมประสิทธิ์เพียโซรีซีฟทิวิตีในตัวต้านทาน[13, 14]

การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทั้ง 4 ตัวบนไดอะแฟรมรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสจะประกอบไปด้วยตัวต้านทานในแนวขนานขอบไดอะแฟรม (parallel resistor) 2 ตัวคือ R_{L1} , R_{L2} และตัวต้านทานในแนวตั้งฉาก (perpendicular resistor) 2 ตัวคือ R_{P1} , R_{P2} ดังรูปที่ 2.18 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทั้งในแนวขนานและในแนวตั้งฉากขณะให้ความดันบนไดอะแฟรมนี้ จะมีความสัมพันธ์กับความเค้นที่เกิดขึ้นและสัมประสิทธิ์เพียโซรีซีฟทิวิตีดังสมการที่ 2.22 และ 2.23 ตามลำดับ



รูปที่ 2.18 ตัวต้านทาน 4 ตัวบนไดอะแฟรม

$$\left[\frac{\Delta R}{R} \right]_L = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t \quad (2.22)$$

$$\left[\frac{\Delta R}{R} \right]_P = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t \quad (2.23)$$

เมื่อ $\left[\frac{\Delta R}{R} \right]_L$ คือ อัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานในแนวขนาน

$\left[\frac{\Delta R}{R} \right]_P$ คือ อัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานในแนวตั้งฉาก

π_l คือ สัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีฟที่ปตามยาว (longitudinal piezoresistive coefficient)

π_t คือ สัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีฟที่ปตามขวาง (transverse piezoresistive coefficient)

σ_l คือ ความเค้นตามยาว (longitudinal stress)

σ_t คือ ความเค้นตามขวาง (transverse stress)

โพลีซิลิคอนที่สร้างบนฐานรองซิลิคอนด้วยวิธี LPCVD จะมีลักษณะไม่เป็นผลึกเดี่ยว แต่จะเป็นผลึกแบบหลายรูป ซึ่งมีทั้งระนาบ (100) และระนาบ (111) ดังนั้นตัวต้านทานโพลีซิลิคอน ที่สร้างขึ้นจึงมีค่าสัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีฟที่ปตามยาวและสัมประสิทธิ์ตามขวางเป็นค่าเฉลี่ย ซึ่งไม่สามารถพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีฟที่ได้เหมือนกับโครงสร้างผลึกรูปเดี่ยวได้ ดังนั้นค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีฟของโพลีซิลิคอนหาได้จากความสัมพันธ์ของเกจแฟกเตอร์ (gage factor) และค่าของยังโมดูลัส (young's modulus) ดังสมการที่ 2.24 และ 2.25 ดังนี้

$$\langle \pi_l \rangle = \frac{GF_l}{\langle Y \rangle} \quad (2.24)$$

$$\langle \pi_t \rangle = \frac{GF_t}{\langle Y \rangle} \quad (2.25)$$

เมื่อ $\langle \pi_l \rangle$ คือ ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีฟที่ปตามยาว

$\langle \pi_t \rangle$ คือ ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีฟที่ปตามขวาง

$\langle Y \rangle$ คือ ยังโมดูลัสเฉลี่ยของฟิล์มโพลีซิลิคอน

GF_l คือ เกจแฟกเตอร์ตามยาว (longitudinal gage factor)

GF_t คือ เกจแฟกเตอร์ตามขวาง (transverse gage factor)

จากการค้นพบของฮุก (Hook) พบว่าในวัสดุหลายๆชนิดที่มีขนาดจำกัด อัตราส่วนระหว่างความเค้นและความเครียดมีค่าคงที่ซึ่งค่าคงที่ตามกฎของฮุก นี้เรียกว่าดัชนีการยืดหดตัวของวัสดุหรือโมดูลัสของวัสดุ (Modulus of elastic of material) ดังสมการที่ 2.26

$$Y = \frac{\text{Stress}}{\text{Strain}} = \frac{F/A}{\Delta l/l} = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2.26)$$

ค่าของยังโมดูลัสในแต่ละวัสดุจะมีค่าไม่เท่ากัน และแตกต่างกันไปดังแสดง ในตาราง 2.1 สำหรับเกจแฟกเตอร์ตามยาวและเกจแฟกเตอร์ตามขวางในสมการที่ 2.25 และ 2.26 จะสามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงสภาพต้านทานกับความเครียดที่เกิดขึ้นดังสมการที่ 2.27 และ 2.28 ดังนี้

$$GF_l = \frac{\Delta \rho}{\rho_0} \frac{1}{\epsilon_l} \quad (2.27)$$

$$GF_t = \frac{\Delta \rho}{\rho_0} \frac{1}{\epsilon_t} - 1 \quad (2.28)$$

เมื่อ ϵ_l คือ ความเครียด (strain) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมต่อความยาวเดิมก่อนถูกแรงกระทำดังสมการที่ 2.29

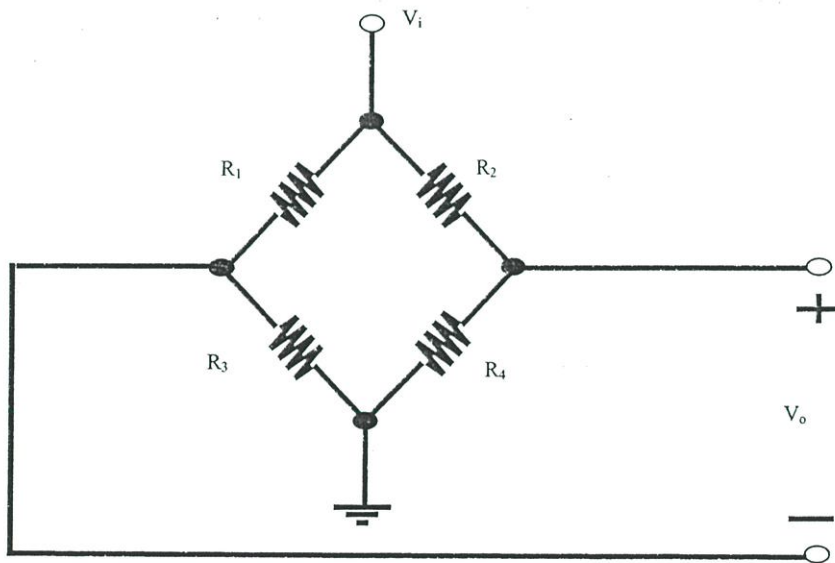
$$\epsilon_l = \frac{\Delta l}{l} \quad (2.29)$$

ค่าเกจแฟกเตอร์นี้ในแต่ละวัสดุมีค่าไม่เท่ากันซึ่งค่าของเกจแฟกเตอร์นี้จะเป็นตัวแปรที่จะบอกถึงความไวของเกจ เช่น ถ้าเกจแฟกเตอร์มีค่าสูงหมายถึง เกจนั้นมีความไวในการเปลี่ยนแปลงสูงเป็นต้น

2.5 วงจรวิทสโตนบริดจ์[15]

วงจรวิทสโตนบริดจ์ (Wheatstone Bridge circuit) จะถูกนำมาใช้กับทรานสดิวเซอร์ความดัน เพื่อใช้ในการแปรค่าจากความดันไปสู่สัญญาณแรงดันไฟฟ้าซึ่งจะทำให้สามารถทราบถึง ปริมาณความดันที่เปลี่ยนแปลงไปโดยพิจารณาได้จากปริมาณแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น วงจรวิทสโตนบริดจ์ชนิด พาสซีฟเป็นวงจรที่ประกอบด้วยตัวต้านทาน 4 ตัวต่อกันเป็นลูปดังรูปที่ 2.19 ซึ่งเมื่อวงจรบริดจ์อยู่ใน สภาวะสมดุลแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต V_o จะมีค่าเท่ากับ 0 โวลต์ และจะทำให้อัตราส่วนค่าความต้านทาน ดังสมการที่ 2.30

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4} \quad (2.30)$$



รูปที่ 2.19 วงจรวิทสโตนบริดจ์

เมื่อความต้านทานในวงจรบริดจ์เกิดการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลง วงจรบริดจ์จะอยู่ในสถานะไม่สมดุลทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมเอาต์พุต V_o ขึ้น ซึ่งสามารถคำนวณหา V_o ได้ดังสมการที่ 2.31

$$V_o = V_i \times \frac{\Delta R}{R} \quad (2.31)$$

2.6 ความไวในการตอบสนอง [11]

เซนเซอร์ทุกชนิดสิ่งแรกที่จะต้องคำนึงคือ ความไวในการตอบสนอง (sensitivity) ซึ่งเซนเซอร์ที่ดีนั้นควรจะมีความไวสูงและคงที่นั่นหมายความว่าเซนเซอร์นั้นจะมีการตอบสนองต่ออินพุตที่มากกระทำได้ ความไวในการตอบสนองจะเป็นอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงสัญญาณเอาต์พุตที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสัญญาณทางอินพุต เมื่อให้ y เป็นเอาต์พุตที่มีความสัมพันธ์กับ x ซึ่งเป็นเอาต์พุตโดยเป็นไปตามฟังก์ชัน $y = f(x)$ ดังนั้นสมการความไว S ที่จุด x_o ใดๆจะสามารถเขียนได้ ดังนี้

$$S(x_o) = \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=x_o} \quad (2.32)$$

สำหรับทรานดิวเซอร์ความดันนั้น ความไวในการตอบสนองต่อความดันสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.33 ซึ่งเป็นอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุตต่อการเปลี่ยนแปลงความดันที่มีต่อแรงดันคงที่ของวงจรวีทสโตนบริดจ์

$$S = \frac{\Delta V}{V_i \Delta P} \quad (2.33)$$

S คือ ความไวของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน

ΔV คือ การเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตของวงจรวีทสโตนบริดจ์

ΔP คือ การเปลี่ยนแปลงความดัน

V_i คือ แหล่งจ่ายแรงดันคงที่ ของวงจรวีทสโตนบริดจ์

2.7 เทคนิควัด R_c ด้วยโครงสร้าง CBK[16]

ในการหาค่าความต้านทานรอยสัมผัสระหว่างเนื้อสารกับโลหะ (contact resistance: R_c) โดยทั่วไปจะใช้เทคนิคการวัด ด้วยโครงสร้าง CBK (Cross Bridge Kelvin) แสดงดังรูปที่ 2.20

ซึ่งคำนวณหาได้ดังสมการที่ 2.34 คือ

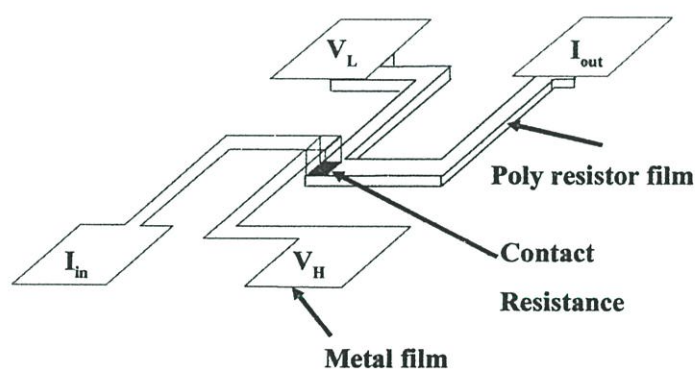
$$R_c = \frac{V_H - V_L}{I_{in}} \quad (2.34)$$

โดยที่ R_c คือ รอยสัมผัสระหว่างเนื้อสารกับโลหะ

V_H คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ระดับสูง

V_L คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ระดับต่ำ

I_{in} คือ กระแสไฟฟ้าขาเข้า



รูปที่ 2.20 โครงสร้าง CBK

2.8 ทีซีอาร์ (TCR) [1]

การศึกษาหาค่า ทีซีอาร์ (TCR: Temperature Coefficient Resistivity) เป็นตัวแสดงคุณสมบัติความต้านทานของสารหรือวัตถุ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ได้ความสัมพันธ์สมการทั่วไปดังนี้

$$TCR = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = \frac{R(T) - R_0}{R_0(T - T_0)} \quad (2.35)$$

โดยที่ R_0 คือ ค่าความต้านทานที่อุณหภูมิห้อง,

$R(T)$ คือ ค่าความต้านทานที่อุณหภูมิ T

T_0 คือ อุณหภูมิห้อง

และ T คือ อุณหภูมิต่างๆ

ในกรณีสารกึ่งตัวนำค่าความต้านทานจะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิดังสมการ 2.36

$$R(T) = R_0 \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.36)$$

โดยที่ E_a คือ พลังงานที่ทำการจ่าย

K คือ ค่าคงที่ของ โบลทซ์มันน์

จะเห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิ ค่าความต้านทานลดลงเป็นเอ็กซ์โพเนนเชียล ซึ่งในกรณีการนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจจับความดันจะควบคุมอุณหภูมิได้ยาก

แต่ในกรณีของ โลหะหรือสารกึ่งตัวนำที่มีการเจือสารที่สูงมากมีความสัมพันธ์ดังสมการ 2.37

$$R(T) \approx R_0(1 + \alpha_T T + \beta_T T^2) \quad (2.37)$$

โดยที่ α_T คือ ทีซีอาร์

β_T คือ สัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ

ส่วนใหญ่แล้วค่า β_T มีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับ TCR เช่น โลหะแพลทตินัม มีค่า TCR เท่ากับ $3.9 \times 10^{-4} /K$ และมีค่า β_T เท่ากับ $-5.9 \times 10^{-7} /K^2$ ดังนั้นจะเห็นว่าในกรณีของโลหะจะมีค่าความต้านทานที่สูงขึ้น เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิ และมีค่าความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้น

ดังนั้นโดยทั่วไป โลหะจะมีค่า TCR เป็นบวก ซึ่งหมายถึง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความต้านทานจะสูงขึ้น และเมื่ออุณหภูมิลดลงค่าความต้านทานจะลดลง ในกรณีของสารกึ่งตัวนำ TCR จะมีค่าเป็นลบ ซึ่งหมายถึง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความต้านทานจะลดลง และเมื่ออุณหภูมิลดลงค่าความต้านทานจะสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามสารกึ่งตัวนำที่ได้รับการเจือสารที่ความเข้มข้นสูงมากประมาณมากกว่า 10^{20} อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรจะทำให้ค่า TCR มีค่าเป็นบวก

บทที่ 3

เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และการวัด

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติฟิล์มโพลีซิลิกอนและอมอร์ฟัส

3.1.1 จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)[17]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดหรือ SEM (Scanning Electron Microscopy) เป็นเทคนิคที่มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางในหลายแขนงสาขาวิชาไม่ว่าจะเป็นงานด้านวัสดุศาสตร์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ธรณีวิทยา ชีววิทยา และการแพทย์

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของวัสดุ โดยอาศัยการกวาดของลำอิเล็กตรอนไปบนผิววัสดุแทนการใช้แสงธรรมดาซึ่งจะทำให้มีกำลังขยายสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ธรรมดา โดยสามารถขยายภาพได้มากกว่า 1,000 เท่า จนถึงระดับ 100,000 เท่าขึ้นไปและจุดเด่นที่สำคัญมีอยู่ 2 ประการคือ

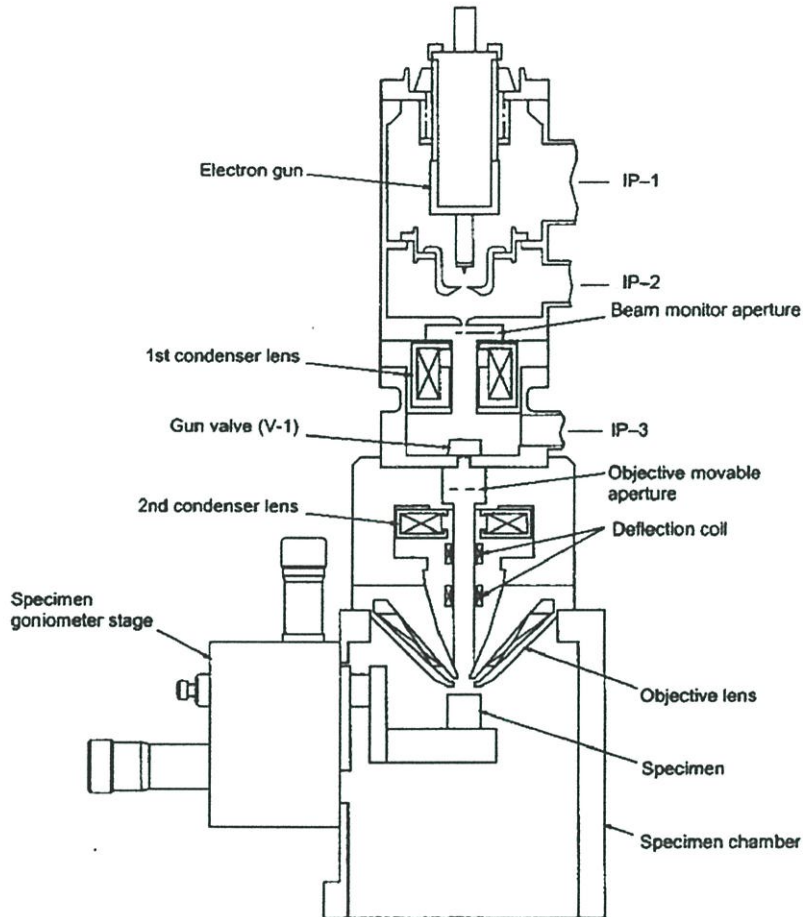
1. สามารถให้ภาพที่มีความคมชัดลึกสูง (high depth of field)
2. สามารถให้กำลังแยกแยะเชิงระยะสูง (high spatial resolution)

สำหรับโครงสร้าง พื้นฐานการทำงานของ SEM พิจารณาได้ดังรูปที่ 3.1

ในส่วนบนสุดจะเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนหรือปืนอิเล็กตรอน (electron gun) ซึ่งเป็นส่วนที่มีความสำคัญที่สุดของเครื่อง SEM โดยจะทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่สามารถผลิตกระแสจำนวนมาก โดยตัววัสดุจะต้องมีความเสถียรภาพและภาพตัดขวางของลำอิเล็กตรอนที่ส่งออกไปจะต้องเป็นจุดเล็กๆ ซึ่งเป็นอิเล็กตรอนที่นิยมใช้ในปัจจุบันมี 4 ประเภทคือ

1. แบบขดลวดทั้งสแตน เป็นปืนอิเล็กตรอนที่นิยมใช้มากที่สุดเนื่องจากมีราคาถูกและไม่ต้องการสุญญากาศมากนัก
2. แบบผลึก LaB_6 (lanthanum hexaboride crystal) เป็นปืนอิเล็กตรอนที่ให้แสงสว่างสูงกว่าแบบขดลวดทั้งสแตนประมาณ 10 เท่า มีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า และต้องการสภาพสุญญากาศ
3. แบบโคตล์ฟิลด์อิมิชัน (cold field emission source) เป็นปืนอิเล็กตรอนที่ให้แสงสว่างสูงกว่าแบบทั้งสแตนและแบบผลึก LaB_6 นอกจากนี้ยังสามารถทำงานได้ในอุณหภูมิห้อง
4. แบบช็อตตีฟิลด์อิมิชัน (schottky filed emission source) เป็นปืนอิเล็กตรอนที่คล้ายกับ

แบบ โคลด์คัทอิมิชันแต่ต่างกันตรงที่จะต้องทำงานที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,800 เคลวิน

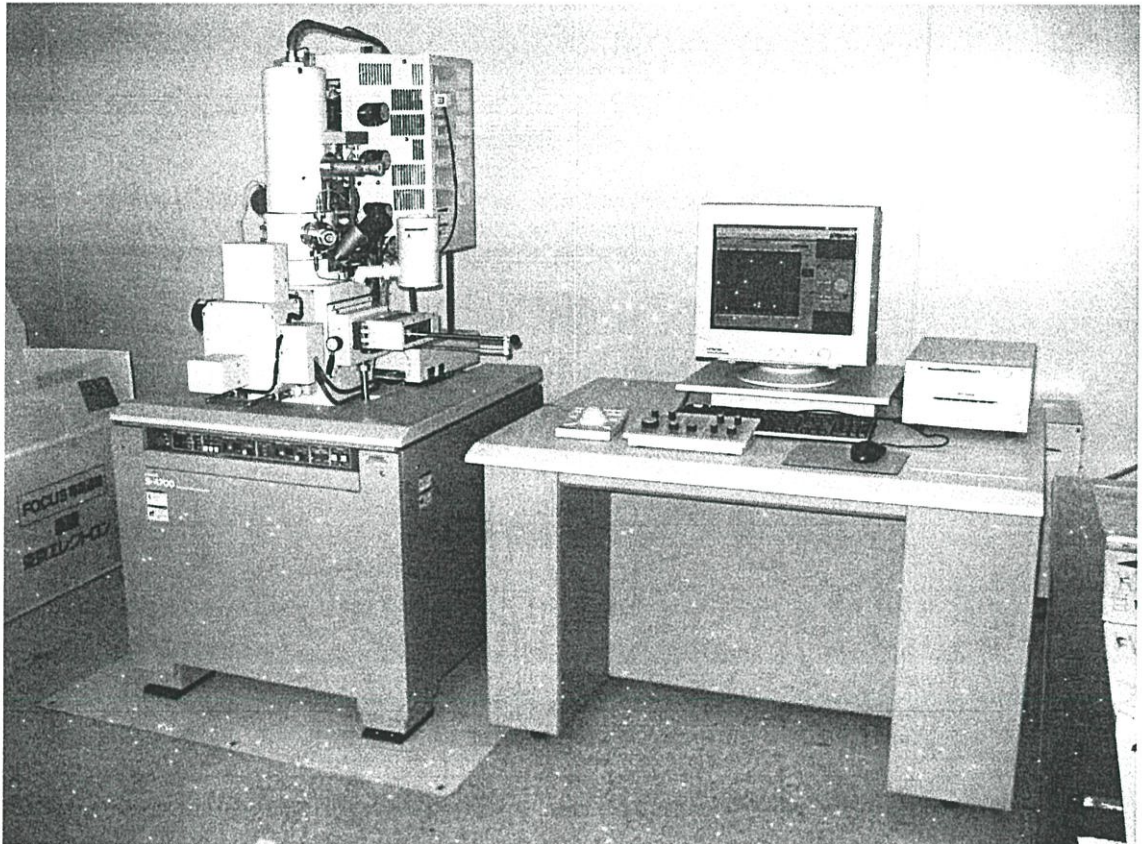


รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบของเครื่อง SEM

อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนนี้จะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงตามคอลัมน์ด้วยความต่างศักย์ในช่วง 0.5- 30 กิโลโวลต์ โดยมีคอนเดนเซอร์เลนส์ตัวแรก (1st condenser lens) ซึ่งเป็นแม่เหล็กไฟฟ้าทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนให้ผ่านไปที่ย่อเปิดที่มีสามารถปรับขนาดต่างๆ กันได้ด้วย ออปเจกทีฟ มูฟเอเบิล แอปเพอเจอร์ (objective movable aperture) เพื่อควบคุมปริมาณของอิเล็กตรอน หลังจากนั้นคอนเดนเซอร์เลนส์ตัวที่สอง (2nd condenser lens) ทำหน้าที่บีบอัดอิเล็กตรอนให้มีพื้นที่หน้าตัดเล็กลงและใช้เลนส์วัตถุ (objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์อันสุดท้ายทำการโฟกัสลำอิเล็กตรอนไปตกกระทบกับผิววัตถุ โดยมีดีเฟลคชันคอยล์ (deflection coil) ทำหน้าที่กวาดลำ

อิเล็กตรอนบนผิววัตถุในกรอบสี่เหลี่ยม เมื่อลำอิเล็กตรอนไปตกกระทบกับผิววัตถุจะเกิดอันตรกิริยาขึ้นภายในวัตถุ และจะให้สัญญาณต่างๆออกมาซึ่งจะถูกตรวจจับและนำไปแสดงผล

ในการวิจัยและพัฒนานี้ได้ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมาใช้ในการสังเคราะห์โครงสร้างผิวหน้าของเนื้อฟิล์มโพลีซิลิคอน และ อมอร์ฟัสซิลิคอน โดยใช้ SEM รุ่น S-4700 จากบริษัทฮิตาชิ ใช้แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนชนิดแบบโคคัสฟิวคีมิซัน ซึ่งให้ความสว่างสูงและกำลังสามารถแยกแยะระดับ 1.5 นาโนเมตร ที่ 15 กิโลโวลต์ นอกจากนี้ยังมีกำลังขยายสูงสุดถึง 500,000 เท่า แสดงดังในรูป ที่ 3.2

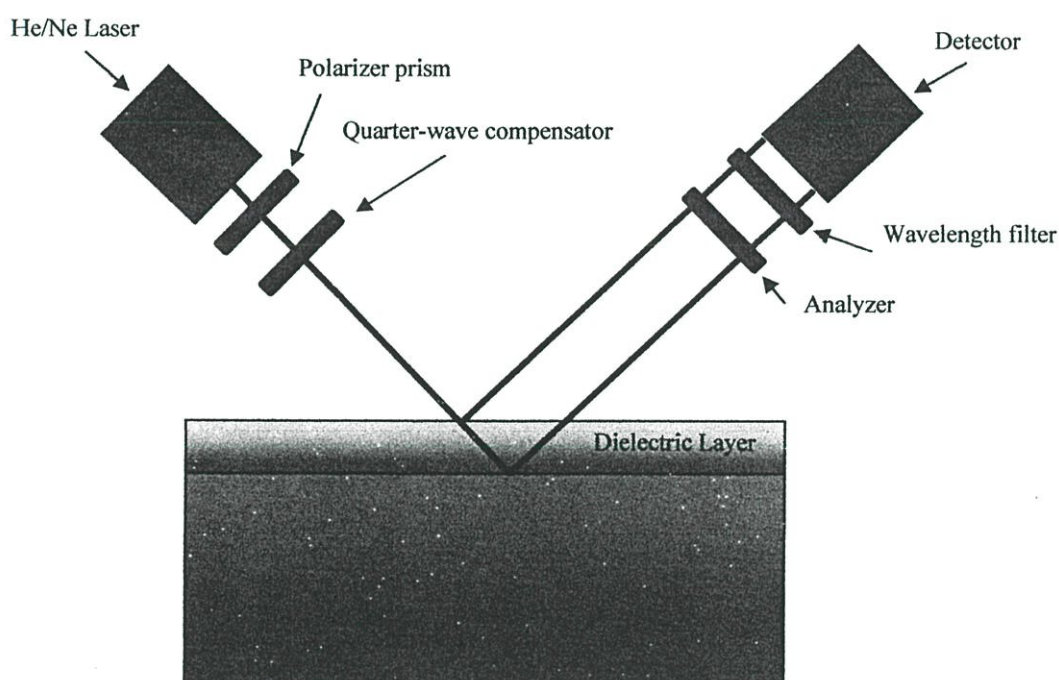


รูปที่ 3.2 เครื่อง SEM รุ่น S-4700

3.1.2 เครื่องวัดความหนา อิลลิปโซมิเตอร์[18]

เครื่องอิลลิปโซมิเตอร์ (Ellipsometer) มีความสามารถในการวัด และวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุชนิดฟิล์มบางหรือฟิล์มโปร่งแสง เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (k), ค่าดัชนีหักเหแสง (n), และความหนาของชั้นฟิล์ม (T) เป็นต้น โดยไม่ทำลายพื้นผิวของวัสดุที่ทำกรวัด อีกทั้งมีความแม่นยำในการวัดสูง หลักการทำงานของเครื่องอิลลิปโซมิเตอร์ เป็นการวิเคราะห์ผลของการสะท้อนและหลักการโพลาไรเซชันของแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบผิวของวัสดุ

การทำงานของอิลลิปโซมิเตอร์แสดงดังรูปที่ 3.3 คือ เครื่องอิลลิปโซมิเตอร์นี้จะใช้แหล่งจ่ายแสงเลเซอร์กำลังต่ำ เป็นเลเซอร์ชนิดฮีเลียม-นีออนที่มีความยาวคลื่นเท่ากับ 632.8 nm (แสงสีแดง) แสงเลเซอร์นี้จะอยู่ในแนวเส้นทางตามแกนทางแสง (optical axis) และลำแสงจะผ่านปริซึมโพลาไรเซอร์ (polarizer prism) ในการผ่านปริซึมนี้ลำแสงโพลาไรซ์จะถูกเปลี่ยนจากวงกลมเป็นเชิงเส้น (linearly – polarized light)

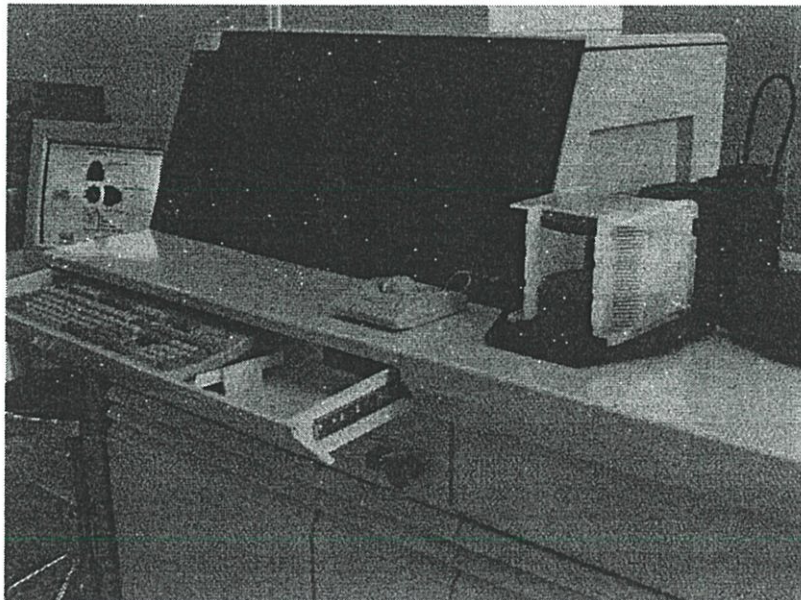


รูปที่ 3.3 การทำงานของ อิลลิปโซมิเตอร์

ลำแสงที่มีความเข้มคงที่ และเป็นเชิงเส้นจะถูกเปลี่ยนกลับเป็นวงกลมโพลาไรซ์ เมื่อควอเตอร์-เวฟ คอมเพนเซเตอร์ (quarter-wave compensator) ถูกแทรกเข้าไปในแนวเส้นทางเดินของแสง (หรือยังคงเป็นเส้นตรง เมื่อคอมเพนเซเตอร์ถูกดึงออกจากแนวเส้นทางเดินของแสง) การแทรกเข้าไป หรือการดึงออกไปของ $+90^\circ$ คอมเพนเซเตอร์จะเป็นโดยอัตโนมัติภายใต้การควบคุมด้วยโปรแกรมของคอมพิวเตอร์ แล้วแสงที่ได้ (ด้วยการแทรกเข้าไป หรือดึงออกมาของ $+90^\circ$ คอมเพนเซเตอร์ในแนวทางการเดินของแสง) จะถูกฉายลงบนผิวของแผ่นชิ้นงาน

แสงสะท้อน (ด้วยการโพลาไรซ์จากคุณสมบัติทางแสงของชิ้นงาน) จะผ่านไปยังอานาไลเซอร์ (analyzer) ที่หมุนอยู่แล้วจะถูกตรวจวัดด้วยตัวตรวจจับทางแสง (detector) ซึ่งเปลี่ยนพลังงานแสงไปเป็นกระแสไฟฟ้า และแปรโดยตรงกับความเข้ม (intensity) ของแสงสะท้อนผ่านอานาไลเซอร์ ตัวกรอง (wavelength filter) จะป้องกันแสงอื่นๆ ที่อาจจะเกิดการแทรกสอดทางแสงขึ้นระหว่างอานาไลเซอร์ และตัวตรวจจับแสง (ยกเว้นแสงเลเซอร์) ดังนั้นจึงสามารถกำจัดผลกระทบของแสงภายนอกได้เป็นอย่างดี

ในการวิจัยและพัฒนานี้ได้ใช้เครื่องอิลลิปโซมิเตอร์ รุ่น Rudolph FEIII มีความสามารถในการวัด มีแหล่งจ่ายแสงเลเซอร์ 2 ชนิด คือ ฮีเลียม-นีออนเลเซอร์ มีความยาวคลื่น 633 นาโนเมตร และ ไดโอดเลเซอร์มีความยาวคลื่น 780 นาโนเมตร และวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆของวัสดุแบบฟิล์มบางหรือฟิล์ม โปร่งแสง เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (k), ค่าดัชนีหักเหแสง (n), และความหนาของชั้นฟิล์ม (T) เป็นต้น รายละเอียดดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เครื่องอิลลิปโซมิเตอร์ รุ่น Rudolph FEIII

3.2 เครื่องมือวัดคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของโพลีรีซิสเตอร์

3.2.1 เครื่องโพรพอยท์โพรบ [19]

โดยทั่วไปการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity: ρ) ของแท่งสารกึ่งตัวนำหรือตัวนำไฟฟ้า สามารถทำได้โดยง่ายกรณีที่สามารถเตรียมให้แท่งสารนั้น มีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยมที่หน้าตัด A มีขนาดยาว L และที่สำคัญก็คือ ต้องทำขั้วไฟฟ้า (metal contact) ที่ปลายทั้งสองด้านของแท่งสารให้สมบูรณ์เป็นรอยสัมผัสอห์มิก (Ohmic contact) ได้ เพื่อให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลโดยตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดของแท่งสาร ซึ่งในกรณีนี้เมื่อให้ความต่างศักย์แก่แท่งสารนี้ V โวลต์ และวัดกระแสที่ไหลผ่านแท่งสารกึ่งตัวนำ I จะได้ว่า

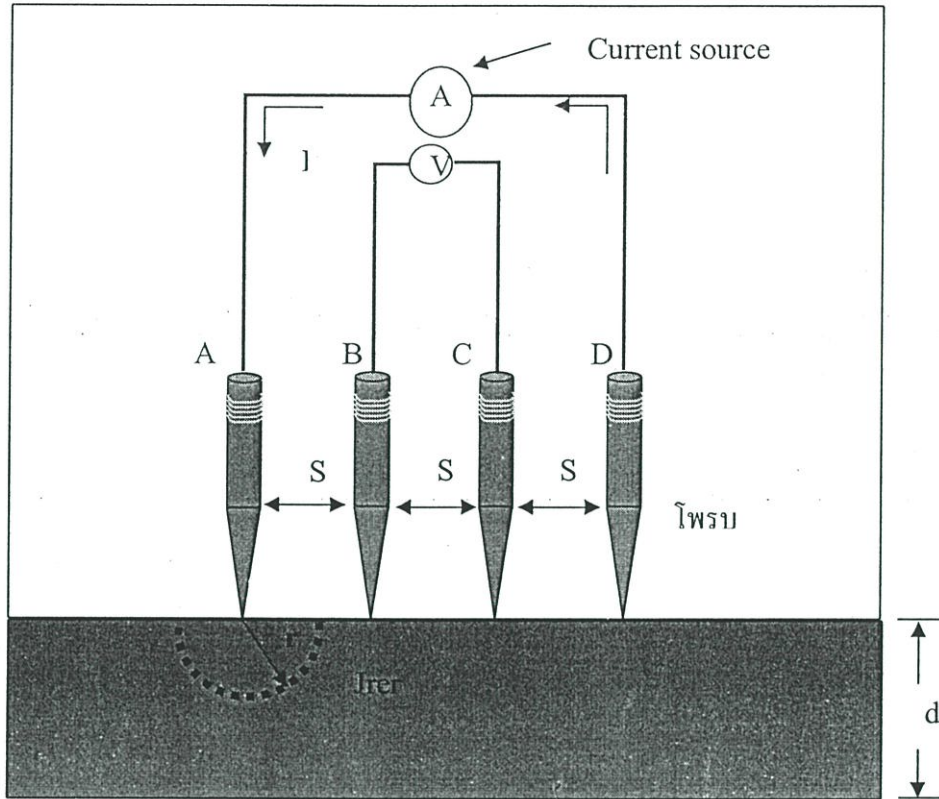
$$J = \sigma \varepsilon \quad (3.1)$$

$$\frac{I}{A} = \frac{1}{\rho} \frac{V}{L} \quad (3.2)$$

$$\text{ดังนั้นสภาพต้านทานไฟฟ้า} \quad \rho = \frac{A V}{I L} \quad (3.3)$$

ซึ่งเมื่อแทนค่าต่าง ๆ ลงไปในสมการที่ (3.3) เราสามารถคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารได้ อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปแล้วในทางปฏิบัติเราไม่สามารถแยกสารกึ่งตัวนำออกมาจากแผ่นผลึกและทำให้อยู่ในรูปสี่เหลี่ยมได้ เพราะจะทำให้แผ่นผลึกเสียหายได้และการทำจุดสัมผัสอห์มิกที่ปลายของแท่งผลึกให้สม่ำเสมอก็ทำได้ยาก และเมื่อทำรอยสัมผัสแล้วสารกึ่งตัวนำก็ไม่สามารถนำกลับมาใช้งานอื่นได้อีก รวมทั้งการกำหนดขนาดความยาวหรือพื้นที่หน้าตัดให้แน่นอนก็ทำได้ยาก ดังนั้นการวัดด้วยวิธีนี้จึงเป็นปัญหาและไม่นิยมนัก วิธีที่ได้รับความนิยมสูงคือ วิธีโพรพอยท์โพรบ หรือ เข็ม 4 จุด ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยาก ทำได้ง่ายและสะดวก สามารถวัดได้ทุกขนาดของแท่งสารไม่ว่าจะมีรูปร่างอย่างไร โดยเฉพาะอย่างยิ่งนั้นยังเป็นวิธีการที่ไม่จำเป็นต้องทำรอยสัมผัสอห์มิก จึงไม่สิ้นเปลืองเวลาและวัสดุด้วย

อุปกรณ์ที่ใช้ในวิธีโพรพอยท์โพรบประกอบด้วย เข็มโลหะจำนวน 4 เข็ม มีปลายแหลมและอาจมีสปริงช่วยทำให้ปลายของเข็มถูกกดและสามารถสัมผัสกับระนาบผิวหน้าด้านที่ขัดมันของชิ้นสารกึ่งตัวนำได้เป็นอย่างดี เข็มทั้ง 4 คือ เข็ม A, B, C และเข็ม D อยู่ห่างกันเป็นระยะ S เท่าๆกัน ซึ่งในทางปฏิบัติทั่วไปจะมีค่าราว 0.5-1 มม. ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และอยู่ในระนาบเดียวกันในการวัดจะเริ่มปล่อยกระแสลงไปที่เข็มด้านนอกสุด คือเข็ม A และ D ทำให้มีกระแสไหลจากขั้ว A ผ่านเนื้อสารไปยังเข็ม D จึงเกิดมีแรงดันตกคร่อมเนื้อสารและถูกวัดออกมาที่ขั้ว B และ C นำค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ I และแรงดัน V ที่วัดได้มาคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้



รูปที่ 3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีโพร์พอยท์โพรบ

ในการวิเคราะห์ทำได้โดยพิจารณาว่า ขนาดของขั้วสารกึ่งตัวนำมีขนาดใหญ่และมีความหนา (d) มากกว่าระยะห่างระหว่างขั้ว (s) หรือ $d \gg s$ กระแสจากขั้ว A จึงสามารถผ่านออกไปที่ขั้ว D ได้ ความหนาแน่นของกระแสขั้ว A จะกระจายออกไปยังเนื้อสารกึ่งตัวนำ ซึ่งความหนาแน่นของกระแส (J_r) รัศมี r ใดๆที่กระจายออกไป จากจุด A คือ

$$J_r = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (3.4)$$

โดย $2\pi r^2$ คือ ครึ่งหนึ่งของพื้นที่ผิวของทรงกลมที่มีรัศมี r จากกฎของโอห์ม สนามไฟฟ้าที่ ϵ_r ที่จุด r คือ

$$\epsilon_r = \frac{J}{\sigma} = \frac{I}{2\pi r^2 \sigma} \quad (3.5)$$

โดย σ คือ สภาพนำไฟฟ้า (conductivity) ของแท่งสารนี้
และจากนิยามที่ว่า ศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่งใดๆ ในรัศมี a คือ

$$V_a = - \int_{-\infty}^a \epsilon_r dr = - \frac{I}{2\pi\sigma} \int_{-\infty}^a \frac{1}{r^2} dr = \frac{I}{2\pi \cdot \sigma \cdot a} \quad (3.6)$$

ดังนั้น เมื่อมีกระแสไหลจากขั้ว A ผ่านเนื้อสารกึ่งตัวนำ ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้ว B และ ขั้ว C ที่เกิดเนื่องจากกระแส I ไหลผ่านคือ

$$V_{B-C} = \frac{I}{2\pi \cdot \sigma \cdot s} - \frac{I}{2\pi \cdot \sigma \cdot 2s} = \frac{I}{4\pi \cdot \sigma \cdot s} \quad (3.7)$$

และเมื่อพิจารณาว่ามีกระแสไหลออกที่ปลายเข็ม D โดยผ่านเนื้อสารกึ่งตัวนำและทำให้เกิดมีความแตกต่างของศักย์ที่ขั้ว B และ C อีกครั้งหนึ่ง ซึ่งเหมือนกับการพิจารณาครั้งแรก ดังนั้นความต่างศักย์ไฟฟารวมระหว่างขั้ว B และขั้ว C จะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า นั่นคือ

$$V_{B-C.Total} = 2 \left(\frac{I}{4\pi \cdot \sigma \cdot s} \right) = \frac{I}{2\pi \cdot \sigma \cdot s} \quad (3.8)$$

ดังนั้น

$$\sigma = \frac{1}{2\pi \cdot s} \frac{I}{V_{B-C.Total}} = \frac{1}{2\pi \cdot s} \frac{I}{V} \quad (3.9)$$

ดังนั้น สภาพความต้านทานไฟฟ้า

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = 2\pi \cdot s \frac{V}{I} \quad (3.10)$$

แต่อย่างไรก็ตามในการวัดชิ้นงานที่มีขนาดความหนา d บางๆ ค่าที่วัดได้จะผิดพลาดจากความ เป็นจริง ซึ่งจะได้ว่า

$$\rho_{corrected} = \rho_{measured} \cdot F \quad (3.11)$$

โดย $\rho_{corrected}$ คือ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ถูกต้อง

$\rho_{measured}$ คือ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้ตามสมการที่ (3.11)

และ F คือ แฟกเตอร์ความถูกต้อง (correction factor)

สำหรับค่าแฟกเตอร์ความถูกต้อง F จะขึ้นอยู่กับขนาด ความหนา และรูปร่างของชิ้นสารที่ทำการวัด โดยเฉพาะอัตราส่วนของค่า d/s

ในกรณีของการวัดชิ้นสารที่มีความหนาเรื่อยๆ ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยหาได้จากสมการที่(3.12)

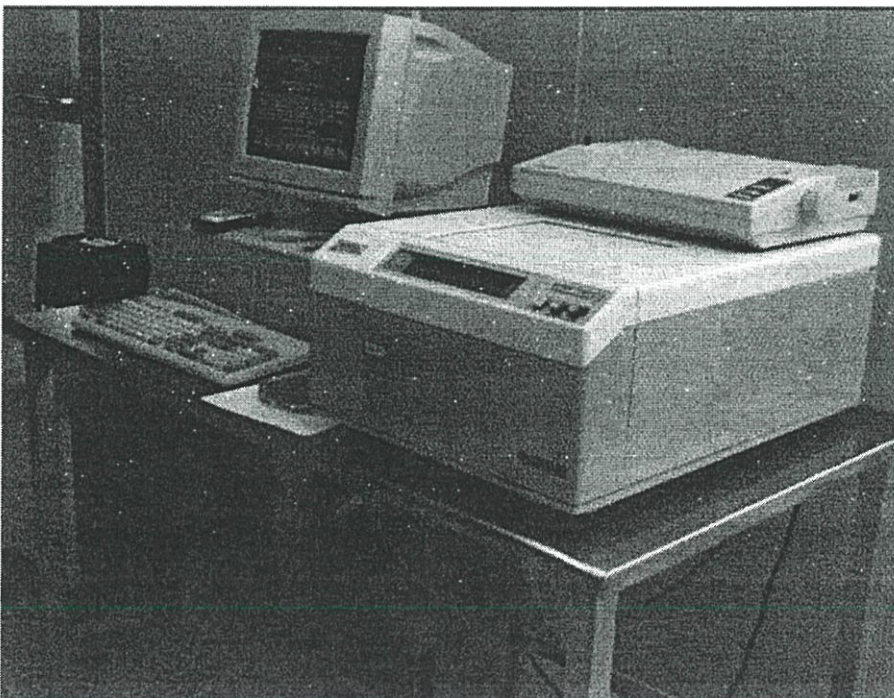
$$\bar{\rho} = \frac{\pi}{\ln 2} \left(\frac{V}{I} \right) x_j = 4.532 \left(\frac{V}{I} \right) x_j \quad (3.12)$$

โดย x_j คือความหนาของชิ้นงานที่ทำกรวัด

นอกจากนี้เรายังหาค่าความต้านทานเชิงแผ่น (sheet resistance: R_s) ซึ่งมีหน่วยเป็น Ω/\square ได้ดังสมการ

$$R_s = \frac{\bar{\rho}}{x_j} \quad (3.13)$$

ในงานวิจัยนี้เราใช้เครื่องโพรมิเท็กซ์โพรบสำหรับวัดความต้านทานเชิงแผ่นของเนื้อฟิล์มโพลีซิลิคอน และ อมอร์ฟัสซิลิคอน โดยใช้เครื่องรุ่น Prometrix Rs-30 จากบริษัทเทนคอร์ (Tencor) ที่ความสามารถวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่น $5 \text{ m}\Omega/\square$ - $5 \text{ M}\Omega/\square$ ที่แผ่นเวเฟอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว-8 นิ้ว โดยมีลักษณะดังรูปที่ 3.6

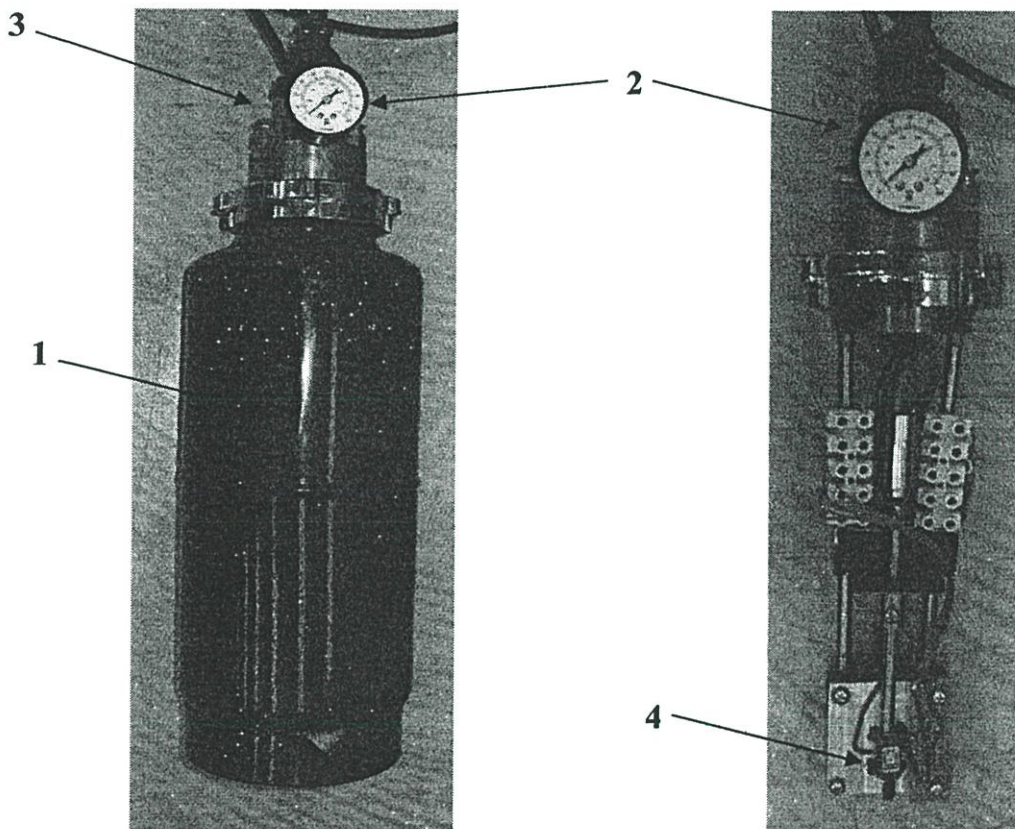


รูปที่ 3.6 เครื่องโพรมิเท็กซ์โพรบรุ่น Prometrix Rs-30

3.2.2 ชุดเครื่องมือที่ใช้ในการวัดและทดสอบความดัน

ชุดเครื่องมือที่ใช้วัดความดันในงานวิจัยนี้ได้ทำการประกอบสร้างขึ้นเองซึ่งมีส่วนประกอบด้วยดังนี้

1. ถังอัดความดัน
2. เกจสำหรับวัดความดัน
3. ท่อจ่ายแรงดัน ไปยังถังอัดความดัน
4. อุปกรณ์ยึดจับและจับสัญญาณเช่นเซอร์วัดความดัน



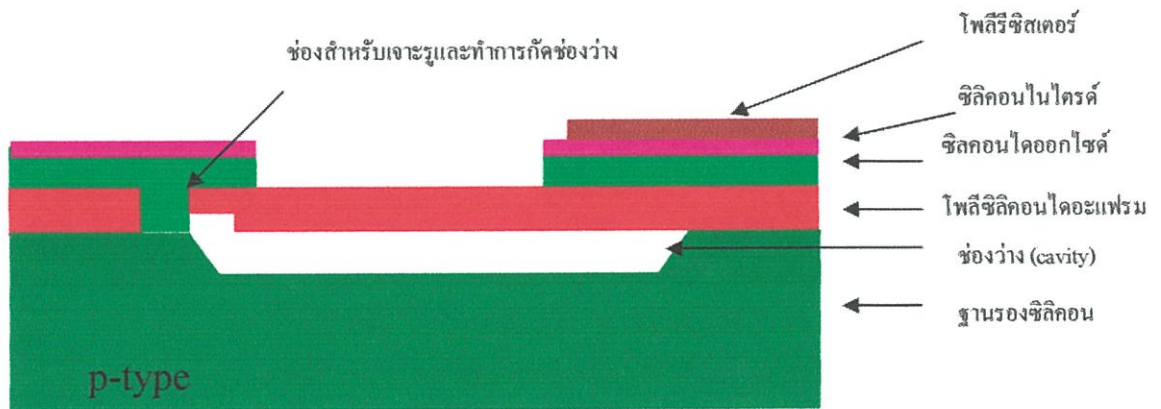
รูปที่ 3.7 ส่วนประกอบของอุปกรณ์วัดแรงดัน

บทที่ 4

โครงสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดันและการออกแบบการทดลอง

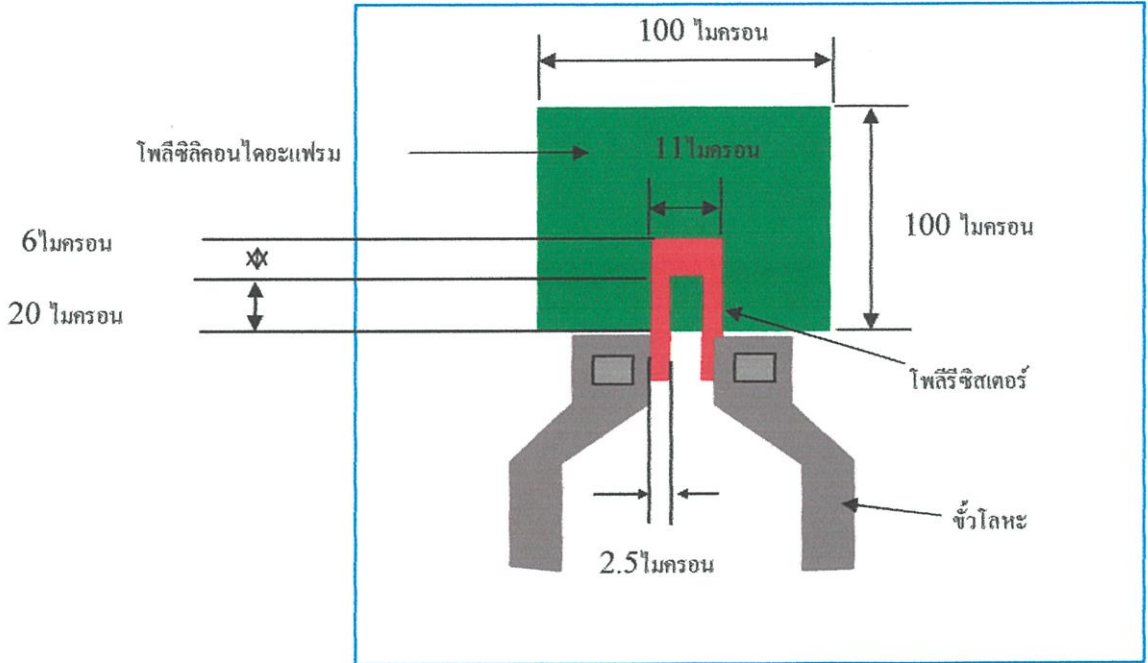
4.1 โครงสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดันที่ใช้ในงานวิจัย

ฟิล์ม โพลีซิลิคอนที่ถูกสร้างขึ้นถูกนำมาใช้เป็นไดอะแฟรมบนฐานรองซิลิคอน ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน สำหรับโครงสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดันในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นโครงสร้างแบบเชิงผิว[20] โดยแสดงถึงภาพตัดขวางของไดอะแฟรมและ โพลีรีซิสเตอร์ สำหรับในงานวิจัยนี้ได้กำหนดรายละเอียดของอุปกรณ์ดังนี้คือ โพลีซิลิคอน ไดอะแฟรมถูกสร้างบนฐานรองซิลิคอนที่มีความหนา 1.5 ไมครอน ซึ่งระหว่างรอยต่อโพลีซิลิคอน ไดอะแฟรมกับฐานรองซิลิคอนมีช่องว่าง (cavity) หนา 1.4 ไมครอน และมีซิลิคอนไดออกไซด์หนา 7,500 อังสตรอม และซิลิคอนไนไตรด์หนา 700 อังสตรอม ทำหน้าที่เป็นฉนวนกันระหว่างชั้นฟิล์มโพลีรีซิสเตอร์กับที่ด้านบนโพลีซิลิคอน ไดอะแฟรม ชั้นโพลีรีซิสเตอร์ที่สร้างมีความหนา 4,000 อังสตรอม ทำหน้าที่เป็นตัวต้านทานเยื่อไซริซิฟที่ป



รูปที่ 4.1 โครงสร้างภาพตัดขวางของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน

เมื่อพิจารณาด้านบนของไดอะแฟรมฟิล์ม โพลีซิลิคอนและ โพลีรีซิสเตอร์ ได้กำหนดขนาดของฟิล์ม โพลีซิลิคอนไว้เท่ากับ 100 ไมครอน x 100 ไมครอน และมีรายละเอียดดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ภาพโครงสร้างด้านบนของฟิล์ม โพลีซิลิคอน ไดอะแฟรมและ โพลีรีซิสเตอร์

4.2 โครงสร้างตัวต้านทานเป็ยโซรีซีฟทิปชนิดโพลีรีซิสเตอร์ในอุปกรณ์ตรวจจับความดัน

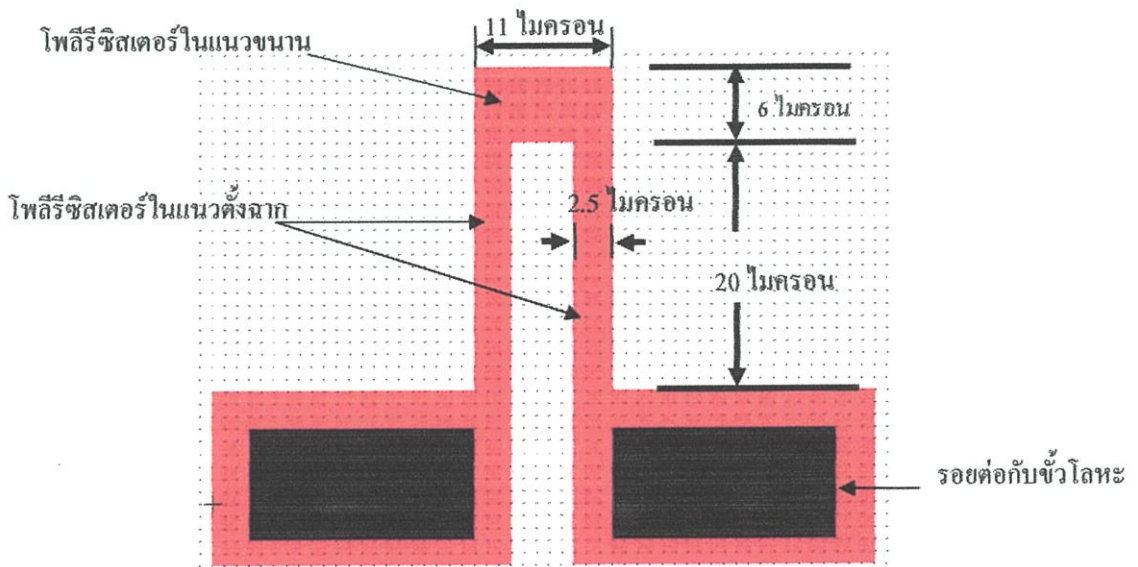
[20]

ตัวต้านทานชนิดพี บนไดอะแฟรมมีอยู่ 2 แบบ คือ ตัวต้านทานในแนวตั้งฉาก และตัวต้านทานในแนวขนาน ซึ่งในการวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาเพื่อให้ได้ค่าสภาพต้านทาน เท่ากับ 4.6×10^{-3} โอห์ม-เซนติเมตร หรือความต้านทานเชิงแผ่น เท่ากับ 115 โอห์ม/□ ที่ฟิล์มหนา 4,000 อังสตรอม โดยใช้เทคนิคการยิงฝังประจุ ซึ่งรายละเอียดแสดงไว้ในบทที่ 5 เราสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานเริ่มต้นได้ดังสมการที่ 4.1

$$R = \rho \frac{l}{wt} \quad (4.1)$$

- เมื่อ R คือ ค่าความต้านทาน (โอห์ม)
 ρ คือ สภาพต้านทาน (โอห์ม-เซนติเมตร)
 l คือ ความยาวของตัวต้านทาน (ไมครอน)
 w คือ ความกว้างของตัวต้านทาน (ไมครอน)
 t คือ ความหนาของโพลีซิลิไซด์ (ไมครอน)

ผลจากการจำลองในงานวิจัยที่เอกสารอ้างอิง[20] ได้แสดงให้เห็นว่า ระยะที่การเปลี่ยนแปลงความเค้นสูงสุด คือความยาว 15-20 ไมครอน เราจึงออกแบบให้ตัวโพลีซิลิไซด์ในแนวตั้งฉากและแนวขนานต่อกันเป็นรูปตัวยู โดยขนาดตัวโพลีซิลิไซด์ในแนวตั้งฉากมี ความยาว 20 ไมครอน กว้าง 2.5 ไมครอน และหนา 4,000 อังสตรอม และขนาด ตัวโพลีซิลิไซด์ในแนวขนาน ความยาว 6 ไมครอน กว้าง 11 ไมครอน และหนา 4,000 อังสตรอม ดังรูปที่ 4.3

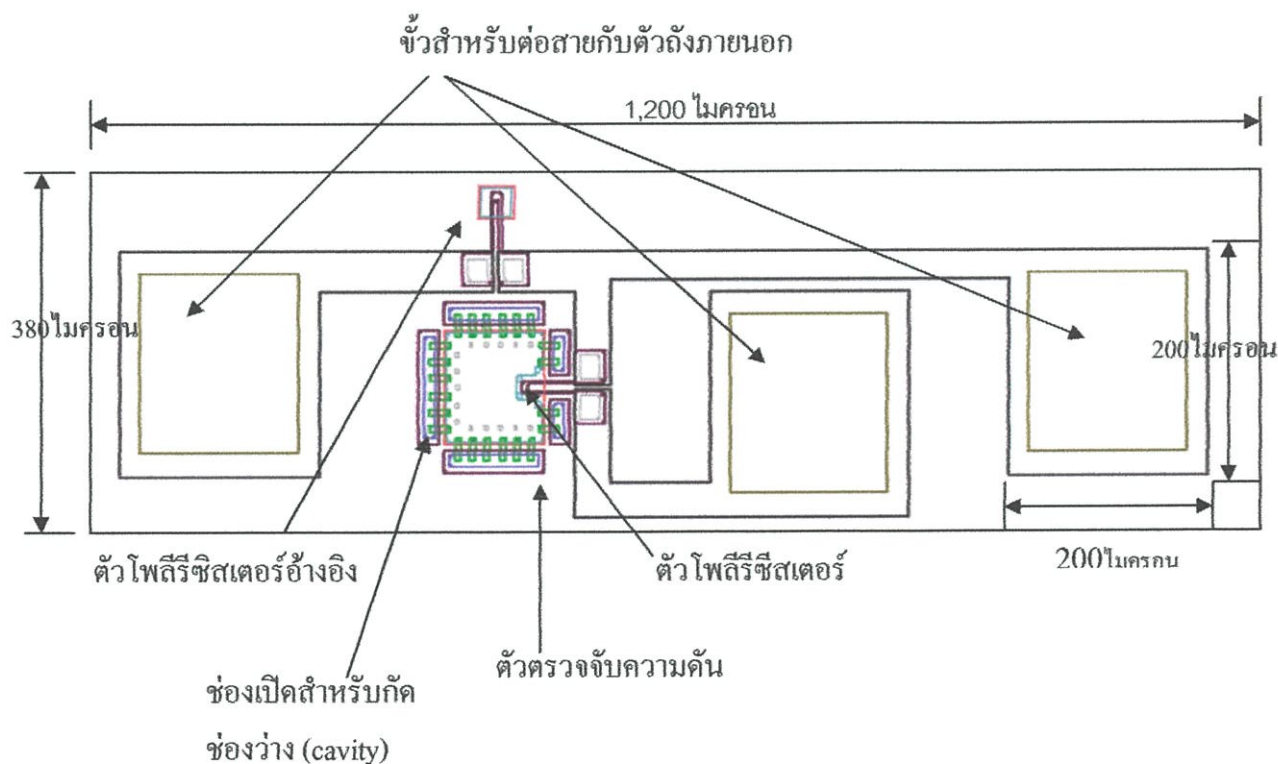


รูปที่ 4.3 ขนาด โครงสร้าง โพลีซิลิไซด์

จากสมการ 4.1 สามารถคำนวณหาความต้านทานของโพลีซิลิไซด์รวมได้ เท่ากับผลรวมของความต้านทานโพลีซิลิไซด์ในแนวขนานกับความต้านทานโพลีซิลิไซด์ในแนวตั้งฉาก เท่ากับ 1902 โอห์ม

4.3 การออกแบบลวดลายตัวตรวจจับความดันแบบเป็ยโซรีซีฟทีป

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบตัวตรวจจับความดันดังรูปที่ 4.4 ซึ่งประกอบด้วยตัวตรวจจับความดัน ขนาดไดอะแฟรม 100 ไมครอน x 100 ไมครอน ขนาดตัวโพลิรีซีสเตอร์ในแนวตั้งจากเท่ากับ ความยาว 20 ไมครอน กว้าง 2.5 ไมครอน และขนาด ตัวโพลิรีซีสเตอร์ในแนวนอน ความยาว 6 ไมครอน กว้าง 11 ไมครอนต่อกันเป็นรูปตัวยู ตามหัวข้อ 4.2 ตัวโพลิรีซีสเตอร์อ้างอิงอยู่บนไดอะแฟรมขนาด 36 ไมครอน x 30 ไมครอน โดยไม่มีช่องว่าง (cavity) ไว้สำหรับอ้างอิงความดันทานในวงจร ช่องเปิดสำหรับกักช่องว่างมีขนาด 5 ไมครอน x 20 ไมครอนจำนวน 22 ตัว และตัวสุดท้าย คือ ขั้ว สำหรับต่อสายกับตัวถังภายนอกมีขนาด 200 ไมครอน x 200 ไมครอน



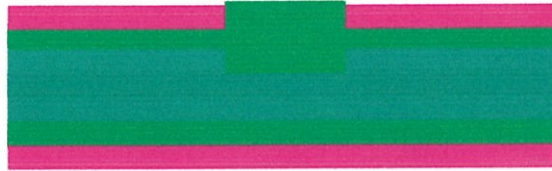
รูปที่ 4.4 ลักษณะต้นแบบตัวตรวจจับความดันในงานวิจัยนี้

4.4 ลำดับการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดัน[21]

การสร้างตัวตรวจจับความดันในงานวิจัยนี้ มีขั้นตอนการสร้างแบบงานวิจัย [21] แสดงดังรูปที่ 4.5



(ก)– แผ่นซิลิคอนชนิดพี



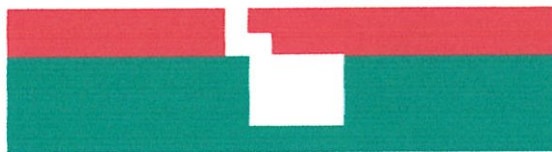
(ข) – สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และซิลิคอนไนไตรด์แล้วเปิดช่องซิลิคอนไนไตรด์ หลังจากนั้นทำการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์



(ค) – ทำการกัดซิลิคอนไนไตรด์ และซิลิคอนไดออกไซด์ ด้วยวิธี Dry etching







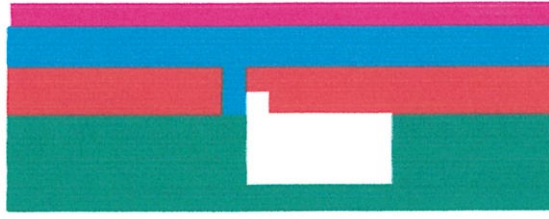
(ง) – ทำการสร้างซิลิคอนไดออกไซด์และทำการกัดซิลิคอนไดออกไซด์ได้เป็นลวดลาย



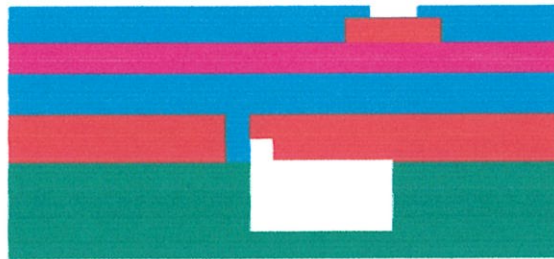
(จ) - ทำการปลูกโพลีซิลิคอน และ กัดเปิดช่องแล้วทำการกัดซิลิคอนไดออกไซด์
รูปที่ 4.5 (ก)- (ข) ลำดับกระบวนการสร้างตัวตรวจจับความดันความดันแบบเปีย โซริซีฟที่ป

สัญลักษณ์สีคือ

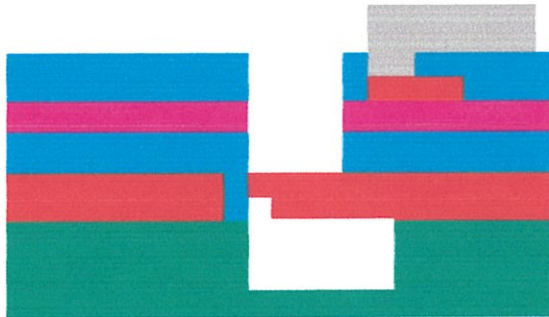
			
ซิลิคอนชนิด พี	ฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์	ฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์	ฟิล์มโพลีซิลิคอน



(ฉ) – ทำการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้วย LPCVD เพื่อปิดช่องรูแล้วทำการสร้างชั้นซิลิคอนไนไตรด์








(ช) - ทำการสร้างโพลีซิลิคอนและทำการเจือสาร โพลีซิลิคอนด้วยเทคนิคการยิงฝั่ประจุ และทำการกัดชั้น โพลีซิลิคอนเป็นลวดลาย แล้วทำการสร้างชั้น ซิลิคอนไดออกไซด์และทำการกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ออกเป็นช่อง



(ซ) – ทำการสร้างชั้น โลหะอะลูมิเนียมและกัดเป็นลวดลายแล้วทำการกัดซิลิคอนไดออกไซด์และทำการกัดซิลิคอนไนไตรด์

รูปที่ 4.5 (ก)- (ซ) ลำดับกระบวนการสร้างตัวตรวจจับความดันความดันแบบเปียก โซริซีฟทีป (ต่อ)

สัญลักษณ์สีคือ

				
ซิลิคอนชนิด พี	ฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์	ฟิล์มโพลีซิลิคอน	ซิลิคอนไดออกไซด์	ฟิล์มโลหะอะลูมิเนียม

4.5 การออกแบบการทดลองสร้างโพลีสีสเตอร์

ในการสร้างโพลีสีสเตอร์มีกระบวนการสร้างดังนี้



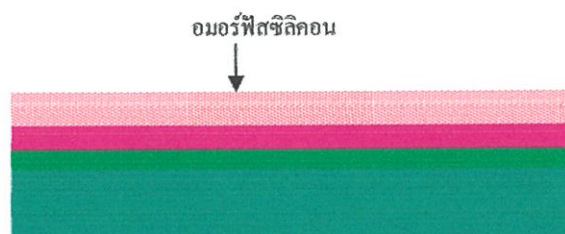
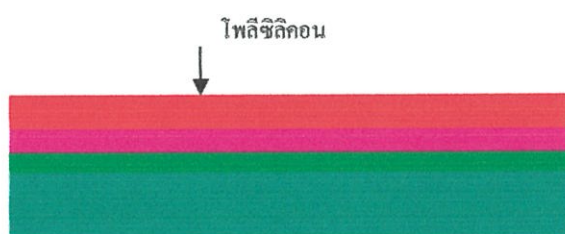
(ก) - แผ่นซิลิคอนชนิดพี



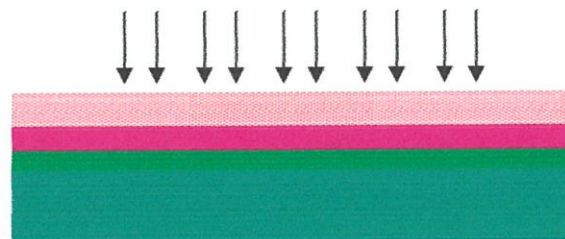
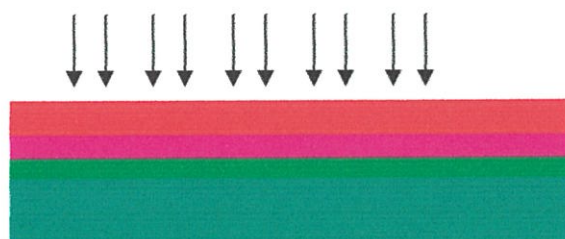
(ข) - ทำการสร้างซิลิคอนไดออกไซด์



(ค) - ทำการสร้างชั้นซิลิคอนไนไตรด์





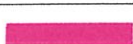


(ง) - ทำการสร้างชั้นฟิล์มโพลีซิลิคอนและ อมอร์ฟัสซิลิคอน



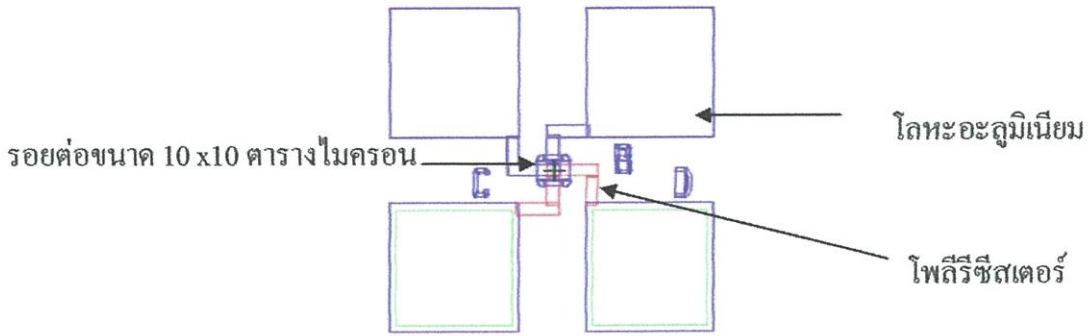
(จ) - ทำการยิงฝัประจุและ แอนนัล

รูปที่ 4.6 (ก)- (จ) ลำดับกระบวนการสร้างโพลีสีสเตอร์

สัญลักษณ์สีคือ

				
ซิลิคอนชนิด พี	ฟิล์มซิลิคอน ไดออกไซด์	ฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์	ฟิล์มโพลีซิลิคอน	ฟิล์มอมอร์ฟัสซิลิคอน

4.6 การออกแบบการทดลองสร้างรอยสัมผัสระหว่างโพลีซิลิคอนที่รับการเชื่อมกับโลหะ



รูปที่ 4.7 โครงสร้างมาสก์ (CBK)

ในการสร้างรอยสัมผัสระหว่างโพลีซิลิคอนที่รับการเชื่อมกับโลหะ โดยใช้โครงสร้าง CBK เพื่อศึกษาค่า R_c ดังลวดลายดังรูปที่ 4.7 มีกระบวนการสร้างดังนี้



(ก) – แผ่นซิลิคอนชนิดพี ที่ได้รับการสร้าง ซิลิคอนไดออกไซด์ ซิลิคอนไนไตรด์ และ โพลีซิลิไซด์เตอร์ ตามลำดับ



(ข) – ทำการสร้างมาสก์บนโพลีซิลิไซด์เตอร์แล้วทำการกัดโพลีซิลิไซด์เตอร์ด้วย กระบวนการกัดแห้ง

รูปที่ 4.8 (ก)- (ข) ลำดับกระบวนการสร้าง โครงสร้าง CBK

สัญลักษณ์สีคือ

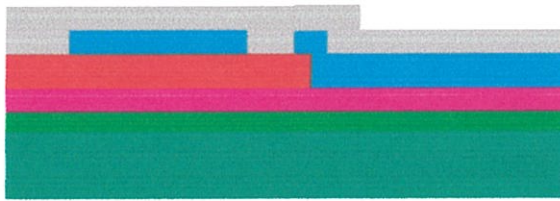
ซิลิคอนชนิด พี	ฟิล์มซิลิคอน ไดออกไซด์	ฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์	น้ำยาโฟโตเรซิสต์



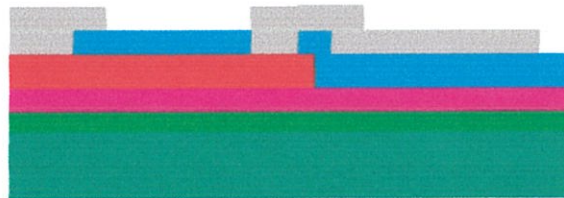
(ค) – ทำการล่อน้ำยาโพไตรซีสออก แล้วทำการสร้างชั้นชิลิคอน ไดออกไซด์



(ง) – ทำการสร้างมาส์กบนชั้นชิลิคอน ไดออกไซด์แล้วทำการกัคชิลิคอน ไดออกไซด์ออกเป็นช่อง









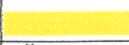
(จ) – ทำการล่อน้ำยาโพไตรซีสออก แล้วทำการสร้างชั้น โลหะอะลูมิเนียม



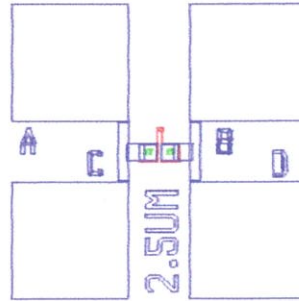
(ฉ) – ทำการกัคชั้น โลหะอะลูมิเนียมออกเป็นลวดลาย CBK

รูปที่ 4.8 (ก)- (ฉ) ลำดับกระบวนการสร้างโครงสร้าง CBK(ต่อ)

สัญลักษณ์สีคือ

						
ชิลิคอนชนิด พี	ฟิล์มชิลิคอน ไดออกไซด์	ฟิล์มชิลิคอน ไนไตรต์	ฟิล์มโพลิชิลิคอน	ชิลิคอนไดออกไซด์	ฟิล์มโลหะอะลูมิเนียม	น้ำยาโพไตรซีส

4.7 การออกแบบการทดลองสร้างโครงสร้างสำหรับวัด ที่ซีอาร์ ของโพลิรีซีสเตอร์



รูปที่ 4.9 โครงสร้างสำหรับวัดที่ซีอาร์ของโพลิรีซีสเตอร์

ในการสร้างโครงสร้างสำหรับวัดที่ซีอาร์ของโพลิรีซีสเตอร์ใช้โครงสร้าง ลวดลายดังรูป4.9 โดยที่มีขนาดของโพลิรีซีสเตอร์ ตามหัวข้อ 4.2 และมีกระบวนการสร้างดังนี้




(ก) – แผ่นซิลิคอนชนิดพี ที่ได้รับการสร้าง ซิลิคอนไดออกไซด์ ซิลิคอนไนไตรด์ และ โพลิรีซีสเตอร์ ตามลำดับ



(ข) – ทำการสร้างมาสก์บน โพลิรีซีสเตอร์แล้วทำการกัด โพลิรีซีสเตอร์ด้วย กระบวนการกัดแห้ง

รูปที่ 4.10 (ก)- (ง) ลำดับกระบวนการสร้างโครงสร้าง สำหรับวัด ที่ซีอาร์ ของโพลิรีซีสเตอร์

สัญลักษณ์สีคือ

				
ซิลิคอน ชนิด พี	ฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์	ฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์	ฟิล์มโพลิซิลิคอน	น้ำยาโฟโตรีซิส



(ค) – ทำการลอกน้ำยาโพโตรีซีสออก แล้วทำการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์



(ง) – ทำการสร้างมาส์กบนชั้นซิลิคอนไดออกไซด์แล้วทำการเจาะซิลิคอนไดออกไซด์ออกเป็นช่อง








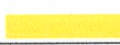
(จ) – ทำการลอกน้ำยาโพโตรีซีสออก แล้วทำการสร้างชั้น โลหะอะลูมิเนียม



(ฉ) – ทำการกัดชั้น โลหะอะลูมิเนียมออกเป็นลวดลาย สำหรับวัดที่ชี้อาร์ของโพลิรีซีสเตอร์

รูปที่ 4.10 (ก)- (ฉ) ลำดับกระบวนการสร้าง โครงสร้าง สำหรับวัดที่ชี้อาร์ของโพลิรีซีสเตอร์(ต่อ)

สัญลักษณ์สีคือ

					
ซิลิคอนชนิดที	ฟิล์มซิลิคอน ไดออกไซด์	ฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์	ฟิล์มโพลิซิลิคอน	ฟิล์มโลหะอะลูมิเนียม	น้ำยาโพโตรีซีส

บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองในการหาเงื่อนไขการสร้างและการปรับลดค่าความต้านทานของโพลีซิลิไซด์เตอร์ ซึ่งมีวิธีการหลายประการ คือ การสร้างโพลีซิลิไซด์เตอร์ จากฟิล์ม Poly-Si และ a-Si, การเพิ่มปริมาณสารเจือ, การเพิ่มการจ่ายก๊าซออกซิเจน (O_2) ในการแอนนัล และ การสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของโพลีซิลิไซด์เตอร์กับความต้านทานรอยสัมผัสระหว่างผิวโพลีซิลิไซด์เตอร์ที่ได้รับการเจือสารกับโลหะ (contact resistance: R_c) โดยใช้โครงสร้าง CBK และนำชิ้นงานไปวัดหาค่า TCR เพื่อพิสูจน์ผลของค่าความต้านทานของโพลีซิลิไซด์เตอร์ที่มีผลต่ออุณหภูมิและในสุดท้ายนำฟิล์มโพลีซิลิไซด์เตอร์ไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ตรวจจับความดัน

การทดลองทั้งหมดในบทนี้ ในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานจะต้องทำในห้องสะอาดเท่านั้น ส่วนเนื้อหาในหัวข้อ 5.1 เป็นการหาเงื่อนไขการสร้างฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ในหัวข้อ 5.2, 5.3, 5.4 และ 5.5 เป็นเทคนิคการปรับลดค่าความต้านทานของโพลีซิลิไซด์เตอร์ในหัวข้อ 5.6 การทดลองหาความต้านทานของโพลีซิลิไซด์เตอร์กับ R_c ในหัวข้อ 5.7 เป็นการทดลองการหาค่า TCR และในหัวข้อ 5.8 เป็นหัวข้อสุดท้ายผลของการนำฟิล์มโพลีซิลิไซด์เตอร์ไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ตรวจจับความดัน การทดลองทั้งหมดมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 การเตรียมชิ้นงาน ฟิล์ม Poly-Si และ a-Si

การทดลองในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการทราบเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการสร้าง Poly-Si และ a-Si

5.1.1 การหาเงื่อนไขการปลูกฟิล์ม Poly-Si และ a-Si โดยการปรับอัตราการจ่ายก๊าซ SiH_4 , นำแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ ขนาด 6 นิ้ว ชนิดเอ็น (100) ที่มีสภาพความต้านทาน $6 \Omega - cm$ แล้วนำไปทำความสะอาดด้วยเงื่อนไขตามตาราง 5.1 แล้วทำการทดลองหาเงื่อนไขการปลูกฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ด้วยระบบ LPCVD

ตารางที่ 5.1 เงื่อนไขการทำความสะอาดแผ่นเวเฟอร์

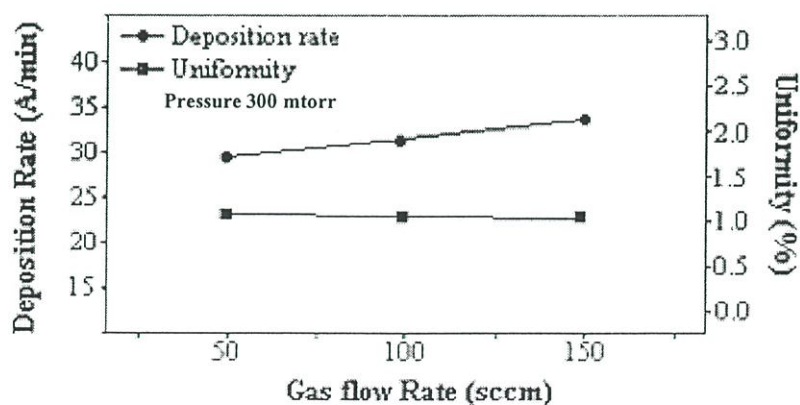
ขั้นตอนการล้าง	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)
PIRANHA (H ₂ O ₂ : H ₂ SO ₄ 1:3)	5	120
DI	10	22
HF	1	25
DI	5	22
เป่าให้แห้ง	10	22

จากนั้นทำการทดลองปลูกฟิล์ม Poly-Si และ a-Si โดยการปรับอัตราการจ่ายก๊าซ SiH₄ ด้วยเงื่อนไขตามตารางที่ 5.2

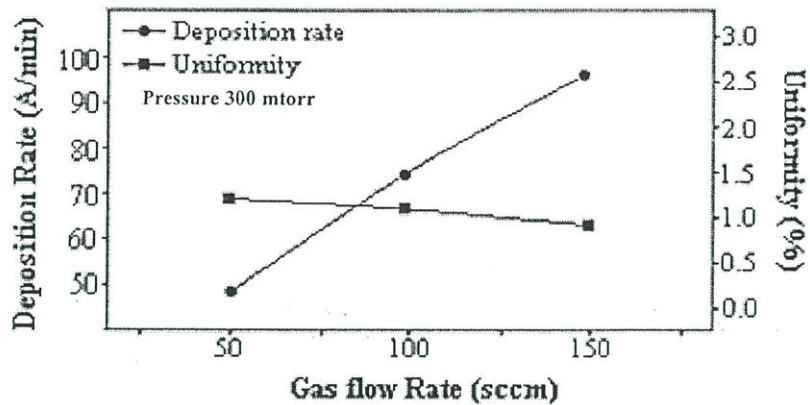
ตารางที่ 5.2 เงื่อนไขการเตรียมฟิล์ม Poly-Si และ a-Si โดยการปรับอัตราการจ่ายก๊าซ SiH₄ ด้วย LPCVD

Film type	a-Si	Poly-Si
SiH ₄ (sccm)	50, 100, 150	50, 100, 150
Temperature (°C)	560	620
Pressure (mtorr)	300	300

จากการทดลองการปลูกฟิล์มด้วยเทคนิค LPCVD ทำให้ทราบอัตราการเคลือบฟิล์ม (Å/min) และความสม่ำเสมอ (uniformity) (%) ที่มีผลต่ออัตราการจ่ายก๊าซดังรูปที่ 5.1 และรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบฟิล์ม a-Si กับ อัตราการจ่ายก๊าซ SiH₄ และ uniformity



รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบฟิล์ม Poly-Si กับ อัตราการจ่ายก๊าซ SiH_4 และ uniformity

โดยค่า uniformity (%) หาได้จากสมการ 5.1 [22]

$$\text{Uniformity}(\%) = \frac{\text{Data}(\text{max}) - \text{Data}(\text{min})}{\text{Data}(\text{max}) + \text{Data}(\text{min})} \times 100\% \quad (5.1)$$

โดยที่ Data(max) คือ ข้อมูลที่มีค่าสูงสุด

Data(min) คือ ข้อมูลที่มีค่าต่ำสุด

จากผลการทดลองรูปที่ 5.1 แสดง แกน y ด้านซ้ายเป็นอัตราการเคลือบฟิล์มของ a-Si และ y ด้านขวาเป็น uniformity และแกน x เป็นอัตราการจ่ายก๊าซ สำหรับการปลูกฟิล์ม a-Si ซึ่งแสดงการเพิ่มอัตราการจ่ายก๊าซ 50, 100 และ 150 sccm ได้อัตราการเคลือบฟิล์มก็มีค่า 29, 32 และ 34 Å/min ตามลำดับ และมีค่า uniformity 1.25, 1.2 และ 1.1 % ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าที่อัตราการจ่ายก๊าซที่ 150 sccm เป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุดสำหรับการปลูกฟิล์ม a-Si เพราะว่าได้อัตราการเคลือบฟิล์มสูงสุดและ uniformity ต่ำสุด (แสดงว่ามีความสม่ำเสมอสูงสุด)

จากผลการทดลองรูปที่ 5.2 แสดง แกน y ด้านซ้ายเป็นอัตราการเคลือบฟิล์มของ poly-Si และ y ด้านขวาเป็น uniformity และแกน x เป็นอัตราการจ่ายก๊าซ สำหรับการปลูกฟิล์ม poly-Si ซึ่งแสดงการเพิ่ม อัตราการจ่ายก๊าซ 50, 100 และ 150 sccm ได้อัตราการเคลือบฟิล์มก็มีค่า 46, 73 และ 94 Å/min ตามลำดับ และมีค่า uniformity 1.28, 1.1 และ 0.9% ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าที่อัตราการจ่ายก๊าซที่ 150 sccm เป็นเงื่อนไขสำหรับการ ปลูกฟิล์ม Poly-Si ที่ดีและเหมาะสมเพราะว่าได้อัตราการเคลือบฟิล์มสูงสุดและ uniformity ต่ำสุด

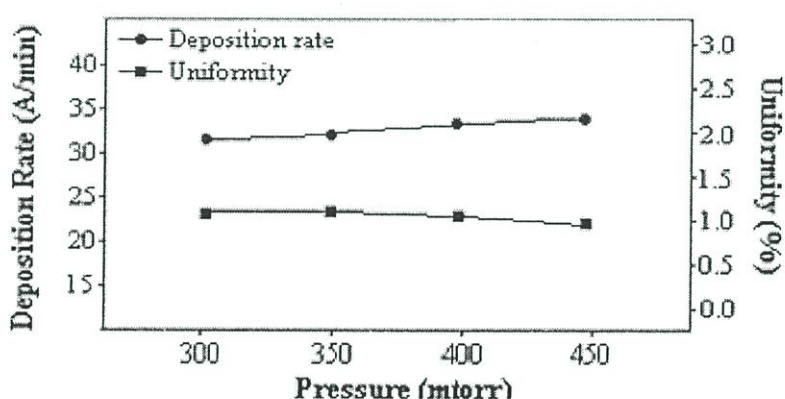
ดังนั้นงานวิจัยนี้เลือกเงื่อนไขของอัตราการจ่ายก๊าซ SiH_4 ที่ 150 sccm สำหรับการปลูกฟิล์ม Poly-Si และ a-Si

5.1.2 การหาเงื่อนไขการปลูกฟิล์ม Poly-Si และ a-Si โดยการปรับความดันภายในท่อควอทซ์ นอกจากเงื่อนไขของอัตราการจ่ายก๊าซ SiH_4 ที่มีอิทธิพลต่อการปลูกฟิล์ม Poly-Si และ a-Si แล้วเงื่อนไขของความดันภายในท่อควอทซ์ก็มีผลเช่นกัน ดังนั้นจึงทำการทดลองปลูกฟิล์ม Poly-Si และ a-Si โดยการปรับความดันภายในท่อ ควอทซ์ ด้วยเงื่อนไขตามตารางที่ 5.3

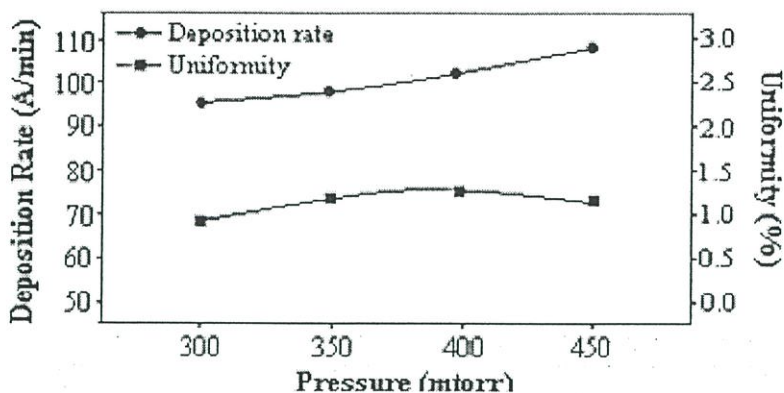
ตารางที่ 5.3 เงื่อนไขการเตรียมฟิล์ม Poly-Si และ a-Si โดยการปรับความดัน ด้วย LPCVD

Film type	a-Si	Poly-Si
SiH_4 (sccm)	150	150
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	560	620
Pressure (mtorr)	300, 350, 400, 450	300, 350, 400, 450

จากการทดลองการปลูกฟิล์มด้วยเทคนิค LPCVD ทำให้ทราบอัตราการเคลือบฟิล์ม ($\text{\AA}/\text{min}$) และ ความสม่ำเสมอ (uniformity) (%) ที่มีผลต่อความดันดังรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบฟิล์ม a-Si กับ ความดันและ uniformity



รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบฟิล์ม Poly-Si กับ ความดัน และ uniformity

จากผลการทดลองรูปที่ 5.3 แสดงแกน y ด้านซ้ายเป็นอัตราการเคลือบฟิล์มของ a-Si และ y ด้านขวาเป็น uniformity และแกน x เป็นความดันภายในท่อควอทซ์ สำหรับการปลูกฟิล์ม a-Si ซึ่งแสดงการเพิ่ม ความดันภายในท่อควอทซ์ 300, 350, 400 และ 450 mtor ได้อัตราการเคลือบฟิล์มที่มีค่า 32, 32.5, 34 และ 34.5 Å/min ตามลำดับ และมีค่า uniformity 1.1, 1.1, 1 และ 0.95 % ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าที่ความดันภายในท่อควอทซ์ ที่ 450 mtor เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการปลูกฟิล์ม a-Si เพราะว่าได้อัตราการเคลือบฟิล์มสูงสุด และ uniformity ต่ำสุด (แสดงว่ามีความสม่ำเสมอสูงสุด)

จากผลการทดลองรูปที่ 5.4 แสดงแกน y ด้านซ้ายเป็นอัตราการเคลือบฟิล์มของ poly-Si และ y ด้านขวาเป็น uniformity และแกน x เป็นความดันภายในท่อควอทซ์ สำหรับการปลูกฟิล์ม poly-Si ซึ่งแสดงการเพิ่ม ความดันภายในท่อควอทซ์ 300, 350, 400 และ 450 mtor ได้อัตราการเคลือบฟิล์มที่มีค่า 95, 97, 102 และ 107 Å/min ตามลำดับ และมีค่า uniformity 0.9, 1.2, 1.3 และ 1 % ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าที่ความดันภายในท่อควอทซ์ ที่ 450 mtor เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสม สำหรับการปลูกฟิล์ม poly-Si เพราะว่าได้อัตราการเคลือบฟิล์มสูงสุด และ uniformity มีค่าต่ำ

ดังนั้นงานวิจัยนี้เลือกเงื่อนไขความดันภายในท่อควอทซ์ ที่ 450 mtor สำหรับการปลูกฟิล์ม Poly-Si และ a-Si

5.1.3 การทดสอบชิ้นงาน ฟิล์ม Poly-Si และ a-Si

เมื่อได้เงื่อนไขการปลูกฟิล์ม Poly-Si และ a-Si คือ อัตราการจ่ายก๊าซ SiH_4 ที่ 150 sccm ความดันภายในท่อควอทซ์ที่ 450 mtor แล้วหลังจากนั้นได้นำไปทำปลูกฟิล์มที่เงื่อนไขตามตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 เงื่อนไขการเตรียมฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ด้วย LPCVD ในงานวิจัยนี้

Film type	a - Si	Poly - Si
SiH ₄ (sccm)	150	150
Temperature (°C)	560	620
Pressure (mtorr)	450	450

หลังจากนั้นได้ทำการทดสอบฟิล์มดังนี้

- ผลการวัดด้วยเครื่องอิลลิปโซมิเตอร์

ได้ทำการวัดความหนา ค่าดัชนีหักเห(n) และ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (k) ของฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ด้วยเครื่องอิลลิปโซมิเตอร์และแสดงผลในตารางที่ 5.5

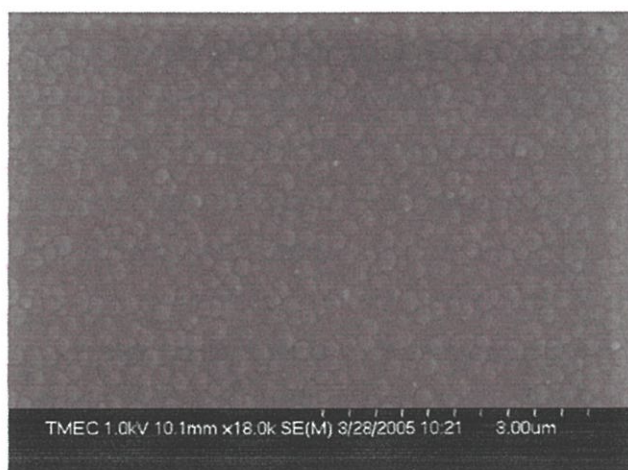
ตารางที่ 5.5 ผลการวัดคุณสมบัติของฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ด้วยเครื่องอิลลิปโซมิเตอร์

ชนิด ฟิล์ม	ความหนา (Å)	ดัชนีหักเห (n)	ค่าสัมประสิทธิ์การ ดูดกลืนแสง (k)	Uniformity (%)
Poly Si	4,040	3.9	0.058	1
a-Si	4,019	4.5	0.232	0.95

จากผลการวัดคุณสมบัติของฟิล์ม[23] ดังในตารางที่ 5.4 พบว่า ฟิล์ม Poly-Si ได้ค่าดัชนีหักเห (n) เท่ากับ 3.9 และมีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (k) เท่ากับ 0.058 ซึ่งตรงคุณสมบัติมาตรฐานของ Poly-Si สำหรับฟิล์ม a-Si ได้ค่าดัชนีหักเห (n) เท่ากับ 4.5 และมีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (k) เท่ากับ 0.232 ซึ่งตรงกับคุณสมบัติมาตรฐานของ a-Si สำหรับรายละเอียดของคุณสมบัติมาตรฐานของฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ให้พิจารณาในภาคผนวก ข และได้นำ a-Si ไปทำการวัด XRD (X-Ray Diffractometer) เพื่อดูว่ามีผลึกหรือไม่ และจากผลการวัดปรากฏว่าไม่มีผลึกซึ่งแสดงในภาคผนวก ค ดังนั้นผลการวัดนี้สามารถยืนยันฟิล์มที่สร้างขึ้นมีคุณสมบัติฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ถูกต้องตามมาตรฐานที่กำหนดไว้

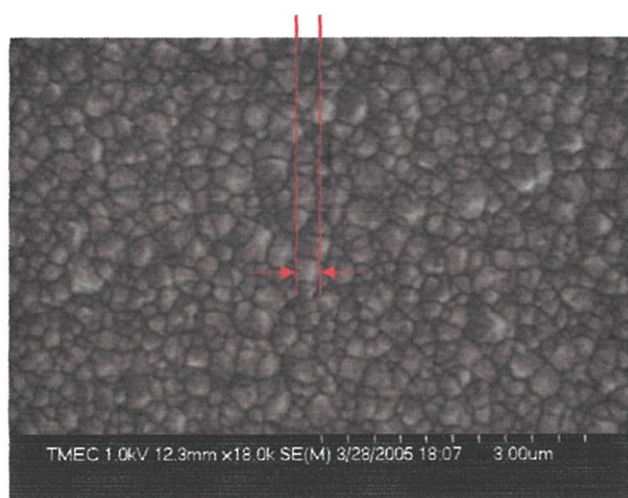
- ผลการวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ผลการวัดผิวของชั้นฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังรูปที่ 5.5



(ก)

0.3 ไมครอน



(ข)

รูปที่ 5.5 (ก) รูปผิวหน้าฟิล์มของ a-Si (ข) รูปผิวหน้าฟิล์ม poly-Si

ผลการวัดผิวหน้าของชั้นฟิล์ม a-Si ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะเห็นว่า มีลักษณะค่อนข้างเรียบและมีตำแหน่งเป็นจุดกลมทั่วแผ่นคล้ายขนาดเกรน (grain size) แต่ไม่ใช่ เพราะจุดกลมแต่ละจุดอยู่ในตำแหน่งห่างกัน

ผลการวัดผิวหน้าของชั้นฟิล์ม Poly-Si ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะเห็นว่า มีลักษณะขรุขระและมีขนาดเกรนอยู่ทั่วแผ่น โดยค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาด 0.3 ไมครอน

5.2 ศึกษาคุณสมบัติของฟิล์ม Poly-Si และ a-Si หลังกระบวนการยิงฝึงประจุ [24, 25]

การทดลองในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความต้านทานเชิงแผ่นและโครงสร้างที่ผิวของ Poly-Si และ a-Si

5.2.1 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการศึกษาคุณสมบัติฟิล์ม Poly-Si และ a-Si หลังกระบวนการยิงฝึงประจุ

นำแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ ขนาด 6 นิ้ว ชนิดเอ็น (100) ที่มีสภาพความต้านทาน $6 \Omega - \text{cm}$ แล้วนำไปทำความสะอาดด้วยเงื่อนไขตามตาราง 5.1 แล้วทำการปลูกฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ที่ความหนา $4,000 \text{ \AA}$ ด้วยระบบ LPCVD ด้วยเงื่อนไขจากการทดลองใน 5.1 จากนั้นนำแผ่นฟิล์มทั้งสองชนิดไปทำการวัดความต้านทานเชิงแผ่นด้วยเครื่องโพร์พอยท์โพรบ หลังจากนั้นทำการทดลองดังนี้

- นำแผ่นฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ไปทำการยิงฝึงประจุโบรอน ($_{11}\text{B}^+$) พลังงาน 50 keV ที่ปริมาณสารเจือ (Dose) $1.0 \times 10^{16} \text{ ion/cm}^2$
- นำแผ่นฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ไปแอนนัลด้วยเตาที่อุณหภูมิ $800 \text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 15 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน (N_2) ที่อัตราการไหลเท่ากับ 10 ลิตรต่อนาที

5.2.2 ผลการวัดความต้านทานเชิงแผ่นด้วยเครื่องโพร์พอยท์โพรบ

ได้ทำการวัดความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ด้วยเครื่องโพร์พอยท์โพรบ และแสดงผลในตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 ผลการทดลองการวัดความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ด้วยเครื่องโพร์พอยท์โพรบก่อนและหลังกระบวนการยิงฝึงประจุ

ชนิดฟิล์ม	ก่อนทำการยิงฝึงประจุและแอนนัล	หลังทำการยิงฝึงประจุและแอนนัล
	ความต้านทานเชิงแผ่น(Ω/\square)	ความต้านทานเชิงแผ่น(Ω/\square)
Poly-Si	$>5 \times 10^6$	201.95
a-Si	$>5 \times 10^6$	123.75

จากผลการวัดในตาราง 5.6 พบว่าค่าความต้านเชิงแผ่นของฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ก่อนทำกระบวนการยิงฝังประจุและแอนนีสมีค่าสูงมาก ทำให้ไม่สามารถวัดได้โดยเครื่องโพรมิเท็กซ์ โพรบรุ่น Prometrix Rs-30 เพราะมีกำลังความสามารถวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่นในช่วง $5 \text{ m}\Omega/\square - 5 \text{ M}\Omega/\square$ แสดงว่าค่าความต้านทานของ ฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ก่อนทำกระบวนการยิงฝังประจุและแอนนีสมีค่ามากกว่า $5 \text{ M}\Omega/\square$ หลังจากนั้นนำฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ไปทำกระบวนการยิงฝังประจุ ที่เงื่อนไขยิงฝังประจุโบรอน ($_{11}\text{B}^+$) พลังงาน 50 keV ที่ ปริมาณสารเจือ $1.0 \times 10^{16} \text{ ion/cm}^2$ และแอนนีสที่อุณหภูมิ $800 \text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 15 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน (N_2) ที่อัตราการไหลเท่ากับ 10 ลิตรต่ออนาที แล้วนำไปวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่นพบว่าความต้านเชิงแผ่นของฟิล์ม Poly-Si มีค่า $201.95 \Omega/\square$ และความต้านเชิงแผ่นของฟิล์ม a-Si มีค่า $123.75 \Omega/\square$ จะพบว่าค่าความต้านทานเชิงแผ่นของ a-Si มีค่าต่ำกว่า Poly-Si หลังจากกระบวนการเจือสารที่ปริมาณสารเจือเดียวกัน

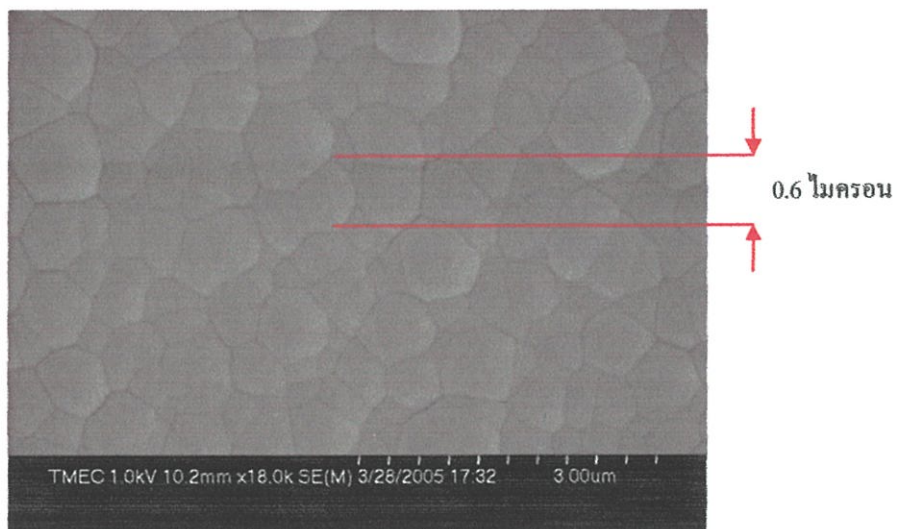
5.2.3 ผลการวัดด้วยเครื่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ผลการวัดผิวของชั้นฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดหลังการยิงฝังประจุแสดงดังรูปที่ 5.6

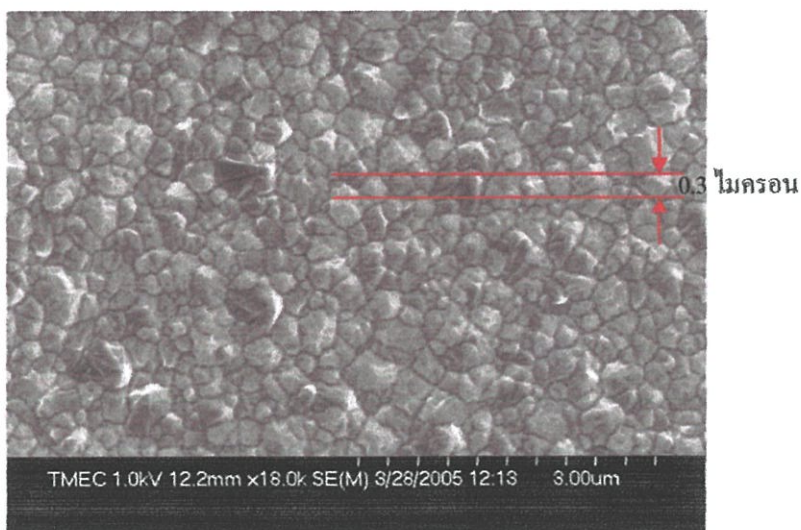
จากรูปที่ 5.6 ผลการวัดผิวหน้าของชั้นฟิล์ม a-Si ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดหลังการยิงฝังประจุ และ แอนนีส จะเห็นว่า มีลักษณะค่อนข้างเรียบและมีขนาดเกรนอยู่ทั่วแผ่น โดยค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาด 0.6 ไมครอน เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับก่อนการยิงฝังประจุและแอนนีสรูปที่ 5.5 (ก) จะเห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงจากเดิมไปมากโดยก่อนการยิงฝังประจุและแอนนีสผิวหน้าของชั้นฟิล์ม a-Si ไม่มีขนาดเกรน และหลังจากผ่านกระบวนการยิงฝังประจุและแอนนีสผิวหน้าของชั้นฟิล์ม a-Si มีขนาดเกรนที่มีค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.6 ไมครอน

ส่วนผลการวัดผิวหน้าของชั้นฟิล์ม Poly-Si ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดหลังการยิงฝังประจุ และ แอนนีส จะเห็นว่า มีลักษณะขรุขระและมีขนาดเกรนอยู่ทั่วแผ่น โดยค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาด 0.3 ไมครอน เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับก่อนการยิงฝังประจุและแอนนีสรูปที่ 5.5 (ข) จะเห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

เมื่อนำผิวหน้าของชั้นฟิล์ม a-Si และ Poly-Si หลังการยิงฝังประจุ และ แอนนีส มาเปรียบเทียบกับกันจะพบว่าขนาดเกรนของชั้นฟิล์ม a-Si ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าของชั้นฟิล์ม Poly-Si



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.6 (ก) รูปผิวหน้าฟิล์มของ a-Si หลังการยิงรังสีประจุ และ แอนนีล

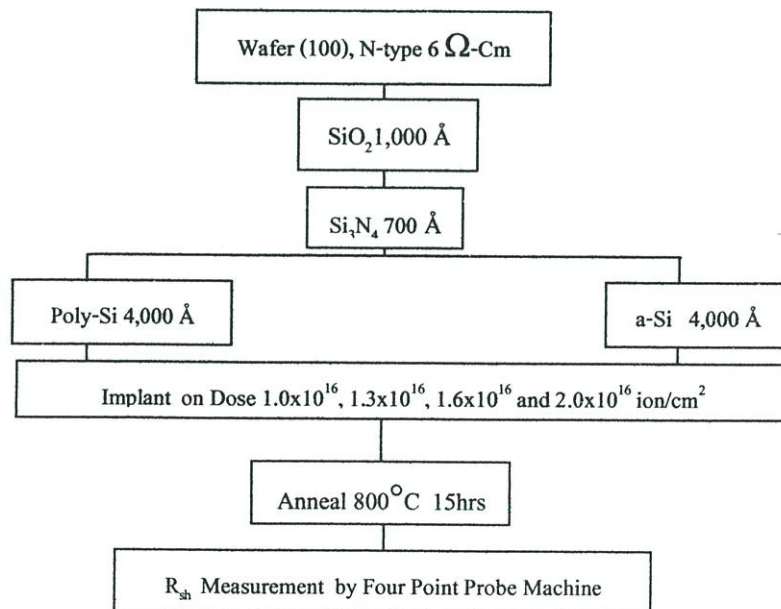
(ข) รูปผิวหน้าฟิล์มของ poly-Si หลังการยิงรังสีประจุ และ แอนนีล

5.3 ศึกษาความต้านทานของโพลีซิลิไซด์ที่สร้างจาก ฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ที่เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเจือในกระบวนการยิงฝังประจุ [25]

ในการทดลองในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการทราบความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของโพลีซิลิไซด์ที่สร้างจาก ฟิล์ม Poly-Si และ a-Si กับปริมาณสารเจือในกระบวนการยิงฝังประจุ

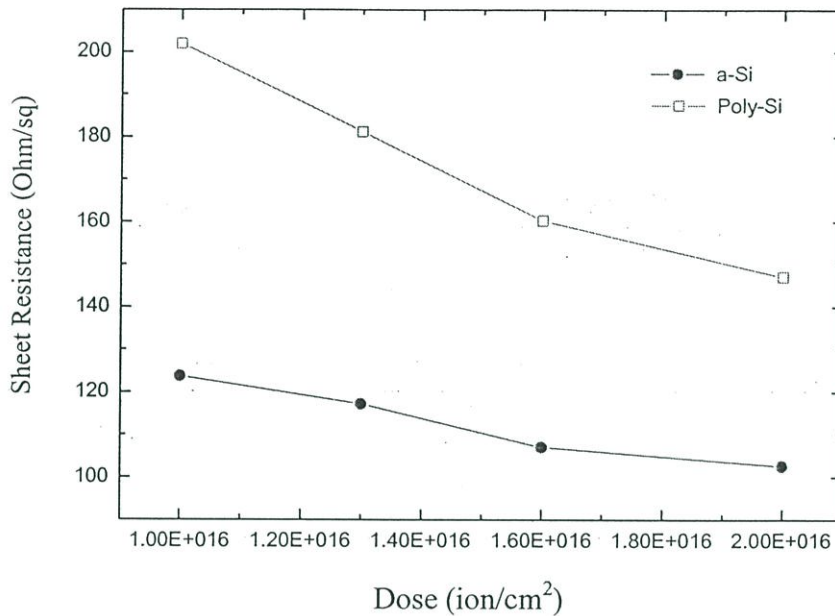
5.3.1 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการศึกษาความต้านทานของ โพลีซิลิไซด์ที่สร้างจากฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ที่เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเจือในกระบวนการยิงฝังประจุ

นำแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ ขนาด 6 นิ้ว ชนิดเอ็น (100) ที่มีสภาพความต้านทาน $6 \Omega\text{-cm}$ แล้วนำไปทำความสะอาดด้วยเงื่อนไขตามตาราง 5.1 แล้วทำการปลูกฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) หนา $1,000 \text{ \AA}$ ด้วยเตา ที่อุณหภูมิ $1,000 \text{ }^\circ\text{C}$ หลังจากนั้นทำการปลูกซิลิคอนไนไตรด์ (Si_3N_4) หนา 700 \AA ด้วยเทคนิค LPCVD ที่อุณหภูมิ $700 \text{ }^\circ\text{C}$ หลังจากนั้นทำการปลูกฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ที่ความหนา $4,000 \text{ \AA}$ ด้วยระบบ LPCVD ด้วยเงื่อนไขจากการทดลองใน 5.1 หลังจากนั้นนำแผ่นฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ไปทำการยิงฝังประจุโบรอน (B^+) พลังงาน 50 keV ที่เงื่อนไขปริมาณสารเจือดังนี้คือ 1.0×10^{16} , 1.3×10^{16} , 1.6×10^{16} และ $2.0 \times 10^{16} \text{ ion/cm}^2$ แล้วนำไปทำความสะอาดด้วยเงื่อนไขตามตาราง 5.1 หลังจากนั้นนำไปทำการแอนนัลด้วยเตาที่อุณหภูมิ $800 \text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 15 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน (N_2) ที่อัตราการไหลเท่ากับ 10 ลิตรต่อนาที หรือพิจารณาขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานอย่างง่ายจากรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 ขั้นตอนการทดลองในหัวข้อ 5.3

5.3.2 ผลการวัดความต้านทานเชิงแผ่นด้วยเครื่องโพร์พอยท์โพรบ



รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงแผ่นกับปริมาณสารเจือของฟิล์ม a-Si กับ Poly-Si

จากผลการทดลองรูปที่ 5.8 แสดง แกน y เป็น ความต้านทานเชิงแผ่น ของฟิล์ม a-Si กับ Poly-Si และ แกน x เป็นปริมาณสารเจือในของฟิล์ม a-Si กับ Poly-Si พิจารณาในส่วนของฟิล์ม a-Si เมื่อทำการเพิ่มปริมาณสารเจือ 1.0×10^{16} , 1.3×10^{16} , 1.6×10^{16} และ 2.0×10^{16} ion/cm² จะได้ค่าความต้านทานเชิงแผ่นเท่ากับ 123.75, 117.17, 106.2 และ 102.58 Ω/□ ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณสารเจือมีผลให้ความต้านทานเชิงแผ่นลดลง

พิจารณาในส่วนของฟิล์ม Poly-Si เมื่อทำการเพิ่มปริมาณสารเจือ 1.0×10^{16} , 1.3×10^{16} , 1.6×10^{16} และ 2.0×10^{16} ion/cm² จะได้ค่าความต้านทานเชิงแผ่นเท่ากับ 201.95, 181.73, 158.34 และ 147.07 Ω/□ ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณสารเจือมีผลให้ความต้านทานเชิงแผ่นลดลงเช่นเดียวกับกรณีของฟิล์ม a-Si

เมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานเชิงแผ่นฟิล์ม Poly-Si กับค่าความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์ม a-Si จะพบว่าค่าเฉลี่ยของค่าความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์ม โพลีรีซิสเตอร์มีค่ามากกว่าฟิล์ม a-Si เท่ากับ 34.38 % ซึ่งเป็นค่าค่อนข้างมาก ซึ่งถ้าต้องการลดความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์ม โพลีรีซิสเตอร์จากแผ่นฟิล์ม Poly-Si ให้อยู่ในระดับ 115 Ω/□ จะต้องใช้ปริมาณสารเจือในปริมาณมาก (มากกว่า 2×10^{16} ion/cm²) และ เป็นเหตุให้ใช้เวลานานมากในการยิงสารประจุเพื่อสร้างสารเจือ (ตามสมการที่ 2.9) ดังนั้น

โพลีซิลิไซด์จากแผ่นฟิล์ม a-Si ที่สร้างขึ้นมีความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์มโพลีซิลิไซด์ต่ำกว่าจึงเป็นทางเลือกที่ดีกว่า อย่างไรก็ตาม ยังมีเทคนิคในการลดความต้านทานเชิงแผ่นสำหรับ ฟิล์ม โพลีซิลิไซด์ โดยการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการแอนนัล ซึ่งจะทำให้การทดลองในหัวข้อต่อไป

5.4 ศึกษาโครงสร้างและความต้านทานของ โพลีซิลิไซด์ที่สร้างจาก ฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ที่การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการแอนนัล [25]

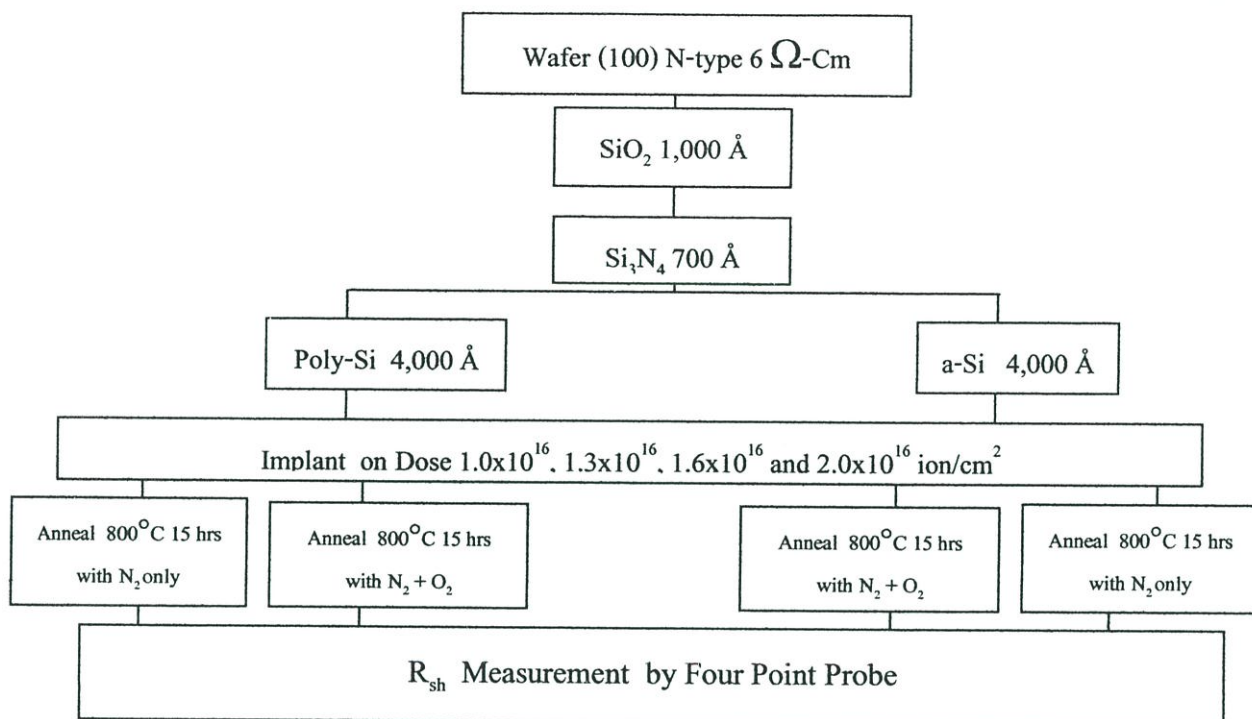
เนื่องจากการสร้างโพลีซิลิไซด์ จะต้องใช้เวลาในการแอนนัลที่ เวลา 15 ชั่วโมง ซึ่งเป็นเวลาค่อนข้างนานทำให้เกิดการแพร่ออกของสารเจือไปสู่ภายนอกระหว่างทำการแอนนัล ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาโครงสร้างและความต้านทานของ โพลีซิลิไซด์ที่สร้างจาก ฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ที่การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการแอนนัล โดยการเพิ่มออกซิเจนเพื่อให้เกิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ให้เป็นชั้นป้องกันการแพร่ออกของสารเจือ

5.4.1 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการศึกษาโครงสร้างและความต้านทานของ โพลีซิลิไซด์ที่สร้างจาก ฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ที่การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการแอนนัล

นำแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ ขนาด 6 นิ้ว ชนิดเอ็น (100) ที่มีสภาพความต้านทาน $6 \Omega \cdot \text{cm}$ แล้วนำไปทำความสะอาดด้วยเงื่อนไขตามตาราง 5.1 แล้วทำการปลูกฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) หนา $1,000 \text{ \AA}$ ด้วยเตา ที่อุณหภูมิ $1,000 \text{ }^\circ\text{C}$ หลังจากนั้นทำการปลูกซิลิคอนไนไตรด์ (Si_3N_4) หนา 700 \AA ด้วยเทคนิค LPCVD ที่อุณหภูมิ $700 \text{ }^\circ\text{C}$ หลังจากนั้นทำการปลูกฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ที่ความหนา $4,000 \text{ \AA}$ ด้วยระบบ LPCVD ด้วยเงื่อนไขจากการทดลองใน 5.1 หลังจากนั้นนำฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ไป ทำการยิงฝังประจุโบรอน ($_{11}\text{B}^+$) พลังงาน 50 keV ที่เงื่อนไขปริมาณสารเจือดังนี้คือ 1.0×10^{16} , 1.30×10^{16} , 1.6×10^{16} และ $2.0 \times 10^{16} \text{ ion/cm}^2$ แล้วนำไปทำความสะอาดด้วยเงื่อนไขตามตารางที่ 5.1 หลังจากนั้นนำไปทำการแอนนัลด้วยเตาที่อุณหภูมิ $800 \text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 15 ชั่วโมง โดยทำการแบ่งเงื่อนไขการจ่ายก๊าซออกเป็น 2 เงื่อนไขคือ

1. จ่ายก๊าซไนโตรเจน (N_2) ที่อัตราการไหลเท่ากับ 10 ลิตรต่อนาที
2. จ่ายก๊าซออกซิเจน (O_2) ที่อัตราการไหลเท่ากับ 1 ลิตรต่อนาที และ ก๊าซไนโตรเจน (N_2) ที่อัตราการไหลเท่ากับ 10 ลิตรต่อนาที

หรือพิจารณาขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานอย่างง่ายจากรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 ขั้นตอนการทดลองในหัวข้อ 5.4

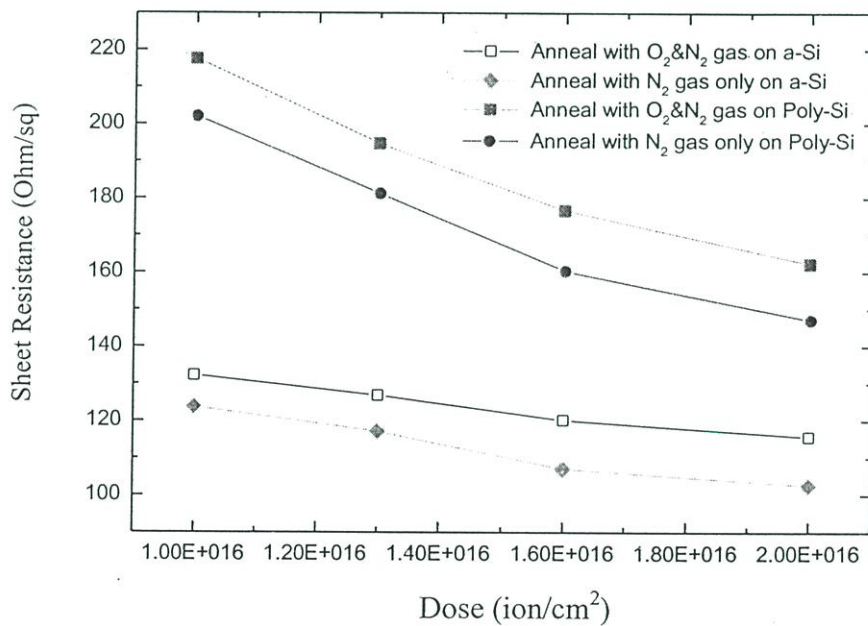
5.4.2 ผลการวัดความต้านทานเชิงแผ่นด้วยเครื่องโพรบพอยท์โพรบ

จากผลการทดลองรูปที่ 5.10 แสดง แกน y เป็น ความต้านทานเชิงแผ่น ของฟิล์ม a-Si กับ Poly-Si และ แกน x เป็นปริมาณสารเจือในของฟิล์ม a-Si กับ Poly-Si พิจารณาในส่วนของฟิล์ม a-Si เมื่อทำการเพิ่มปริมาณสารเจือ 1.0×10^{16} , 1.3×10^{16} , 1.6×10^{16} และ 2.0×10^{16} ion/cm² จะได้ค่าความต้านทานเชิงแผ่นเท่ากับ 123.75, 117.17, 106.2 และ 102.58 Ω/□ ตามลำดับ ที่เงื่อนไขการจ่ายก๊าซไนโตรเจน (N₂) ที่อัตราการไหลเท่ากับ 10 ลิตรต่อนาทีในการแอนนีส และได้ค่าความต้านทานเชิงแผ่นเท่ากับ 132.2, 126.77, 120.16 และ 115.68 Ω/□ ตามลำดับ ที่เงื่อนไขการจ่ายก๊าซ ออกซิเจน (O₂) ที่อัตราการไหลเท่ากับ 1 ลิตรต่อนาที และ ก๊าซไนโตรเจน (N₂) ที่อัตราการไหลเท่ากับ 10 ลิตรต่อนาทีในการแอนนีส ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มการจ่ายก๊าซ ออกซิเจน (O₂) ในการแอนนีส ทำให้ค่าความต้านทานเชิงแผ่นเพิ่มขึ้นที่ทุกปริมาณสารเจือ โดยความต้านทานเชิงแผ่นเพิ่มขึ้นจากกรณีไม่ได้จ่ายก๊าซออกซิเจน (O₂) เท่ากับ 8.20 %

พิจารณาในส่วนของฟิล์ม Poly-Si เมื่อทำการเพิ่มปริมาณสารเจือ 1.0×10^{16} , 1.3×10^{16} , 1.6×10^{16} และ 2.0×10^{16} ion/cm² จะได้ค่าความต้านทานเชิงแผ่นเท่ากับ 201.95, 181.73, 158.34 และ 147.07 Ω/□

ตามลำดับ ที่เงื่อนไขการจ่ายก๊าซไนโตรเจน (N_2) ที่อัตราการไหลเท่ากับ 10 ลิตรต่อนาทีในการแอนนีส และได้ค่าความต้านทานเชิงแผ่นเท่ากับ 216.12, 193.03, 175.94 และ 161.32 Ω/\square ตามลำดับ ที่เงื่อนไขการจ่ายก๊าซออกซิเจน (O_2) ที่อัตราการไหลเท่ากับ 1 ลิตรต่อนาที และ ก๊าซไนโตรเจน (N_2) ที่อัตราการไหลเท่ากับ 10 ลิตรต่อนาที ในการแอนนีส ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มการจ่ายก๊าซออกซิเจน (O_2) ในการแอนนีส ทำให้ค่าความต้านทานเชิงแผ่นเพิ่มขึ้นที่ทุกปริมาณสารเจือ โดยความต้านทานเชิงแผ่นเพิ่มขึ้นจากกรณีไม่ได้จ่ายก๊าซออกซิเจน (O_2) เท่ากับ 9.05 %

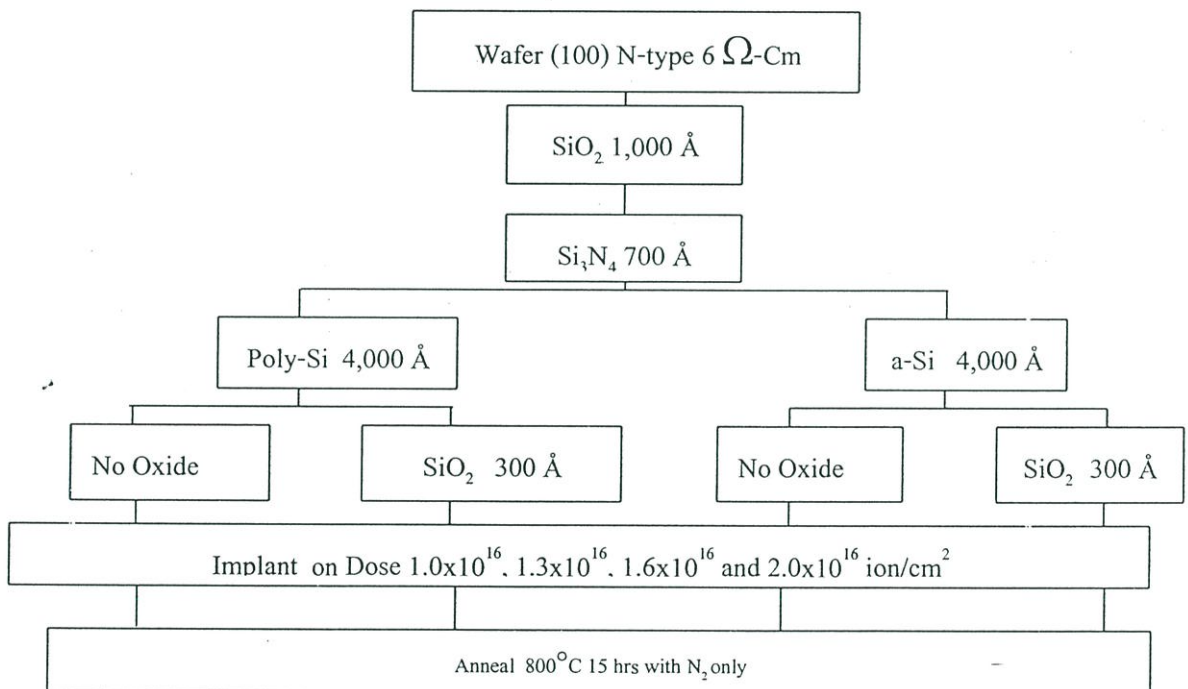
นอกจากนี้หลังการเตรียมชั้นพบว่ามีการเกิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หนา 200 Å ทำให้ฟิล์ม a-Si กับ Poly-Si หายในปริมาณ 100 Å หรือ ปริมาณ 2.5 % ของความหนา 4,000 Å ซึ่งทำให้ความต้านทานเชิงแผ่นควรเพิ่มขึ้น 2.5 % แต่ในการทดลองจริงพบว่า มีค่าความต้านทานเชิงแผ่น ของ ฟิล์ม Poly-Si และ ฟิล์ม a-Si เพิ่มขึ้น 9.05 % และ 8.20 % ตามลำดับ



รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงแผ่นกับปริมาณสารเจือ ของฟิล์ม a-Si กับ Poly-Si ที่มีการปรับเงื่อนไขการจ่ายก๊าซในการแอนนีส

5.5 ศึกษาความต้านทานของโพลีรีซิสเตอร์ที่สร้างจาก ฟิล์ม Poly-Si และ a-Si โดยการเพิ่มชั้นซิลิกอนไดออกไซด์[24,25]

เนื่องจากการสร้างโพลีรีซิสเตอร์ จะต้องใช้เวลาในการแอนนีสที่ เวลา 15 ชั่วโมง ซึ่งเป็นเวลาค่อนข้างนานทำให้เกิดการแพร่ออกของสารเจือปนสู่ภายนอกระหว่างทำการแอนนีส ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาโครงสร้างและความต้านทานของโพลีรีซิสเตอร์ที่สร้างจากฟิล์ม Poly-Si และ a-Si โดยการเพิ่มชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ก่อนการยิงฝังประจุ เพื่อใช้เป็นชั้นฟิล์มป้องกันการแพร่ออกของสารเจือปนระหว่างการแอนนีส

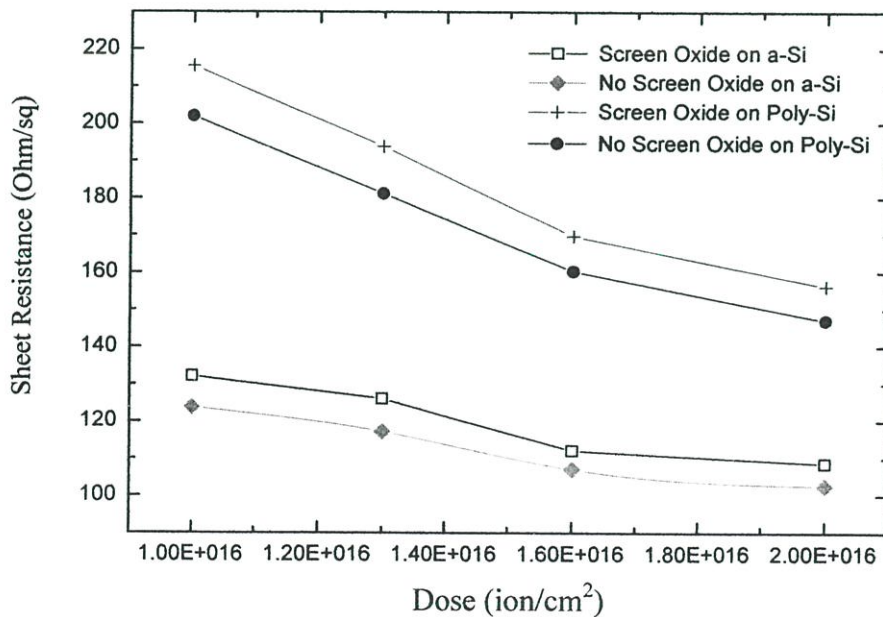


รูปที่ 5.11 ขั้นตอนการทดลองในหัวข้อ 5.5

5.5.1 การเตรียมชั้นงานสำหรับการศึกษาความต้านทานของ โพลีซิลิไซด์ที่สร้างจากฟิล์ม Poly-Si และ a-Si โดยการเพิ่มชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

นำแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ ขนาด 6 นิ้ว ชนิดเอ็น (100) ที่มีสภาพความต้านทาน $6 \Omega\text{-cm}$ แล้วนำไปทำความสะอาดด้วยเงื่อนไซตามตารางที่ 5.1 แล้วทำการปลูกฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) หนา $1,000 \text{ \AA}$ ด้วยเตาที่อุณหภูมิ $1,000 \text{ }^\circ\text{C}$ หลังจากนั้นทำการปลูกซิลิคอนไนไตรด์ (Si_3N_4) หนา 700 \AA ด้วยเทคนิค LPCVD ที่อุณหภูมิ $700 \text{ }^\circ\text{C}$ หลังจากนั้นทำการปลูกฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ที่ความหนา $4,000 \text{ \AA}$ ด้วยระบบ LPCVD ด้วยเงื่อนไซจากการทดลองใน 5.1 หลังจากนั้นทำการปลูกฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) หนา 300 \AA ที่อุณหภูมิ $400 \text{ }^\circ\text{C}$ หลังจากนั้นนำฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ไปทำการยิงฝังประจุโบรอน ($_{11}\text{B}^+$) พลังงาน 50 keV ที่เงื่อนไซปริมาณสารเจือดังนี้คือ 1.0×10^{16} , 1.30×10^{16} , 1.6×10^{16} และ $2.0 \times 10^{16} \text{ ion/cm}^2$ แล้วนำไปทำความสะอาดด้วยเงื่อนไซตามตารางที่ 5.1 หลังจากนั้นนำไปทำการแอนนัลด้วยเตาที่อุณหภูมิ $800 \text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 15 ชั่วโมง ที่การจ่ายก๊าซไนโตรเจน (N_2) ที่อัตราการไหลเท่ากับ 10 ลิตรต่อนาที หรือพิจารณาขั้นตอนการเตรียมชั้นงานอย่างง่ายจากรูปที่ 5.11

5.5.2 ผลการวัดความต้านทานเชิงแผ่นด้วยเครื่องโพรมิตที่โพรมิตที่เงื่อนไซเพิ่มชั้นซิลิคอนไดออกไซด์



รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงแผ่นกับปริมาณสารเจือ ของฟิล์ม a-Si กับ Poly-Si โดยการเพิ่มชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

จากผลการทดลองรูปที่ 5.12 แสดง แกน y เป็น ความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์ม a-Si กับ Poly-Si และ แกน x เป็นปริมาณสารเจือในฟิล์ม a-Si กับ Poly-Si พิจารณาในส่วนของฟิล์ม a-Si เมื่อทำการเพิ่มปริมาณสารเจือ 1.0×10^{16} , 1.3×10^{16} , 1.6×10^{16} และ 2.0×10^{16} ion/cm² จะได้ค่าความต้านทานเชิงแผ่นเท่ากับ 123.75, 117.17, 106.20 และ 102.58 Ω/□ ตามลำดับ ที่เงื่อนไขไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บนฟิล์ม a-Si และได้ค่าความต้านทานเชิงแผ่นเท่ากับ 131.91, 124.93, 111.71 และ 107.37 Ω/□ ตามลำดับ ที่เงื่อนไขเพิ่มชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บนฟิล์ม a-Si ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บนฟิล์ม a-Si ทำให้ค่าความต้านทานเชิงแผ่นเพิ่มขึ้นที่ทุกปริมาณสารเจือ โดยความต้านทานเชิงแผ่นเพิ่มขึ้นจากกรณีไม่ได้เพิ่มชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บนฟิล์ม a-Si เท่ากับ 5.86 %

พิจารณาในส่วนของฟิล์ม Poly-Si เมื่อทำการเพิ่มปริมาณสารเจือ 1.0×10^{16} , 1.3×10^{16} , 1.6×10^{16} และ 2.0×10^{16} ion/cm² จะได้ค่าความต้านทานเชิงแผ่นเท่ากับ 201.95, 181.73, 158.34 และ 147.07 Ω/□ ตามลำดับ ที่เงื่อนไขไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บนฟิล์ม Poly-Si และได้ค่าความต้านทานเชิงแผ่นเท่ากับ 216.58, 194.13, 169.98 และ 156.51 Ω/□ ตามลำดับ ที่เงื่อนไขเพิ่มชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บนฟิล์ม Poly -Si ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บนฟิล์ม Poly-Si ทำให้ค่าความต้านทานเชิงแผ่นเพิ่มขึ้นที่ทุกปริมาณสารเจือ โดยความต้านทานเชิงแผ่นเพิ่มขึ้นจากกรณีไม่ได้เพิ่มชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ บนฟิล์ม Poly-Si เท่ากับ 6.17 %

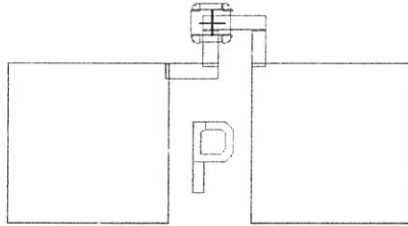
ทั้งนี้สาเหตุที่ทำให้ความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์ม Poly-Si และ a-Si เพิ่มขึ้น ที่เงื่อนไขการเพิ่มชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ มาจากเหตุผลดังนี้คือ พลังงานในการยิงรังสีประจุคือ 50 keV ทำให้ความลึกที่เจือสารเท่ากับ 3,310 Å (รายละเอียดตามภาคผนวก จ) ซึ่งเป็นความลึกก่อนการแอนนัล ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่สร้างบนฟิล์ม Poly-Si หรือ a-Si มีความหนา 300 Å ซึ่งเท่ากับ 9 % ของความลึกที่ทำการยิงรังสีประจุ ดังนั้นเมื่อทำการยิงรังสีประจุเข้าไปในเนื้อฟิล์มทำให้มีปริมาณสารเจือตกค้างอยู่ใน ซิลิคอนไดออกไซด์ นี้ ดังนั้นจึงทำให้ค่าความต้านทานสูงขึ้น

5.6 ศึกษาความต้านทานรอยสัมผัสระหว่างผิวโพลีซิลิคอนที่ได้รับการเจือสารกับ โลหะ

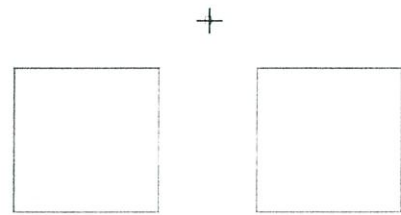
[19,20]

ในการทดลองการศึกษาความต้านทานรอยสัมผัสระหว่างผิวโพลีซิลิคอน (Contact Resistance: R_c) ที่ได้รับการเจือสารกับโลหะนี้จะหาความสัมพันธ์ระหว่าง ความปริมาณสารเจือภายในเนื้อฟิล์มโพลีซิลิคอนกับค่า R_c และ ความสัมพันธ์ระหว่างโพลีซิลิคอนที่สร้างจากเนื้อฟิล์ม Poly-Si และ a-Si กับค่า R_c เพื่อที่จะศึกษาว่าปริมาณสารเจือ และ ฟิล์ม Poly-Si และ a-Si มีผลต่อค่า R_c อย่างไร

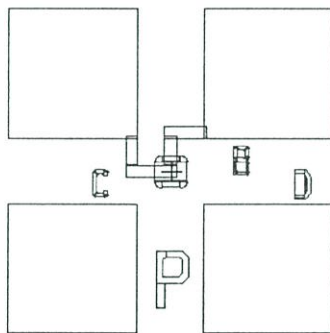
5.6.1 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการศึกษาความต้านทานรอยสัมผัสระหว่างผิวโพลีซิติคอนที่
ได้รับการเจือสาร กับ โลหะ



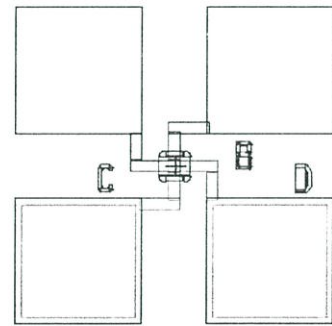
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 5.13 มาตรฐานของ CBK ที่เขียนโดยโปรแกรม L-edit

(ก) มาตรฐานสำหรับโพลีซิติคอน

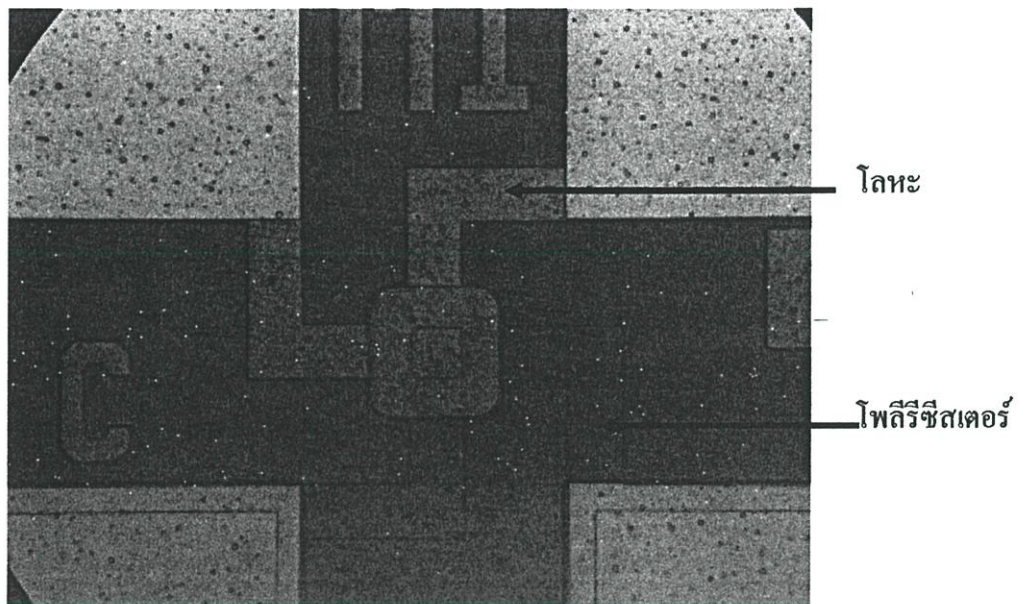
(ข) มาตรฐานสำหรับกัศเปิดช่อง

(ค) มาตรฐานสำหรับขั้วโลหะ

(ง) โครงสร้างมาตรฐาน (CBK) เมื่อเสร็จสมบูรณ์

นำชิ้นงานในการทดลอง 5.3 มาทำเป็นโครงสร้าง CBK โดยมีวิธีการสร้างดังนี้

ทำการสร้างมาสก์ดังรูปที่ 5.13 หลังจากนั้นนำชิ้นงานในการทดลอง 5.3 ไปทำการเคลือบน้ำยาโฟโตริซิส ไปทำการถ่ายภาพ มาสก์ ดังรูปที่ 5.13 (ก) ลงบนแผ่นเวเฟอร์ จากการฉายแสงด้วยเครื่องสเตปเปอร์ (Stepper) หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปก๊อץฟิล์มโพลีซิลิคอนให้เป็นลวดลาย ด้วยวิธีการกัดแบบแห้ง (Dry Etching) แล้วล้างน้ำยาโฟโตริซิสออก หลังจากนั้นนำชิ้นงาน ไปปลูกซิลิคอนไดออกไซด์ ที่ความหนา 1,000 Å โดยวิธี LPCVD หลังจากนั้นนำชิ้นงานทำการเคลือบน้ำยาโฟโตริซิส ไปทำการถ่ายภาพ มาสก์ ดังรูปที่ 5.13 (ข) แล้วนำชิ้นงานมาทำการกัดเป็นช่องสี่เหลี่ยมที่ขนาด 10 ไมครอน x 10 ไมครอน ด้วยวิธีการกัดแบบแห้ง แล้วล้างน้ำยาโฟโตริซิสออก หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปเคลือบฟิล์มโลหะ ด้วย AlCuSi ที่มีส่วนผสม Al:Cu:Si : 98% :0.5% :1.5% ด้วยวิธีสปีเตอร์ริงค์ หนา 5,000 อังสตรอม แล้วทำการ ซินเตอร์ริงค์ (Sintering) ด้วยก๊าซผสมระหว่างก๊าซไฮโดรเจน (H_2) 3% ค่อก๊าซไนโตรเจน (N_2) 97% ที่ อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ในเวลา 45 นาที [16, 26] หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปทำการเคลือบน้ำยาโฟโตริซิส แล้วทำการถ่ายภาพ มาสก์ ดังรูปที่ 5.13 (ค) ลงบนชิ้นงานแล้วทำการฉายแสงด้วยเครื่องสเตปเปอร์ หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปก๊อץโลหะออกเป็นลวดลาย ที่เป็นโครงสร้าง CBK ด้วยวิธีการกัดแบบแห้งได้โครงสร้างดังรูปที่ 5.13 (ง) และเมื่อนำชิ้นงานไปถ่ายภาพ ได้ดังรูปที่ 5.14

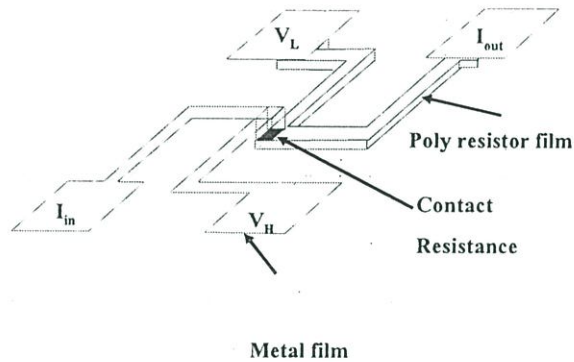


รูปที่ 5.14 ชิ้นงานที่สร้างเป็นโครงสร้าง CBK

5.6.2 ผลการทดลองศึกษาความต้านทานรอยสัมผัสระหว่างผิวโพลีซิลิคอนที่ได้รับการเจือสารกับ โลหะ

นำชิ้นงานไปวัด R_c ด้วยการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ขั้ว I_{in} และ I_{out} แล้วทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ขั้ว V_H และ V_L ดังรูปที่ 5.15 แล้วนำมาคำนวณหาค่า R_c ดังสมการที่ 2.34 คือ

$$R_c = \frac{V_H - V_L}{I_{in}}$$



รูปที่ 5.15 โครงสร้าง CBK

ตารางที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานรอยสัมผัสระหว่างผิวโพลีซิลิคอนที่ได้รับการเจือสารกับ โลหะ กับความต้านทานเชิงแผ่น

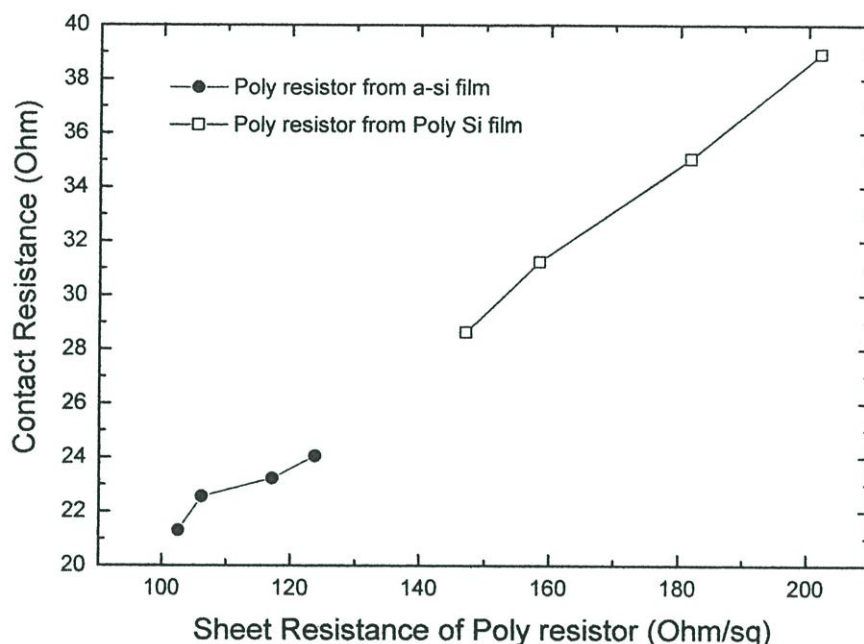
ชนิด ฟิล์มที่ใช้สร้างโพลีซิลิคอน	ปริมาณสารเจือ จากยึงฝิ่งประจุ (ion/cm ²)	Sheet Resistance (Ω/□)	Contact Resistance (Ω) ที่พื้นที่ขนาด (10 μm x 10 μm)
Poly-Si	1.00x10 ¹⁶	201.95	38.94
	1.30 x10 ¹⁶	181.73	35.05
	1.60 x10 ¹⁶	158.34	31.24
	2.00 x10 ¹⁶	147.07	28.63
a-Si	1.00 x10 ¹⁶	123.75	24.05
	1.30 x10 ¹⁶	117.17	23.23
	1.60 x10 ¹⁶	106.2	22.26
	2.00 x10 ¹⁶	102.58	21.30

ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานรอยสัมผัสระหว่างผิวโพลีซิลิคอนที่ได้รับการเจือสารกับโลหะ กับความต้านทานเชิงแผ่น แสดงดังในตารางที่ 5.7 พิจารณาโพลีซิลิคอนที่สร้างจากฟิล์ม Poly-Si เมื่อทำการเพิ่มปริมาณสารเจือ 1.0×10^{16} , 1.3×10^{16} , 1.6×10^{16} และ 2.0×10^{16} ion/cm² จะได้ค่าความต้านทานเชิงแผ่นเท่ากับ 201.95, 181.73, 158.34 และ 147.07 Ω/□ ตามลำดับ และนำไปวัดค่า R_c จากโครงสร้าง CBK ได้เท่ากับ 38.94, 35.05, 31.24 และ 28.63 Ω ตามลำดับ จะพบว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณสารเจือ นอกจากมีผลทำให้ค่าความต้านทานเชิงแผ่นลดลง แล้วยังมีผลให้ค่า R_c มีผลลดลงเช่นกัน

พิจารณาโพลีซิลิคอนที่สร้างจากฟิล์ม a-Si เมื่อทำการเพิ่มปริมาณสารเจือ 1.0×10^{16} , 1.3×10^{16} , 1.6×10^{16} และ 2.0×10^{16} ion/cm² จะได้ค่าความต้านทานเชิงแผ่นเท่ากับ 123.75, 106.2, 117.17 และ 123.75 Ω/□ ตามลำดับ และนำไปวัดค่า R_c จากโครงสร้าง CBK ได้เท่ากับ 24.05, 23.23, 22.26 และ 21.30 Ω ตามลำดับ จะพบว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณสารเจือ นอกจากมีผลให้ค่าความต้านทานเชิงแผ่นลดลง แล้วยังมีผลให้ค่า R_c มีผลลดลงเช่นกัน ดังนั้นจะเห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณสารเจือ ลงบนฟิล์ม Poly-Si และ a-Si นอกจากมีผลให้ค่าความต้านทานเชิงแผ่นลดลง แล้วยังมีผลให้ค่า R_c มีผลลดลงเช่นกัน

เมื่อนำฟิล์มทั้งสองชนิดมาเปรียบเทียบกันพบว่า ค่า R_c ที่สร้างมาจากฟิล์ม Poly-Si มีค่ามากกว่าฟิล์ม a-Si ที่ทุกเงื่อนไขปริมาณสารเจือในการยิงฝั่งประจุมีสาเหตุมาจากสภาพความต้านทานของฟิล์ม Poly-Si มากกว่าฟิล์ม a-Si และขนาดเกรนของฟิล์ม Poly-Si มีขนาดเล็กกว่าฟิล์ม a-Si ซึ่งอธิบายต่อไปในบทที่ 6

เมื่อนำมา พล็อต (plot) บนกราฟดังรูปที่ 5.16 พบว่า R_c มีความสัมพันธ์มีแนวโน้มเป็นเชิงเส้นกับความต้านทานเชิงแผ่น เมื่อพิจารณาโพลีซิลิคอนที่สร้างจากฟิล์ม Poly-Si อย่างเดียว จะเห็นว่าที่ขนาดของเกรนเดียวกัน ค่าความต้านทานรอยสัมผัสระหว่างโพลีซิลิคอนแปรผันโดยตรงกับปริมาณสารเจือ และเมื่อพิจารณาโพลีซิลิคอนที่สร้างจากฟิล์ม a-Si อย่างเดียวก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน



รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความต้านทานเชิงแผ่น กับ R_c

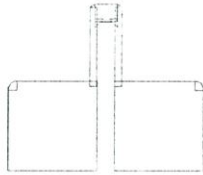
5.7 ศึกษาหาค่า ทีซีอาร์ ของโพลีรีซิสเตอร์ [24]

ในการทดลองนี้เพื่อหาความสัมพันธ์ของค่า TCR ของโพลีรีซิสเตอร์กับปริมาณสารเจือ และ ศึกษาว่า ชนิดของฟิล์ม Poly-Si และ a-Si มีผลต่อค่า TCR อย่างไร

5.7.1 การเตรียมชิ้นงานสำหรับศึกษาหาค่า ทีซีอาร์ ของโพลีรีซิสเตอร์

นำชิ้นงานในการทดลอง 5.3 มาทำเป็นชิ้นงานสำหรับวัดความต้านทานโพลีรีซิสเตอร์ โดย ทำการสร้างมาสก์ดังรูปที่ 5.17 หลังจากนั้นนำชิ้นงาน ไปทำการเคลือบน้ำยาโฟโตรีซิสต์ ไปทำการถ่ายภาพมาสก์ ดังรูปที่ 5.17 (ก) จากการฉายแสง ด้วยเครื่อง สเตปเปอร์ (Stepper) หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปกัดชั้นฟิล์มโพลีซิลิคอนให้เป็นลวดลาย ด้วยวิธีการกัดแบบแห้ง (Dry Etching) แล้วล้างน้ำยาโฟโตรีซิสต์ออก หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปปลูกซิลิคอนไดออกไซด์ ที่ความหนา 1,000 Å โดยวิธี LPCVD หลังจากนั้นนำชิ้นงานทำการเคลือบน้ำยาโฟโตรีซิสต์ ไปทำการถ่ายภาพ มาสก์ ดังรูปที่ 5.17 (ข) แล้วนำชิ้นงานทำการกัดเป็นช่องสี่เหลี่ยมที่ขนาด 10 ไมครอน x 10 ไมครอน ด้วยวิธีการกัดแบบแห้ง แล้วล้างน้ำยาโฟโตรีซิสต์ออก หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปเคลือบฟิล์มโลหะ ด้วย AlCuSi ที่มีส่วนผสม Al:Cu:Si : 98% :0.5%:1.5% ด้วยวิธีสปัตเตอร์ริงค์ หนา 5,000 อังสตรอม แล้วทำการซินเตอร์ริงค์ (Sintering) ด้วย

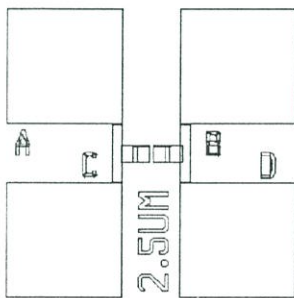
ก๊าซผสมระหว่างก๊าซไฮโดรเจน(H_2) 3% คือก๊าซไนโตรเจน (N_2) 97% ที่ อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ในเวลา 45 นาที [16,24] หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปการเคลือบน้ำยาไฟโครซีต แล้วทำการถ่ายภาพ มาสก์ ดังรูปที่ 5.17 (ก) ลงบนชิ้นงานแล้วทำการฉายแสง ด้วยเครื่องสเตรปเปอร์ หลังจากนั้นนำชิ้นงาน ไปกัดชั้นโลหะออกเป็นลวดลาย ที่เป็นชิ้นงานสำหรับวัดความต้านทานโพลิรีซีสเตอร์ ด้วยวิธีการกัด แบบแห้งได้โครงสร้างดังรูปที่ 5.17 (ง) และเมื่อนำชิ้นงานไปถ่ายภาพได้ดังรูปที่ 5.18



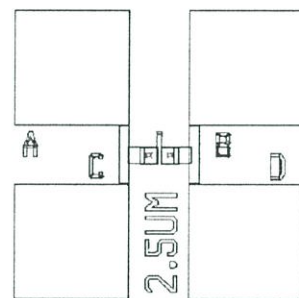
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

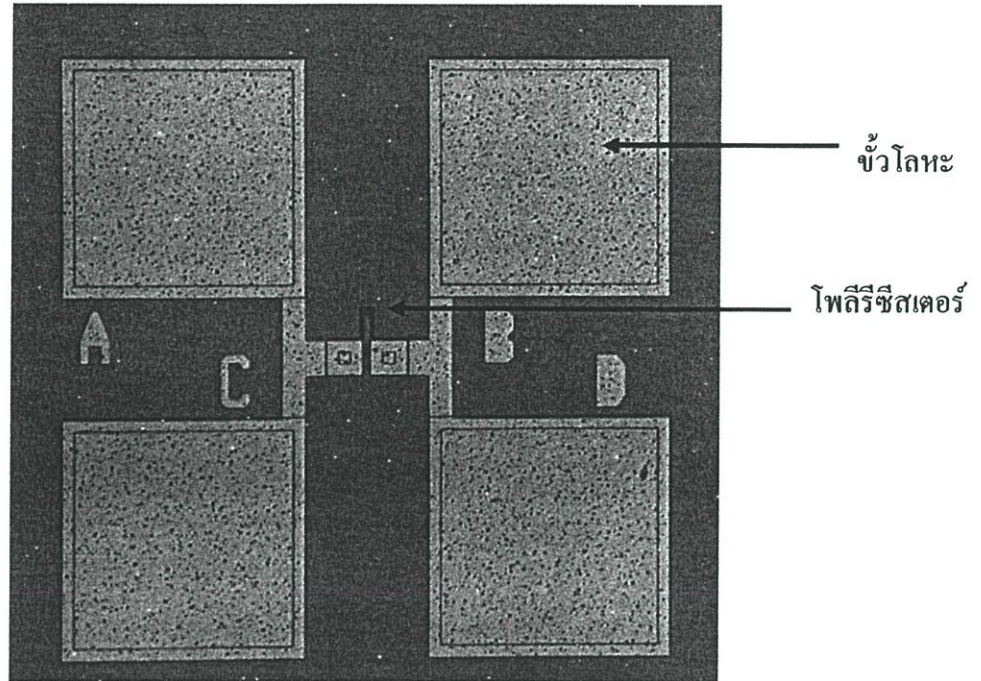
รูปที่ 5.17 มาสก์ของวัดความต้านทานโพลิรีซีสเตอร์ ที่เขียนโดยโปรแกรม L-edit

(ก) มาสก์สำหรับโพลิรีซีสเตอร์

(ข) มาสก์สำหรับกัดเปิดช่อง

(ค) มาสก์สำหรับขั้วโลหะ

(ง) โครงสร้างมาสก์ ในการวัดความต้านทานโพลิรีซีสเตอร์เมื่อเสร็จสมบูรณ์



รูปที่ 5.18 ลวดลายสำหรับวัดความต้านทาน โพลีซิลิคอน หลังการเตรียมขึ้น

5.7.2 ผลการวัดค่า ทีซีอาร์ [24]

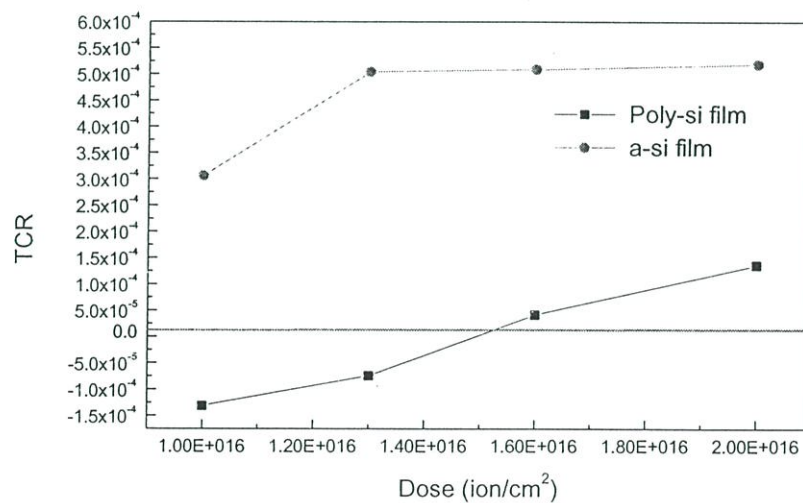
นำชิ้นงาน มาวัดความต้านทานของโพลีซิลิคอน โดยการปรับอุณหภูมิ 25-100 องศาเซลเซียส จะได้ค่าความต้านทานที่อุณหภูมิต่างๆ จากนั้นนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ย TCR จากความสัมพันธ์สมการที่ 2.35 คือ $TCR = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = \frac{R(T) - R_0}{R_0(T - T_0)}$ โดยที่ R_0 คือ ค่าความต้านทานที่อุณหภูมิห้อง, $R(T)$ คือ ค่าความต้านทานที่อุณหภูมิ T , T_0 คือ อุณหภูมิห้อง และ T คือ อุณหภูมิต่างๆ

ค่าความต้านทานของ โพลีซิลิคอน โดยการปรับอุณหภูมิ 25-100 องศาเซลเซียส จะได้ค่าดังตารางที่ 5.5 จะเห็นว่าโพลีซิลิคอน ที่สร้างจากฟิล์ม Poly-Si ที่ปริมาณสารเจือ 1.0×10^{16} - 1.3×10^{16} ion/cm² จะมีค่าความต้านทานลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่วนที่ปริมาณสารเจือ 1.6×10^{16} - 2.0×10^{16} ion/cm² จะมีค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และโพลีซิลิคอนที่สร้างจากฟิล์ม a-Si มีค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ทุกปริมาณสารเจือในการทดลองนี้

ตารางที่ 5.8 ค่าความต้านทานของ โพลีซิลิไซด์ที่อุณหภูมิ 25-100 องศาเซลเซียส

ชนิด ฟิล์มที่ใช้ สร้าง โพลีซิลิไซด์	ปริมาณสารเจือ จากการยิงฝัง ประจุ (ion/cm ²)	ความต้านทานโพลีซิลิไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ (Ohm)		
		25 °C	33 °C	99 °C
โพลีซิลิคอน	1.00x10 ¹⁶	5497.85	5494.25	5436.65
	1.30 x10 ¹⁶	4907.5	4905.1	4883.6
	1.60 x10 ¹⁶	4337.555	4339.3	4342.35
	2.00 x10 ¹⁶	3937.8	3941.55	3970.1
อมอร์ฟัส ซิลิคอน	1.00x10 ¹⁶	3202.8	3206	3305.45
	1.30 x10 ¹⁶	3040.6	3049.6	3153.25
	1.60 x10 ¹⁶	2835.15	2844	2936.65
	2.00 x10 ¹⁶	2676.45	2684	2785.75

เมื่อนำค่าจากตารางที่ 5.8 มาคำนวณหาค่า TCR จะได้ค่าเฉลี่ยได้ดังรูปที่ 5.19



รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ค่าความปริมาณสารเจือกับ TCR ของ ฟิล์ม Poly Si และ a-Si

ในรูปที่ 5.19 เมื่อพิจารณาในฟิล์มของ a-Si ที่ปริมาณสารเจือ 1.0×10^{16} , 1.3×10^{16} , 1.6×10^{16} และ 2.0×10^{16} ion/cm² จะได้ค่าของ TCR เท่ากับ 3.05×10^{-4} , 5.04×10^{-4} , 5.09×10^{-4} และ 5.19×10^{-4} ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าค่า TCR ของ a-Si มีค่ามากกว่าศูนย์ทุกสารเจือ และมีค่าค่อนข้างคงที่

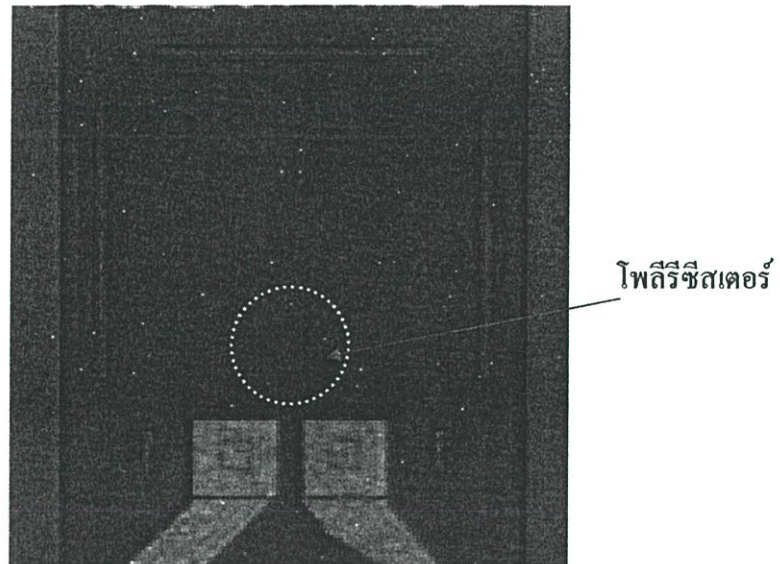
เมื่อพิจารณาในฟิล์มของ Poly-Si ที่ปริมาณสารเจือ 1.0×10^{16} , 1.3×10^{16} , 1.6×10^{16} และ 2.0×10^{16} ion/cm² จะได้ค่าของ TCR เท่ากับ -1.32×10^{-4} , -4.12×10^{-5} , 4.12×10^{-5} และ 1.36×10^{-4} ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าค่า TCR ของ ฟิล์ม Poly -Si มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณสารเจือ โดยมีค่าน้อยกว่าศูนย์ในช่วงปริมาณสารเจือ $1.0-1.5 \times 10^{16}$ ion/cm² และมีค่ามากกว่าศูนย์ ที่ปริมาณสารเจือมากกว่า 1.5×10^{16} ion/cm² ซึ่งค่า TCR มีค่าน้อยกว่าศูนย์ ซึ่งจะทำให้มีคุณสมบัติคล้ายกับ Shockley barrier เป็นเหตุให้เมื่อนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจจับความดันจะไม่สามารถควบคุมให้เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิเชิงเส้นได้[27,28]

เมื่อเปรียบเทียบค่า TCR ระหว่างเนื้อฟิล์มของ a-Si กับ Poly-Si จะพบว่า ค่า TCR ของ a-Si มีค่ามากกว่า Poly-Si ทุกสารเจือ

จากคุณสมบัติดังกล่าวทำให้เราเลือก ฟิล์ม a-Si นำไปสร้าง เป็น โพลีรีซิสเตอร์ในการตรวจจับความดัน และปริมาณสารเจือที่เราเลือกคือ 1.3×10^{16} ion/cm² เนื่องจากได้ค่า TCR เท่ากับ 5.04×10^{-4} เมื่อเทียบกับ สารเจือปริมาณ 1.6×10^{16} ion/cm² และ 2.0×10^{16} ion/cm² ได้ค่า TCR เท่ากับ 5.09×10^{-4} และ 5.19×10^{-4} ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าต้องเจือสารเพิ่มขึ้นจาก 1.3×10^{16} ion/cm² เท่ากับ 23.07% และ 58.83% เพื่อให้ได้ TCR เพิ่มขึ้น เท่ากับ 0.99% และ 2.98% ซึ่งเป็นปริมาณเพิ่มขึ้นน้อยมาก

5.8 การทดสอบนำโพลีรีซิสเตอร์ไปใช้ในกระบวนการสร้างเซ็นเซอร์ตรวจจับความดัน

ได้นำโพลีรีซิสเตอร์ไปใช้ในกระบวนการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดัน โดยมีการออกแบบและวิธีการสร้างตามในบทที่ 4 หลังจากสร้างเสร็จได้อุปกรณ์ตรวจจับความดันได้ดังรูปที่ 5.20 ซึ่งเงื่อนไขในการสร้างโพลีรีซิสเตอร์ จากฟิล์ม a-Si ที่การยิงฝังประจุชนิดพีที่ปริมาณ 1.3×10^{16} ion/cm² และพลังงาน 50 keV และ การแอนนีก ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ได้ความต้านทานเชิงแผ่น เท่ากับ $117 \Omega/\square$ แล้วนำไปสร้างในเซ็นเซอร์ตรวจจับความดัน และนำไปศึกษาโดยทำการวัดดังนี้

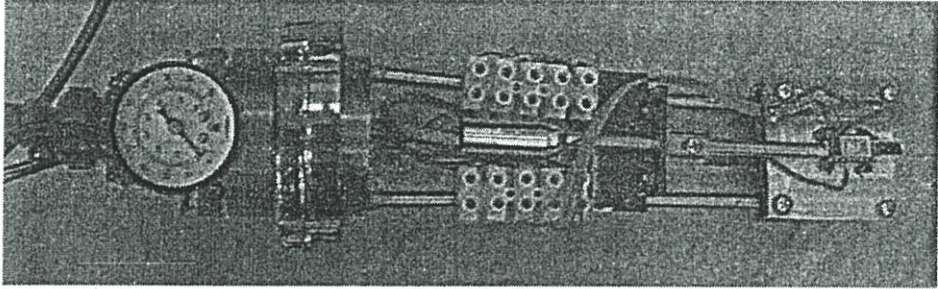


รูปที่ 5.20 อุปกรณ์ตรวจจับความดันที่สร้างในงานวิจัยนี้

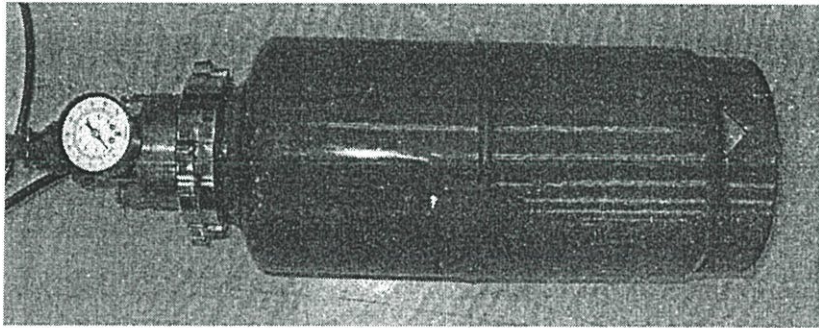
5.8.1 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ความต้านทานเป็ยโซริซีฟทีป หรือโพสิทีฟสเตอร์ กับ การเปลี่ยนแปลงความดัน

5.8.1.1 การทดลองศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ความต้านทานเป็ยโซริซีฟทีป หรือโพสิทีฟสเตอร์ กับ การเปลี่ยนแปลงความดัน

ทำการทดลองโดยนำอุปกรณ์ตรวจจับความดันมาทดสอบโดยใส่ลงในชุดแทนจับดังรูปที่ 5.21 (ก) หลังจากนั้นนำชุดแทนจับลงในถังอัดความดัน ดังในรูปที่ 5.21 (ข) หลังจากนั้นทำการอัดความดัน ในช่วง 0-80 kPa หลังจากนั้นทำการวัดค่าความต้านทานของโพสิทีฟสเตอร์



(ก)

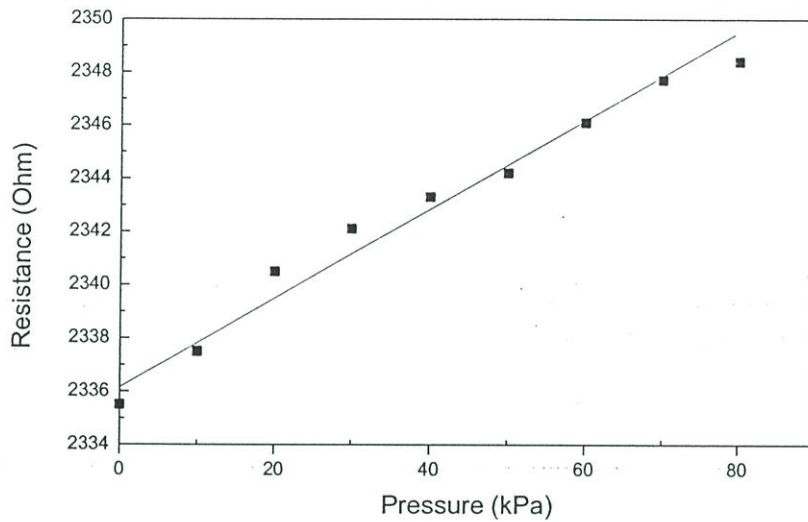


(ข)

รูปที่ 5.21 (ก) ชุดแทนจับ (ข) ถังอัดความดัน

5.8.1.2 ผลการทดลองศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ความต้านทานเป็ยโซริซีฟที่ป หรือ โพลีรีซิสเตอร์ กับการเปลี่ยนแปลงความดัน

ผลการทดลองหลังการวัดความต้านทานเป็ยโซริซีฟที่ปที่ความดันในช่วง 0-80 kPa แสดงดังใน รูปที่ 5.22 ซึ่งจะพบว่าเมื่อทำการเพิ่มค่าความดันความต้านทานเป็ยโซริซีฟที่ปจะเพิ่มขึ้น



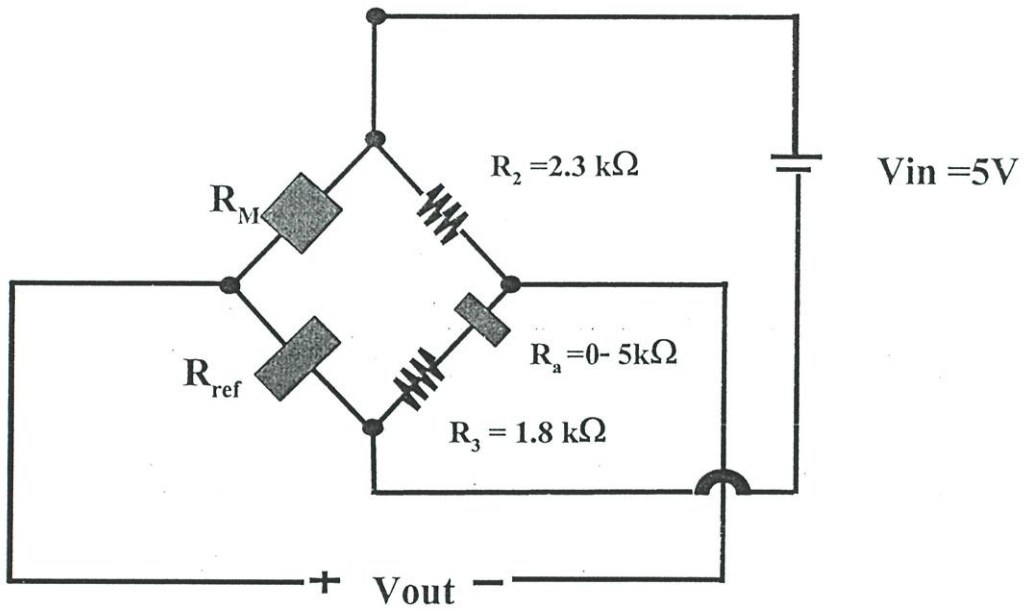
รูปที่ 5.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง Pressure กับ Resistance

5.8.2 การศึกษาหาค่าความไวของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน

5.8.2.1 การทดลองศึกษาหาค่าความไวของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน

ทำการทดลองความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความดัน-แรงดันไฟฟ้า โดยต่อวงจรวิศโตนบริดจ์ดังรูปที่ 5.23 โดยมีแหล่งจ่ายแรงดัน (V_m) เท่ากับ 5 V ตัวต้านทาน R_m คือ ความต้านทานของโพสิทีฟสเตอร์ของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน มีค่าเริ่มต้นที่ 2.3 k Ω ที่ความดัน 0 kPa, ตัวต้านทาน R_{ref} คือ ความต้านทานของโพสิทีฟสเตอร์ที่ใช้เป็นตัวอ้างอิง มีค่าเริ่มต้นที่ 2.3 k Ω , ตัวต้านทาน R_3 เท่ากับ 1.8 k Ω , ตัวต้านทานปรับค่าได้ R_a เท่ากับ 0-5 k Ω และ ตัวต้านทาน R_2 มีค่าเท่ากับ 2.3 k Ω

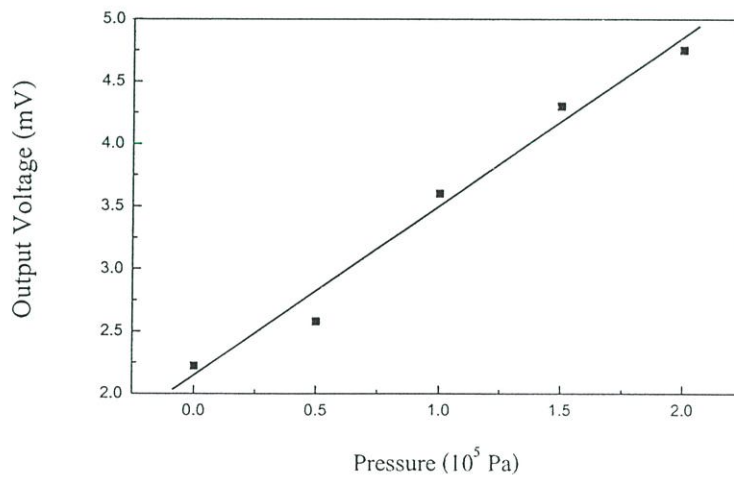
เมื่อต่อวงจรวิศโตนบริดจ์เข้ากับระบบเสร็จแล้วทำการจ่ายแรงดันในวงจรเท่ากับ 5 V แล้วปรับค่า R_a เพื่อให้ได้ V_{out} มีค่าต่ำที่สุดหรือเท่ากับ ศูนย์ ที่ความดัน 0 kPa จากนั้นทำการวัดค่า V_{out} ขณะที่ทำการปรับค่าความดัน 0-200 kPa



รูปที่ 5.23 วงจรวีทสโตนบริดจ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

5.8.2.2 ผลการทดลองศึกษาหาค่าความไวของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน

ผลการวัดค่า V_{out} ขณะที่ทำการปรับค่าความดัน 0-200 kPa ได้ผลดังรูปที่ 5.24 โดยจะเห็นว่ามีความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความดัน-แรงดันไฟฟ้าเป็นเชิงเส้น

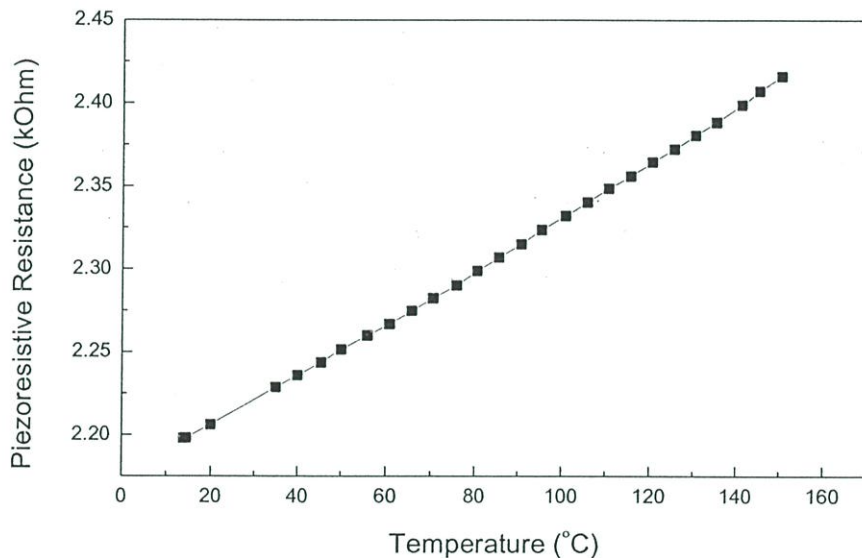


รูปที่ 5.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดัน-แรงดันไฟฟ้า

และจากรูปที่ 5.24 นำมาคำนวณหาค่าความไวอุปกรณ์ตรวจจับความดันโดยความสัมพันธ์สมการที่ 2.33 คือ $s = \frac{\Delta V}{V_{in} \Delta P}$ โดยที่ s คือ ความไวอุปกรณ์ตรวจจับความดัน, ΔV คือ การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าพุทของวงจรวีทสโตนบริดจ์, ΔP คือ การเปลี่ยนแปลงความดัน และ V_{in} คือ แหล่งจ่ายแรงดันคงที่ ของวงจรวีทสโตนบริดจ์ โดยได้ค่า s เท่ากับ $1.2 \mu\text{V/V/kPa}$

5.8.3 การทดลองศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเพียโซรีซีฟทีป กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบนอุปกรณ์ตรวจจับความดัน

ทำการนำอุปกรณ์ตรวจจับความดันมาวางบนแหล่งจ่ายอุณหภูมิ โดยทำการจ่ายอุณหภูมิ ตั้งแต่ 0-150 องศาเซลเซียส แล้วทำการวัดความต้านทานเพียโซรีซีฟทีป ซึ่งได้ผลการทดลองได้ดังรูปที่ 5.25



รูปที่ 5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเพียโซรีซีฟทีป กับอุณหภูมิ

จากผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.25 โดยแกน x เป็นอุณหภูมิ แสดงอุณหภูมิ ที่เพิ่มขึ้น แกน y เป็นความต้านทานเพียโซรีซีฟทีป จะพบว่า เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่า ความต้านทานเพียโซรีซีฟทีป จะมีค่าเพิ่มขึ้น และมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น โดยมีการเพิ่มอุณหภูมิ 1.6Ω ต่อ องศาเซลเซียส

บทที่ 6

วิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์และอภิปรายผลการทดลองที่แสดงในบทที่ 5 โดยเริ่มจากการวิเคราะห์ผลการศึกษาโครงสร้างจากฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ก่อนและหลังกระบวนการยิงฝั้งประจุ หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ผลศึกษาความต้านทานของโพลิรีซีสเตอร์ที่สร้างจากฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ที่เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเจือในการยิงฝั้งประจุ, การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการแอนนัล และการเพิ่มขึ้นซิลิคอนไดออกไซด์ หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์การศึกษาความต้านทานรอยสัมผัสระหว่างผิวโพลิซิลิคอนที่ได้รับการเจือสาร กับ โลหะ (Contact Resistance) และสุดท้ายทำการวิเคราะห์การศึกษาค่าที่ซีอาร์ (TCR) การวิเคราะห์และอภิปรายผลการทดลองทั้งหมดในบทนี้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

6.1 การวิเคราะห์ผลการศึกษาโครงสร้างจากฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ก่อนและหลังกระบวนการยิงฝั้งประจุ

จากการศึกษาโครงสร้างจากฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ก่อนกระบวนการยิงฝั้งประจุ เมื่อทำการวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่า ฟิล์ม Poly-Si ขนาดเกรนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.3 ไมครอน ขณะที่ฟิล์ม a-Si ไม่มีขนาดเกรนแสดงให้เห็น และเมื่อนำ Poly-Si และ a-Si ไปวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่นด้วยเครื่องวัดโพร์พอยท์โพรบ พบว่าค่าความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์มทั้งสองชนิดสูงมาก (มากกว่า $5 \times 10^6 \Omega/\square$) ซึ่งไม่สามารถวัดได้ หลังจากนั้นนำฟิล์มทั้งสองชนิดมาทำการยิงฝั้งประจุที่ปริมาณสารเจือ $1.0 \times 10^{16} \text{ ion/cm}^2$ ที่พลังงาน 50 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง จะได้ฟิล์มโพลิรีซีเตอร์ เมื่อทำการวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าฟิล์มจาก Poly-Si ขนาดเกรนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.3 ไมครอน ซึ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับของเดิม ขณะที่ฟิล์มจาก a-Si มีการเปลี่ยนแปลงขนาดเกรนมาก คือ มีขนาดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.6 ไมครอน เมื่อนำฟิล์มทั้งสองชนิดไปวัดค่าความต้านทานเชิงผิวด้วยเครื่องวัดโพร์พอยท์โพรบ พบว่าค่าความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์มจาก Poly-Si มีค่าเท่ากับ $206.2 \Omega/\square$ ส่วนค่าความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์ม a-Si มีค่าเท่ากับ $123.75 \Omega/\square$ ซึ่งจะเห็นว่าค่าความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์มจาก Poly-Si มากกว่า ค่าความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์มจาก a-Si ทั้งนี้เนื่องจากขนาด

เกรนที่ของฟิล์มจาก Poly-Si ที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดเกรนของฟิล์ม a-Si สามารถพิสูจน์ได้ จากเอกสารอ้างอิง[27, 28] ดังนี้

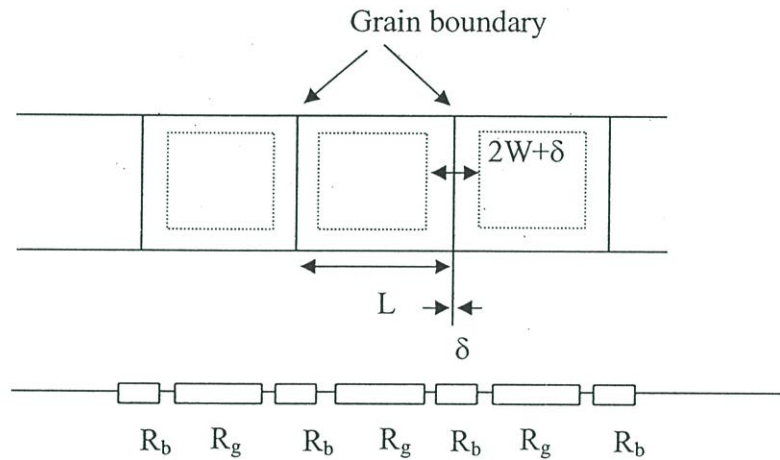
พิจารณา โพลีซีไซด์เตอร์ ในรูปแบบที่มีการต่อตัวต้านทานเป็นแบบอนุกรม ดังในรูปที่ 6.1 ซึ่ง จะเห็นว่า ความต้านทานของโพลีซีไซด์เตอร์ เท่ากับ ผลรวมของความต้านทานของเกรน กับความต้านทานที่ของขอบเกรน ได้ดังสมการ 6.1 ดังนี้

$$R_T = R_b + R_g + R_b + R_g + \dots \quad (6.1)$$

โดยที่ R_T คือ ความต้านทานของโพลีซีไซด์เตอร์

R_g คือ ความต้านทานของเกรน

R_b คือ ความต้านทานของขอบเกรน



รูปที่ 6.1 โครงสร้างอย่างง่ายที่ต่อเป็นแบบอนุกรมของโพลีซีไซด์เตอร์

ดังนั้นเมื่อพิจารณาสภาพความต้านทานของโพลีซีไซด์เตอร์ในแต่ละเกรนจะได้ ดังสมการ 6.2

$$\rho = \left[\frac{L - (2W + \delta)}{L} \right] \rho_g + \left[\frac{2W + \delta}{L} \right] \rho_b \quad (6.2)$$

โดยที่ L คือ ความกว้างของเกรน

W คือ ระยะเกรนถึงขอบเกรน

δ คือ ความหนาของขอบเกรน

ρ คือ สภาพต้านทานในแต่ละเกรนของโพลีซิลิไซด์

ρ_g คือ สภาพต้านทานของเกรน

ρ_b คือ สภาพต้านทานของขอบเกรน

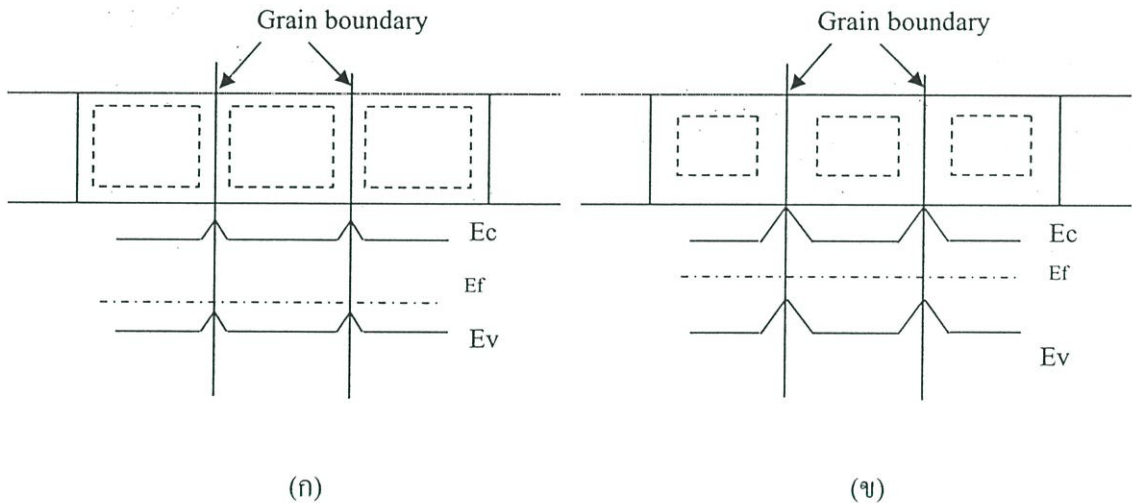
ค่า ρ_b มีค่าสูงกว่าค่า ρ_g มาก เนื่องจากที่บริเวณขอบเกรนไม่มีการจับพันธะที่สมบูรณ์ จึงมีความต้านทานสูง ซึ่งต่างจากบริเวณเกรนเป็นผลึกสมบูรณ์เมื่อได้รับการเจือสารทำให้มีค่าความต้านทานต่ำ จากสมการที่ 6.2 ซึ่งจะเห็นว่ากรณีที่ขนาดเกรนที่มีขนาดใหญ่จะทำให้ได้ค่า $\left[\frac{2W+\delta}{L}\right]$ ต่ำ ทำให้ได้ค่า ρ_b มีค่าน้อย และจะทำให้ได้ค่า ρ น้อยด้วย แต่ในกรณีที่ขนาดเกรนมีขนาดเล็กจะทำให้ได้ค่า $\left[\frac{2W+\delta}{L}\right]$ มาก ทำให้ได้ค่า ρ_b มีค่ามาก เป็นเหตุให้ค่า ρ มากด้วย

6.2 การวิเคราะห์ผลการศึกษาค่าความต้านทานของโพลีซิลิไซด์ที่สร้างจากฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ที่เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเจือในการยิงฝังประจุ

จากผลการทดลองศึกษาค่าความต้านทานของโพลีซิลิไซด์ที่สร้างจากฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ที่เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเจือในการยิงฝังประจุ โดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาณสารเจือเท่ากับ 1.0×10^{16} , 1.3×10^{16} , 1.6×10^{16} และ 2.0×10^{16} ion/cm² ที่พลังงาน 50 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง และเมื่อนำ Poly-Si และ a-Si ไปวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่นด้วยเครื่องวัดโพร์พอยโพรบ พบค่าความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์ม Poly-Si มีค่าเท่ากับ 201.95, 181.73, 158.34 และ 147.07 Ω/\square ตามลำดับ และค่าความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์ม a-Si มีค่าอยู่ในช่วง 123.75, 117.17, 106.2 และ 102.58 Ω/\square ตามลำดับ ที่ปริมาณสารเจือตั้งแต่ปริมาณสารเจือ 1.0×10^{16} , 1.3×10^{16} , 1.6×10^{16} และ 2.0×10^{16} ion/cm² ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าค่าความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์มทั้งสองชนิดมีค่าลดลง ขณะที่ทำการเพิ่มปริมาณสารเจือ ซึ่งอธิบายได้[27] ดังนี้คือ จากสมการที่ 6.2 จะเห็นว่าความต้านทานของโพลีซิลิไซด์แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นขอบเขตของเกรน และส่วนที่เป็นเกรน

เมื่อเราพิจารณาขอบเขตเกรน (grain boundary) โดยมีพฤติกรรมแบบช็อตกีย์ (schottky barrier) ซึ่งทั้งสองด้านเป็นสารกึ่งตัวนำ ดังรูปที่ 6.2 โดยปกติแล้ว กลไกที่เกี่ยวข้องสองกลไก คือ กลไกแบบแรก คือ เทอร์มิโอนิก อิมิสชัน (thermionic emission) ซึ่งบริเวณนี้พาหะจะมีพลังงานเพียงพอ ที่จะข้ามผ่านสิ่งกีดขวาง โดยสามารถทะลุทะลวง (tunneling) หรือ การแพร่ผ่านสิ่งกีดขวาง และในทางอุดมคติของ เทอร์มิโอนิก อิมิสชัน จะถูกรวบรวมไว้กับการทะลุทะลวง แบบควอนตัม (quantum tunneling) ซึ่ง

ได้นำเสนอโดย ทัง (Tamg) ได้อาศัยหลักการนี้มาอธิบาย พฤติกรรมแบบซีดตี และอธิบายขอบเขตเกรน (grain boundary) ของโพลิคริสเตออร์ สำหรับกลไกแบบที่ 2 คือการรวมกันระหว่าง เทอร์มิโอนิก อิมิสชันกับกระบวนการแพร่ ซึ่งได้นำเสนอโดยคุณซิงห์ (Singh) ซึ่งนำไปใช้ในการอธิบายพฤติกรรมระหว่างรอยต่อโลหะกับสารกึ่งตัวนำ (metal semiconductor barrier) จากรูปที่ 6.2 แสดงศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม ในแต่ละด้านของขอบเขตเกรน ในกรณีที่มีปริมาณสารเจือต่ำแสดงดังในรูปที่ 6.2 (ข) จะมีค่าศักย์ ไฟฟ้าตกคร่อมในแต่ละด้านของ ขอบเขตเกรนสูงกว่า ในกรณีที่มีปริมาณสารเจือสูงแสดงดังรูปที่ 6.2 (ก) ดังนั้นเมื่อศักย์ไฟฟ้าสูง ทำให้พาหะข้ามกำแพงศักย์ได้ยากทำให้มีความต้านทานที่สูงกว่ากรณีที่มีกำแพงศักย์ที่ต่ำกว่า ทำให้กรณีที่มีปริมาณสารเจือที่สูงกว่ามีค่าความต้านทานที่ขอบเขตเกรนต่ำกว่า ในกรณีที่มีปริมาณสารเจือที่ต่ำกว่า



รูปที่ 6.2 โครงสร้างของแถบพลังงานที่ขอบเขตเกรน (ก) ปริมาณสารเจือมาก (ข) ปริมาณสารเจือน้อย

เมื่อเราพิจารณาส่วนที่เป็นเกรน ซึ่งภายในเกรนเป็นผลึกสารกึ่งตัวนำ เมื่อได้รับปริมาณสารเจือที่สูงขึ้นแต่กลับได้ค่าสภาพความต้านทานที่ต่ำลง ด้วยความสัมพันธ์ ตามสมการที่ 6.3 [25]

$$\rho = \frac{1}{nq\mu_n + pq\mu_p} \tag{6.3}$$

โดยที่ n คือ ความเข้มข้นสารเจือชนิดเอ็น

p คือ ความเข้มข้นสารเจือชนิดพี

q คือ 1.6×10^{-19} คูโลมปี

μ_n คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอน

μ_p คือ สภาพคล่องของโฮล

จะพบว่าความต้านทานขอบเขตของเกรน และส่วนที่เป็นเกรนมีค่าต่ำลงเมื่อสารเจือเพิ่มขึ้น ดังนั้นความต้านทานของเนื้อฟิล์ม a-Si และ Poly-Si มีค่าต่ำลงเมื่อทำการเพิ่มปริมาณสารเจือ

6.3 การวิเคราะห์การศึกษาโครงสร้างและความต้านทานของ โพลีซีเอสเตอร์ที่สร้างจาก ฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ที่การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการแอนนัล

การศึกษาโครงสร้างและความต้านทานของ โพลีซีเอสเตอร์ที่สร้างจาก ฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ที่การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการแอนนัล โดยการปรับเพิ่มก๊าซออกซิเจนเพื่อเพิ่มชั้นซิลิคอนไดออกไซด์โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นชั้นฉนวนใช้ในการป้องกันการแพร่ออกของสารเจือ (out gas) ในระหว่างทำกระบวนการแอนนัล จากผลการทดลองได้แสดงผลดังรูปที่ 5.10 พบว่าค่าความต้านทานเชิงแผ่น ของ ฟิล์ม Poly-Si และ ฟิล์ม a-Si ที่ใช้เงื่อนไขการ แอนนัล ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 15 hrs ภายใต้บรรยากาศ N₂ และ O₂ มีค่าสูงกว่ากรณีที่ใช้เงื่อนไขการแอนนัล ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 15 hrs ภายใต้บรรยากาศ N₂ เท่ากับ 8.20 % และ 9.05 % ตามลำดับ ดังนั้นจะเห็นว่าการเพิ่มก๊าซออกซิเจนเพื่อเพิ่มชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ไม่ช่วยลดค่าความต้านทานของ โพลีซีเอสเตอร์ได้ ทั้งนี้ปัญหาส่วนหนึ่งมาจากในระหว่างกระบวนการแอนนัลโดยการเพิ่มก๊าซออกซิเจนในระหว่างการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ทำให้ปริมาณสารเจือส่วนหนึ่งในโพลีซีเอสเตอร์เข้าไปอยู่ในชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ทำให้ความต้านทานเพิ่มขึ้น

6.4 การวิเคราะห์การศึกษาความต้านทานของ โพลีซีเอสเตอร์ที่สร้างจาก ฟิล์ม Poly-Si และ a-Si โดยการเพิ่มชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

ศึกษาความต้านทานของ โพลีซีเอสเตอร์ที่สร้างจาก ฟิล์ม Poly-Si และ a-Si โดยการเพิ่มชั้นซิลิคอนไดออกไซด์โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นชั้นฉนวนใช้ในการป้องกันการแพร่ออกของสารเจือ (out gas) ในระหว่างทำกระบวนการแอนนัล จากผลการทดลองได้แสดงผลดังรูปที่ 5.12 พบว่าค่าความต้านทานเชิงแผ่น ของฟิล์ม Poly-Si และ ฟิล์ม a-Si ที่มี ชั้นฉนวนซิลิคอนไดออกไซด์ มีค่าสูงกว่ากรณีที่ไม่มี ชั้นฉนวนซิลิคอนไดออกไซด์เท่ากับ 6.17 % และ 5.86 % ตามลำดับ ดังนั้นจะเห็นว่าเพิ่มชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ไม่ช่วยลดค่าความต้านทานของ โพลีซีเอสเตอร์ได้ ทั้งนี้ปัญหาส่วนหนึ่งมาจากใน

ระหว่างกระบวนการยิงฝังประจุ ทำให้ปริมาณสารเจือส่วนหนึ่งในโพลีซิลิไซด์เข้าไปอยู่ในชั้นฉนวนซิลิคอนไดออกไซด์ ทำให้ความต้านทานเพิ่มขึ้น

6.5 การวิเคราะห์การศึกษาหา ทีซีอาร์

จากผลการทดลองที่ 5.7 ค่าความต้านทานของโพลีซิลิไซด์ โดยการปรับอุณหภูมิ 25-99 องศาเซลเซียส จะได้ค่าดังตารางที่ 5.5 จะเห็นว่าโพลีซิลิไซด์ที่สร้างจากฟิล์ม Poly-Si ที่ปริมาณสารเจือ 1.0×10^{16} - 1.3×10^{16} ion/cm² จะมีค่าความต้านทานลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่วนที่ปริมาณสารเจือ 1.6×10^{16} - 2.0×10^{16} ion/cm² จะมีค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและโพลีซิลิไซด์ที่สร้างจากฟิล์ม a-Si มีค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ทุกปริมาณสารเจือ ในการทดลองนี้

ในรูปที่ 5.19 เมื่อพิจารณาในฟิล์มของ a-Si ที่ปริมาณสารเจือ 1.0×10^{16} , 1.3×10^{16} , 1.6×10^{16} และ 2.0×10^{16} ion/cm² จะได้ค่าของ TCR เท่ากับ 3.05×10^{-4} , 5.04×10^{-4} , 5.09×10^{-4} และ 5.19×10^{-4} / °C ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าค่า TCR ของ a-Si มีค่าเป็นช่วงบวกทุกสารเจือ และมีค่าค่อนข้างคงที่

เมื่อพิจารณาในฟิล์มของ Poly-Si ที่ปริมาณสารเจือ 1×10^{16} , 1.3×10^{16} , 1.6×10^{16} และ 2.0×10^{16} ion/cm² จะได้ค่าของ TCR เท่ากับ -1.32×10^{-4} , -4.12×10^{-5} , 4.12×10^{-5} และ 1.36×10^{-4} ตามลำดับซึ่งจะเห็นว่าค่า TCR ของ ฟิล์ม Poly -Si มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณสารเจือ โดยมีค่าเป็นช่วงลบในช่วงปริมาณสารเจือ 1.0 - 1.5×10^{16} ion/cm² และมีค่าเป็นช่วงบวกที่ปริมาณสารเจือมากกว่า 1.5×10^{16} ion/cm² ซึ่งค่า TCR มีค่าเป็นช่วงลบซึ่งจะทำให้มีคุณสมบัติคล้ายกับ Schottky barrier เป็นเหตุให้เมื่อนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจจับความดันจะไม่สามารถควบคุมให้เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิเชิงเส้นได้[27]

เมื่อเปรียบเทียบค่า TCR ระหว่างเนื้อฟิล์มของ a-Si กับ Poly-Si จะพบว่า ค่า TCR ของ a-Si มีค่ามากกว่า Poly-Si ทุกสารเจือ

จากคุณสมบัติดังกล่าวทำให้เราเลือก ฟิล์ม a-Si ในการนำไปสร้าง เป็นโพลีซิลิไซด์ในการตรวจจับความดัน และปริมาณสารเจือที่เราเลือกคือ 1.3×10^{16} ion/cm² เนื่องจากได้ค่า TCR เท่ากับ 5.04×10^{-4} / °C เมื่อเทียบกับ สารเจือปริมาณ 1.6×10^{16} ion/cm² และ 2.0×10^{16} ion/cm² ได้ค่า TCR เท่ากับ 5.09×10^{-4} / °C และ 5.19×10^{-4} / °C ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าต้องเจือสารเพิ่มขึ้นจาก 1.3×10^{16} ion/cm² เท่ากับ 23.07% และ 58.83% เพื่อให้ได้ TCR เพิ่มขึ้น เท่ากับ 0.99% และ 2.98% ซึ่งเป็นปริมาณเพิ่มขึ้นน้อยมาก

บทที่ 7

สรุป

จากงานวิจัยทั้งหมดที่ได้นำเสนอไว้ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ โดยมีเนื้อหาที่สอดคล้องกับความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษาที่ได้ถูกกำหนดไว้แต่แรก (ในบทที่ 1) คือ การลดความต้านทานเปียชหรือ โพลีซีสเตอร์ภายในอุปกรณ์ตรวจจับความดัน เพื่อมุ่งเน้นให้ลดค่าความต้านทานรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับโพลีซิลิคอนและ ทำให้ได้ค่า ทีซีอาร์มีค่าเป็นบวก ซึ่งเป็นค่าในช่วงที่ค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิในลักษณะเชิงเส้น ภายใต้เงื่อนไขในการแอนนีส 800 องศาเซลเซียส หลังการยิงฝัประจุ ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่ค่อนข้างต่ำสำหรับกระบวนการแอนนีส เพราะไม่ต้องการให้มีผลกระทบกับโครงสร้างของไดอะแฟรม ของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน ซึ่งอุณหภูมิสูงกว่านี้จะมีผลกระทบต่อ การแตกเสียหายของไดอะแฟรมได้ สำหรับผลการวิจัยได้สรุปวาระสำคัญได้ดังนี้

ได้ทำการทดลองเตรียมชิ้นงานสร้างฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ด้วยเทคนิค LPCVD ได้เงื่อนไขการสร้างที่เหมาะสม คือ อัตราการจ่ายก๊าซ SiH_4 ที่ 150 sccm ความดันภายในห้องควอทซ์ที่ 450 mtor และหลังจากนั้นนำไปวัดคุณสมบัติฟิล์มพบว่า ฟิล์ม Poly-Si ได้ค่าดัชนีหักเห (n) เท่ากับ 3.9 และมีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (k) เท่ากับ 0.058 ซึ่งตรงคุณสมบัติมาตรฐานของ Poly-Si สำหรับฟิล์ม a-Si ได้ค่าดัชนีหักเห (n) เท่ากับ 4.5 และมีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (k) เท่ากับ 0.232 ซึ่งตรงกับคุณสมบัติมาตรฐานของ a-Si สำหรับรายละเอียดของคุณสมบัติมาตรฐานของฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ให้พิจารณาในภาคผนวก ข

ทำการศึกษาคูสมบัตินของฟิล์ม Poly-Si และ a-Si หลังกระบวนการยิงฝัประจุ พบว่าค่าความต้านทานเชิงแผ่นของ a-Si มีค่าต่ำกว่า Poly-Si หลังจากกระบวนการเจือสารที่ปริมาณสารเจือเดียวกัน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผิวหน้าแผ่นฟิล์มด้วยเครื่อง SEM พบว่าเมื่อนำผิวหน้าของชั้นฟิล์ม a-Si และ Poly-Si หลังการยิงฝัประจุ และ แอนนีส มาเปรียบเทียบกันจะพบว่าขนาดเกรนของชั้นฟิล์ม a-Si มีค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าของชั้นฟิล์ม Poly-Si

ทำการศึกษาความต้านทานของโพลีซีสเตอร์ที่สร้างจาก ฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ที่เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเจือในกระบวนการยิงฝัประจุ พบว่าค่าความต้านทานของฟิล์ม โพลีซีสเตอร์ที่สร้างจากฟิล์ม Poly-Si และ a-Si มีค่าลดลงเมื่อทำการเพิ่มปริมาณสารเจือในการยิงฝัประจุ และเมื่อนำมาเปรียบเทียบค่าความต้านทานเชิงแผ่นฟิล์ม Poly-Si กับค่าความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์ม a-Si จะ

พบว่าค่าเฉลี่ยของค่าความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์ม โพลีซิลิไซด์ที่มีค่ามากกว่าฟิล์ม a-Si เท่ากับ 34.38 % ซึ่งเป็นค่าค่อนข้างมาก

ทำการศึกษาโครงสร้างและความต้านทานของโพลีซิลิไซด์ที่สร้างจาก ฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ที่การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการแอนนัล พบว่ามีค่าความต้านทานเชิงแผ่น ของ ฟิล์ม Poly-Si และ ฟิล์ม a-Si เพิ่มขึ้น 9.05 % และ 8.20 % ตามลำดับ

ทำการศึกษาความต้านทานของโพลีซิลิไซด์ที่สร้างจาก ฟิล์ม Poly-Si และ a-Si โดยการเพิ่มขึ้นซิลิคอนไดออกไซด์ พบว่ามีค่าความต้านทานเชิงแผ่น ของฟิล์ม Poly-Si และ ฟิล์ม a-Si เพิ่มขึ้น 6.17 % และ 5.86 % ตามลำดับ

ทำการศึกษาความต้านทานรอยสัมผัสระหว่างผิวโพลีซิลิไซด์ที่ได้รับการเชื่อมกับ โลหะ (Contact Resistance: R_c) พบว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณสารเจือ ลงบนฟิล์ม Poly-Si และ a-Si นอกจากมีผลให้ค่าความต้านทานเชิงแผ่นลดลง แล้วยังมีผลให้ค่า R_c มีผลลดลงเช่นกัน และเมื่อนำฟิล์มทั้งสอง ชนิดมาเปรียบเทียบกัน พบว่าค่า R_c ที่สร้างมาจากฟิล์ม Poly-Si มีค่ามากกว่า ฟิล์ม a-Si ที่ทุกเงื่อนไข ปริมาณสารเจือในการยึ่งฝั่งประจุ มีสาเหตุมาจากสภาพความต้านทานของฟิล์ม Poly-Si มากกว่า ฟิล์ม a-Si และ ขนาดเกรนของฟิล์ม Poly-Si มีขนาดเล็กกว่าฟิล์ม a-Si

ทำการศึกษาค่า TCR พบว่าค่า TCR ของ ฟิล์ม Poly -Si มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณ สารเจือ โดยมีค่าเป็นช่วงลบในช่วงปริมาณสารเจือ $1.0-1.5 \times 10^{16}$ ion/cm² และมีค่าเป็นช่วงบวก ที่ ปริมาณสารเจือมากกว่า 1.5×10^{16} ion/cm² ซึ่งค่า TCR มีค่าเป็นช่วงลบและค่า TCR ของ a-Si มีค่าเป็น ช่วงบวกทุกสารเจือ และมีค่าค่อนข้างคงที่ นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบค่า TCR ระหว่างเนื้อฟิล์ม ของ a-Si กับ Poly-Si จะพบว่า ค่า TCR ของ a-Si มีค่ามากกว่า Poly-Si ทุกสารเจือ

การทดสอบนำโพลีซิลิไซด์ไปใช้ในกระบวนการสร้างเซ็นเซอร์ตรวจจับความดัน เราได้ เจริญใจในการสร้างโพลีซิลิไซด์ โดยเลือก ฟิล์ม a-Si ที่การยึ่งฝั่งประจุชนิดพีทีปริมาณ 1.3×10^{16} ion/cm² และพลังงาน 50 keV และการแอนนัล ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศในโตรเจนได้ความต้านทานเชิงแผ่น เท่ากับ $117 \Omega/\square$ ไปสร้างในอุปกรณ์ตรวจจับ ความดัน หลังจากนั้นทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเปียโซรีซีฟทีป กับการ เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบนอุปกรณ์ตรวจจับความดัน พบว่าทำการเพิ่มอุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่า ความต้านทาน เปียโซรีซีฟทีป จะมีค่าเพิ่มขึ้น และมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น หลังจากนั้นการศึกษาความสัมพันธ์ ระหว่าง ความต้านทานเปียโซรีซีฟทีป หรือ โพลีซิลิไซด์ กับการเปลี่ยนแปลงความดัน พบว่าเมื่อทำ การเพิ่มค่าความดันความต้านทานเปียโซรีซีฟทีปจะเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้น และต่อเข้ากับวงจรวีทสโตน บริดจ์ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดัน-แรงดันไฟฟ้า พบว่า เมื่อเพิ่มความดัน ค่าแรงดันไฟฟ้าก็

มีการเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้น และสามารถหาค่าความไวของอุปกรณ์ตรวจจับความดันได้ เท่ากับ $1.2 \mu\text{V/V/kPa}$

จากการทดลองทั้งหมดนี้ทำให้สามารถเลือกเทคนิคการสร้างโพลีซิลิไซด์อร์ ที่มีความต้านทานต่ำ โดยสร้างจากฟิล์ม a-Si ด้วยเทคนิค LPCVD และใช้ปริมาณสารเจือ $1.3 \times 10^{16} \text{ ion/cm}^2$ และพลังงาน 50 keV และ การแอนนีส ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนอย่างเฉียว ซึ่งได้ค่าความต้านทานต่ำ ในการนำไปสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดัน

สำหรับข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อไปคือการเพิ่มอุณหภูมิมากกว่า 800 องศาเซลเซียส จะมีผลทำให้ความต้านทานต่ำลงเช่นกัน แต่จะต้องหาวิธีที่จะไม่ทำให้แผ่นไดอะแฟรมเกิดการเสียหาย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Julian W. Gardner. *Microsensors, MEMS and Smart Devices*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd. 2001
- [2] Wolf, S. and Tauber. *Silicon Processing For VLSI Vol. 1- Process Technology*. California: Lattice Press. 1986
- [3] Wolf, S. and Tauber. *Silicon Processing For VLSI Vol. 3: The Submicron MOSFET*. California: Lattice Press. 1995
- [4] Micheal Quirk and Julian Serda. *Semiconductor Manufacturing Technology*: Prentice-Hall Inc. Upper Saddle River, New Jersey .2001
- [5] Alan B. Grebene. *Bipolar and MOS Analog Integrated Circuit Design*. New York: John Wiley & Sons.1984
- [6] การุณ แซ่จอก, มนตรี แสนละมุล, สุวัฒน์ โสภิตพันธ์, ภาวัน สยามชัย และ อธิธิ ฤทธาภรณ์ . “การศึกษาอุปกรณ์กำเนิดประจุชนิด เบอร์นาสในเครื่องยิงฝึงประจุสำหรับกระบวนการผลิต วงจรรวม.” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า, ครั้งที่ 27, พ.ศ. 2547, หน้า 269-272
- [7] มนตรี แสนละมุล , การุณ แซ่จอก , อัมพร โพธิ์ไย, ภาวัน สยามชัย และ อธิธิ ฤทธาภรณ์. “เทคนิคการยิงฝึงประจุปริมาณสารเจือสูงด้วยเครื่องยิงฝึงประจุกระแสขนาดกลาง” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า, ครั้งที่ 27, พ.ศ. 2547, หน้า 257-260
- [8] การุณ แซ่จอก, มนตรี แสนละมุล, อนุชา เรืองพานิช, ออกัสกษณ์ เขาวิจิธารัตน์ , สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และ อัมพร โพธิ์ไย, “การพัฒนาการสร้างบ่อชนิดเอ็นโดยปรับเพิ่มอุณหภูมิการแอนนีส สำหรับ วงจรรวม 0.8 μ m CMOS” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า, ครั้งที่ 29, ปี 2549, หน้า 685-688
- [9] การุณ แซ่จอก, มนตรี แสนละมุล, อนุชา เรืองพานิช, สุวัฒน์ โสภิตพันธ์, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และ อัมพร โพธิ์ไย, “การศึกษาการยิงฝึงประจุในการสร้างบ่อชนิดเอ็น สำหรับวงจรรวม 0.8 μ m CMOS”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า, ครั้งที่ 28, พ.ศ. 2548, หน้า 1073-1076
- [10] W.G Pfann and P.N. Thurston. “Semiconducting Stress Transducers Utilizing the Transverse and Shear Piezoresistance Effects.” J. Apply. Phys, vol32, Oct 1996, pp.2008-2009.
- [11] S.M.Sze. *Semiconductor Sensor*. USA: John Willy& Sons, Inc. 1994.

- [12] Samuel K. Clark and Kensall D. Wise. "Pressure Sensitivity in Anisotropically Etched Thin-Diaphragm Pressure Sensors." *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. ED-26, No.12, Dec 1979, pp.1887-1896
- [13] รัชฎูญะ สักคีโสภณัฐ. "ทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดซิลิคอนแบบเปียโซรีซีสทีปบนไดอะแฟรมบาง." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2534
- [14] Duane Tandeske. *Pressure Sensor Selection And Application*. New York: Marcel Dekker Inc.1991
- [15] โรเบิร์ต เอฟ. ค็อพลินและเฟรเดอริก เอฟ. คริสคอลล์. การใช้งานออปแอมป์และลิเนียร์ไอซี. แปลโดยวิโรจน์ อัสวรังสี และคณะ. กรุงเทพฯ: บริษัท เอช.เอ็น.กรุ๊ป จำกัด.2536
- [16] วิน บรรจงปรุ, อนุชา เรืองพานิช, โอภาส ตริทวิศักดิ์ และ อัมพร โพธิ์โย. "การศึกษา Si-Precipitate บริเวณรอยต่อ AlSiCu/Si เพื่อลดค่าความต้านทานรอยต่อโลหะสารกึ่งตัวนำสำหรับกระบวนการผลิตระบบเครื่องกลไฟฟ้าระดับจุลภาค." การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า, ครั้งที่ 28, ปี 2548, หน้า 1173-1176
- [17] นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง. " การศึกษาคุณสมบัติลูมินิสเซนซ์ของชั้นพอร์สซิลิคอน." วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง. พ.ศ. 2544, หน้า 61-67
- [18] Chien Chou, Hui-Kang Teng, Chih-Jen Yu and Hong-Sheng Huang. "Polarization modulation imaging ellipsometry for thin film thickness measurement" *Optics Communications*, 2006, pp.032-042
- [19] รศ.ดร.สมเกียรติ สุกเดช. *เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์*. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร :แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ พระจอมเกล้าลาดกระบัง. 2544
- [20] Liwei Lin, Huey-Chi Chu, and Yen-Wen Lu. " A Simulation Program for the Sensitivity and Linearity of Piezoresistive Pressure Sensor" *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol.8, No.4, 1999, pp.514-522
- [21] E.Kalvesten, L.Smith, L.Tenerz and G.Stemme. " The First Surface Micromachined Pressure Sensor For Cardiovascular Pressure Measurements" *IEEE*, 1998, pp574-579

- [22] B.Driz, I.Zarotskiy, J.Hoehn, V.I. Polyakov, A.I. Rukovishnikov and V.Novotny “Direct ion beam deposition of hard (>30GPa) diamond-like film from RF inductively coupled plasma source” *Diamond and Related Materials*,2001,pp 931-93
- [23] M. Modreanu. “ Optical Properties of silicon thin films related to LPCVD growth condition.” *Thin Solid Films*, 450, 2004. pp.105-110
- [24] การุณ แซ่จอก, มนต์รี แสนละมุล, ชาญเดช หรุอนันต์, เอกลักษณ์ เขาวีวารัตน์, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และ อัมพร โพธิ์โย. “การศึกษาความต้านทานของโพลีซิลิคอน และ อมอร์ฟัสซิลิคอนหลังการยิงฟุ้งประจุ สำหรับ เซนเซอร์วัดความดัน.” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า, ครั้งที่ 28, ปี 2548, หน้า 117-1120
- [25] **Karoon Saejok**, Ekalak Chaowicharat, Montree Saenlamool, Kowit Sowsuwan, Charndet Hruanun, Surasak Niemcharoen and Amporn Poyai. “Study of Polycrystalline and Amorphous Silicon Film Resistance as Resistor in Piezoresistive Pressure Sensor.” *ICAS2006*, Vol. 1, November 2006, pp.590-598
- [26] การุณ แซ่จอก, กิตติ เสนานูรณ์, สุวัฒน์ โสภิตพันธ์, ภาวัน สยามชัย และ อธิธิ ฤทธาภรณ์ “การพัฒนาระบบการปลูกฟิล์มโลหะหลายชั้นด้วยเทคนิคสปีดเตอร์ริงสำหรับการสร้างวงจรรวม”ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 26, ปี 2546, หน้า 1391-1395
- [27] French, P.J. “Polysilicon: a versatile material for Microsystems.” *Sensor and Actuators A* 99, 2002. pp. 3- 12.
- [28] Gupta, S. “Effect of Boron and BF₂⁺ Implant on Polysilicon Resistors.” *Journal of The Electrochemical Society*, 149(4), 2002. pp. G271 – G275

ภาคผนวก ก.
ค่าคงที่ทางฟิสิกส์

ตารางที่ ก1 ค่าคงที่ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ มีดังต่อไปนี้

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
ค่าคงที่ของพลังค์	h	6.63×10^{-34}	J.s
ประจุอิเล็กตรอน	q	1.60×10^{-19}	C
ค่าคงที่ของโบสท์มานด์	k	1.38×10^{-23}	J/K
เปอร์มิติวิตีในสุญญากาศ	ϵ_0	8.85×10^{-14}	F/cm

ภาคผนวก ข.

ตารางมาตรฐานการวัดเครื่องอิลลิปโซมิเตอร์

FE III FOCUS ELLIPSO METER

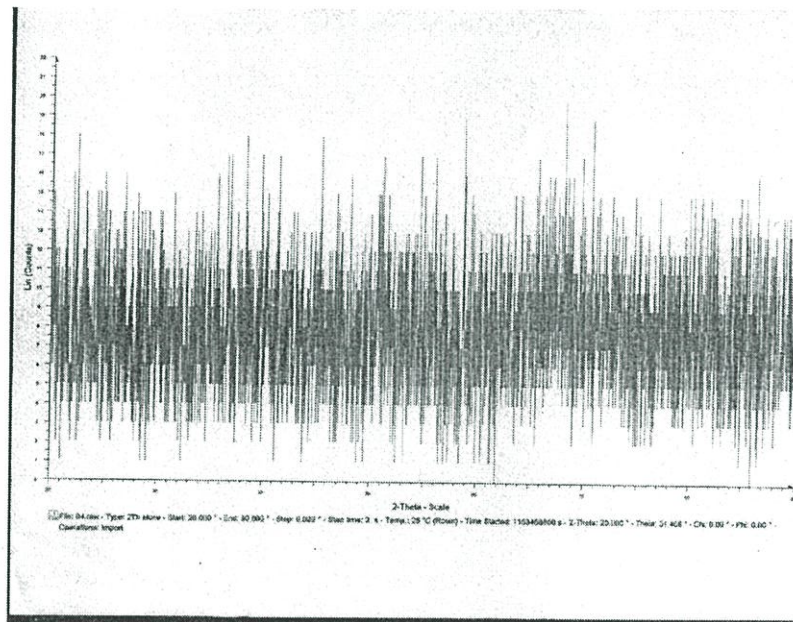
SOFTWARE SPECIFICATIONS

Mapping:	2D and 3D color & black/ white.
Recipe Creator:	Software for creating a wafer recipe. User can choose film stack and parameter for result.
Interactive Mode:	Provides semi-automatic operation of the FOCUS Ellipsometer.
Operator Program:	Allows the user to run recipes and monitor the data in real time.

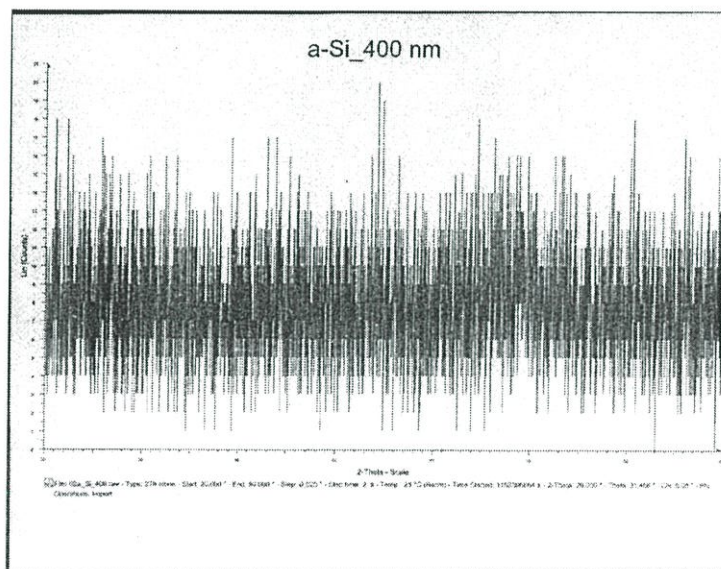
FOCUS ELLIPSO METER MATERIAL SPECTRA LIBRARY VALUES

MATERIAL	N(633)	K(633)	dN(780)	K2(780)
A-Si	4.5180	0.2320	-0.3870	0.0380
A-Si EMA	4.5170	0.2320	-0.3868	0.0380
AIR	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
AL	0.9800	6.4900	0.9700	7.4700
AL203	1.7600	0.0000	-0.0060	0.0000
ALCU	1.1390	5.9910	0.8480	6.5450
CARBIDE	2.6100	0.0000	-0.0670	0.0000
CARBON	2.0000	0.6000		
E-RESIST	1.5300	0.0000	-0.0050	0.0000
GAAS	3.8560	0.1960		
GAAS-OX	1.8500	0.0000		
I-TIN-OX	1.8000	0.0000		
N-RESIST	1.6200	0.0000	-0.0090	0.0000
OXINTER	2.8000	0.0000	-0.0890	0.0000
OXYNITRD	1.7500	0.0000	-0.0080	0.0000
P-RESIST	1.6400	0.0000	-0.0090	0.0000
POLY-SI	4.0000	0.0580	-0.2100	0.0250
POLY-EMA	3.9870	0.0590	-0.2185	0.0124
POLYIMID	1.6900	0.0000	-0.0150	0.0000
POLYINTR	3.3800	0.0500	-0.1600	0.0200
PT-SI	4.7430	0.8730		
SI	3.8580	0.0180	-0.1780	0.0063
SI3N4	2.0000	0.0000	-0.0120	0.0000
SIO2	1.4620	0.0000	-0.0030	0.0000
TA205	2.1000	0.0000		
TEOS	1.4500	0.0000	-0.0030	0.0000
TI	2.1600	2.9300	0.7100	3.3300
TIN	1.2100	2.6630	0.2050	3.5780
TIN-Seed	0.8580	2.5380	-0.0030	3.6360
TIO2	2.8800	0.0000		
TIS2	2.6930	2.6060	0.2950	2.7660
TIS2-Den	2.6930	2.3550	0.2950	2.4570
W-SI	3.8930	2.4160		

ภาคผนวก ค.
ผลการวัด a-Si จากเครื่อง XRD



ค่ามาตรฐาน a-Si จากเครื่อง XRD



ผลการวัด a-Si จากเครื่อง XRD

ภาคผนวก ง.

ความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณสารเจือ กับ ความหนาแน่นอะตอม
 สารเจือ กับ พลังงานการยิงฝังประจุ

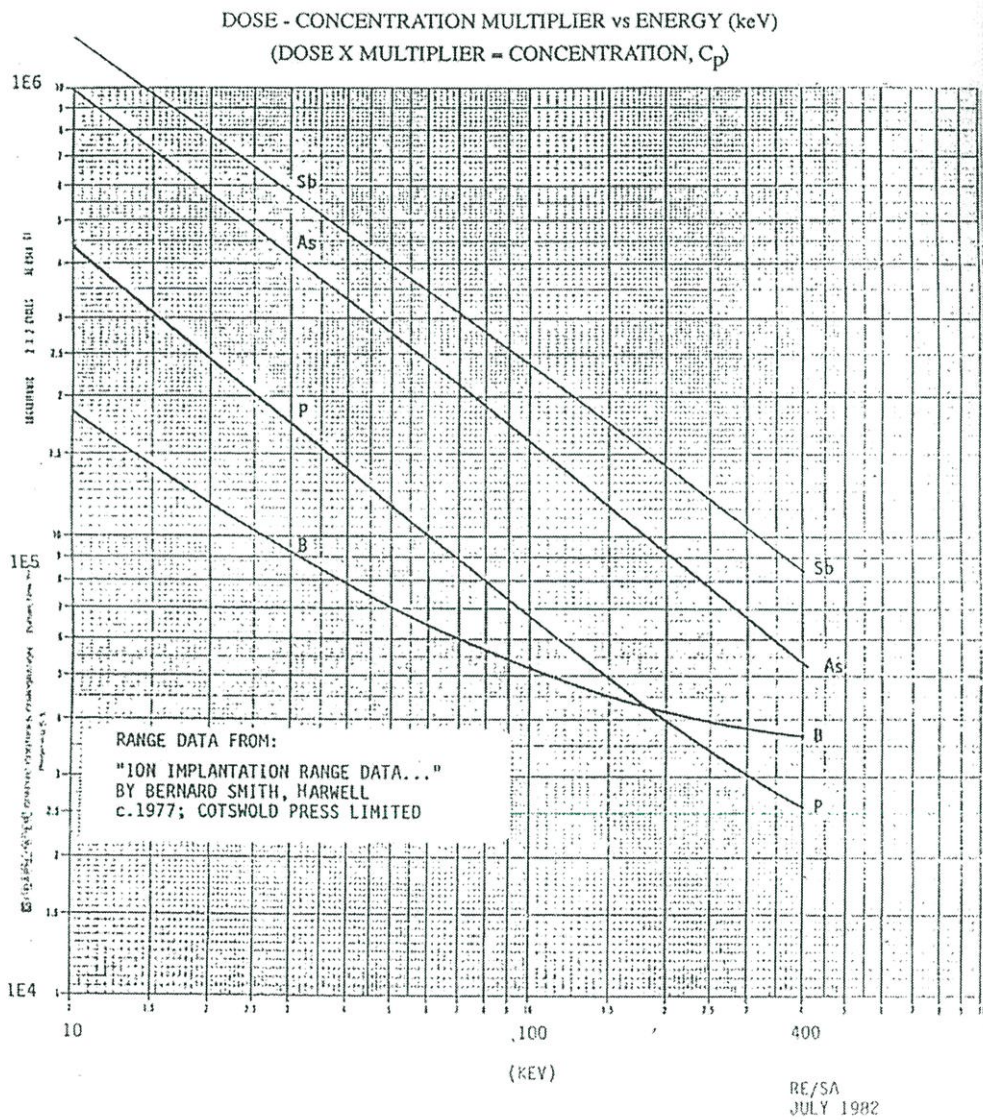


Table 3-2
 Dose - Concentration Multiplier

ภาคผนวก จ.

ตารางความลึกในการยิงฝังประจุ

Energy (keV)	Boron		Phosphorus		Arsenic		Antimony	
	R_p	ΔR_p	R_p	ΔR_p	R_p	ΔR_p	R_p	ΔR_p
10	0.034	0.021	0.015	0.009	0.010	0.004	0.009	0.003
20	0.062	0.034	0.026	0.016	0.016	0.007	0.014	0.005
30	0.100	0.043	0.038	0.022	0.022	0.009	0.019	0.007
40	0.131	0.051	0.050	0.028	0.027	0.012	0.023	0.008
50	0.162	0.057	0.062	0.033	0.032	0.014	0.027	0.010
60	0.191	0.062	0.074	0.039	0.037	0.016	0.031	0.011
70	0.220	0.066	0.087	0.044	0.043	0.018	0.035	0.012
80	0.248	0.070	0.099	0.050	0.048	0.020	0.038	0.013
90	0.274	0.073	0.112	0.055	0.053	0.022	0.042	0.015
100	0.299	0.076	0.125	0.059	0.058	0.024	0.046	0.016
120	0.348	0.081	0.151	0.069	0.068	0.028	0.053	0.018
140	0.394	0.085	0.177	0.078	0.078	0.032	0.060	0.021
160	0.438	0.088	0.204	0.086	0.088	0.036	0.067	0.023
180	0.479	0.091	0.230	0.094	0.099	0.039	0.074	0.025
200	0.519	0.093	0.256	0.101	0.109	0.043	0.081	0.028
240	0.595	0.097	0.309	0.114	0.130	0.050	0.094	0.032
280	0.665	0.101	0.362	0.126	0.141	0.054	0.108	0.036
300	0.699	0.102	0.389	0.132	0.152	0.058	0.115	0.038
320	0.732	0.103	0.415	0.137	0.163	0.061	0.122	0.040
360	0.795	0.105	0.467	0.147	0.174	0.065	0.135	0.045
400	0.855	0.107	0.518	0.156	0.218	0.078	0.149	0.049
500	0.955	0.111	0.638	0.174	0.274	0.094	-----	-----
750	1.329	0.118	0.916	0.206	0.417	0.130	-----	-----
1000	1.647	0.124	1.165	0.228	0.561	0.160	-----	-----
2000	2.846	0.139	1.980	0.270	1.129	0.250	-----	-----

Ref: Smith, B.: "Ion Implantation Range Data..."
Cotswald Press. 1977. (Harwell)

Range Data for Common Dopants into Silicon
(in microns, multiply by 10,000 for Å)

ภาคผนวก จ
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

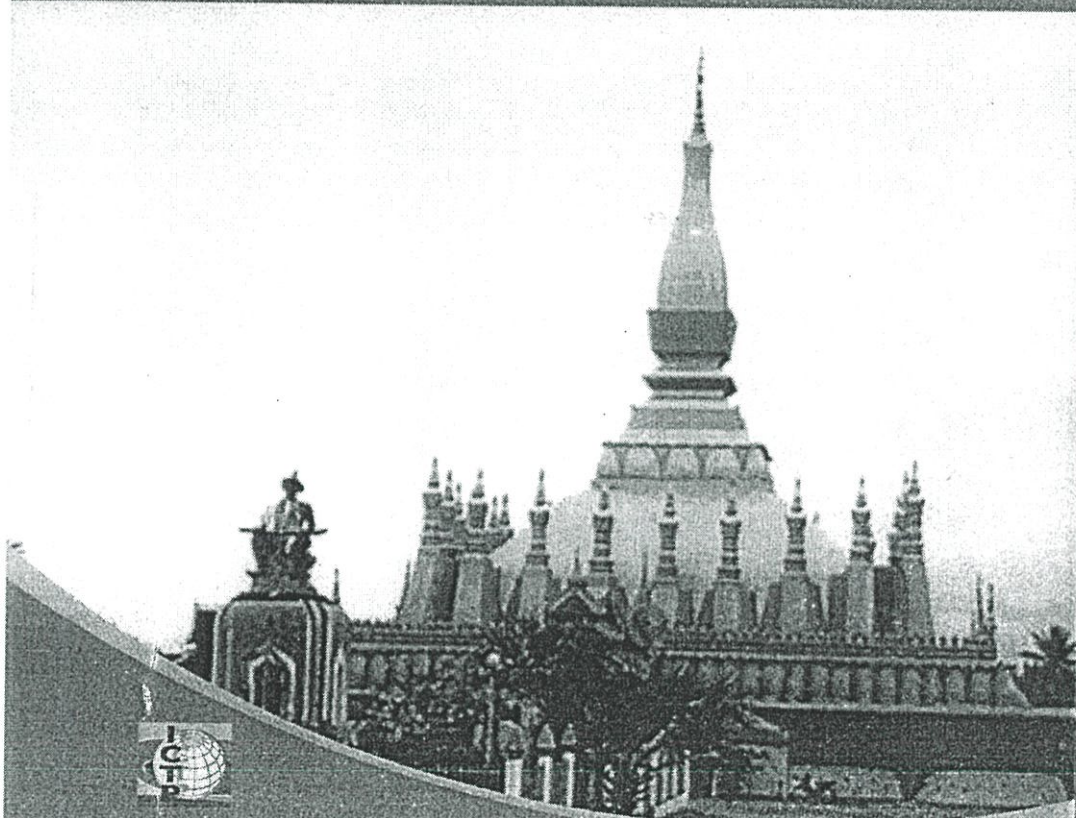


ISSN 1905-6702

Laos Journal on Applied Science

Vol.1 No.1 November 2006

SPECIAL ISSUE



Co-Sponsored by : ICTP

1st International Conference On Applied Science (ICAS 2006)
5-7 November 2006
Vientiane, Laos

Organizers : Faculty of Science
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Faculty of Science, National University of Laos

Study of Polycrystalline and Amorphous Silicon Film Resistance as Resistor in Piezoresistive Pressure Sensor

Karoon Saejok^{1,2}, Ekalak Chaowicharat¹, Montree Saenlamool¹, Kowit Sowsuwan¹,
Chamdet Hruanun¹, Surasak Niemcharoen² and Ampom Poyai¹

¹Thai Microelectronics Center (TMEC),

National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC),

51/4 Moo 1, Wangtakien District, Amphur Mueang, Chachoengsao 24000, Thailand

Tel: +66-3885700 to 9, Fax: +66-3885-7175, Email: karoon.saejok@nectec.or.th

²Electronic Research Center, Department of Electronics, Faculty of Engineering,

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,

Chalongkrung Road, Ladkrabang

Bangkok 10520, Thailand

ABSTRACT

This paper focuses on improving the properties of polysilicon based resistor in piezoresistive pressure sensor (poly-resistor) by examining various properties. The first experiment examines the difference between two types of silicon film namely: polycrystalline silicon and amorphous silicon. The examination concentrated on sheet resistance after ion implantation and annealing. The measurement using four point probe showed that sheet resistance of amorphous silicon is lower than polysilicon by 34.38%. The difference was attributed to the grain size after annealing of amorphous silicon which is significantly larger than the polysilicon. The next experiment concerned the relationship between contact resistance, film types, and sheet resistance. The Crossed Bridge Kelvin (CBK) structure was used to measure the contact resistance. It will be shown that contact resistance is strongly related to sheet resistance. However, silicon film type is indirectly related to the contact resistance. The final experiment found that the Temperature Coefficient of Resistance of amorphous silicon is positive and consistently higher than polysilicon for all of the implantation doses used.

A pressure sensor was fabricated using this condition of low sheet resistance for piezoresistor has sensitivity of $0.12 \text{ mV/V/kgf/cm}^2$. This paper will be useful for choosing film type and annealing technique for sensors which need low sheet resistance because it can reduce contact resistance and increase sensitivity while keeping the dose of ion implantation at manageable level.

KEYWORDS: Polysilicon, amorphous silicon, ion implantation, sheet resistance, contact resistance, temperature coefficient

1. INTRODUCTION

This research investigates the fabrication of polysilicon based resistor (poly-resistor) to support our integrated circuit and MEMS fabrication technologies. For example, CMOS transistors require polysilicon to be used as gate electrodes, likewise, certain type of MEMS pressure sensor also used poly-resistor as strain gauge.

Poly-resistors are normally fabricated from two types of film: polysilicon and amorphous silicon. After which, the film will be doped to the desired level using an ion implantation technique. There are other doping techniques, such as spin dope [3], that are less time consuming. However, the resulting doping level is less controllable than the ion implantation. Therefore, in this study, the ion implantation technique was chosen, because it can control the resistance more accurately. After the implantation, the doped film will need to be annealed to activate the doping ions. The resistance of poly-resistor will depend on the doping concentration.

The fabrication of poly-resistor with low resistance will need to control the temperature coefficient of resistance (TCR) to be higher than zero, otherwise the property of the resistor will be similar to Schottky barrier. As a result, the response of the pressure sensor will be nonlinear [4].

To achieve a low resistance value, it is necessarily to use high level of doping concentration, hence, requiring a long period of time and also high ion current [5]. In this study, it is essential that an appropriate annealing conditions and thin film selection be chosen, so that a low resistance poly-resistor can be fabricated without over usage of the ion implanter. Furthermore, contact resistance can also affect a piezoresistive pressure sensor. This study will achieve low contact resistance by reducing the sheet resistance of the poly-resistor.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 The study of sheet resistance of poly-resistor fabricated from polysilicon and amorphous silicon

The process flow for this experiment is shown in figure 1. The experiment started with n-type $\langle 100 \rangle$ silicon wafers with $6 \Omega\text{-cm}$ resistivity. Silicon dioxide of 100 nm was then thermally grown. After that, LPCVD Si_3N_4 was deposited to the thickness of 70 nm. The experiment was then splitted into two parts:

2.1.1 The first part (wafer no.1) involved the deposition of 400 nm polysilicon film using LPCVD technique at 625°C .

2.1.2 The second part (wafer no.2) involved the deposition of 400 nm amorphous silicon film using LPCVD technique at 560°C .

The two parts of experiment will be combined for the rest of this experiment.

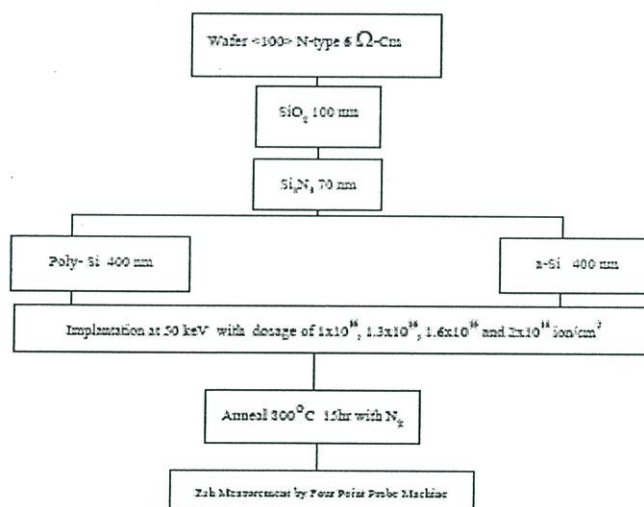


Figure 1. The process flow for this experiment.

2.1.3 Both wafers were then ion implanted with Boron ($_{11}\text{B}^+$) at 50 keV. The dosages were 1.0×10^{16} , 1.30×10^{16} , 1.6×10^{16} and 2.0×10^{16} ion/cm² with the dosage mapping as shown in

figure 2. This was achieved by photolithography technique to mask the appropriate sections of the wafers.

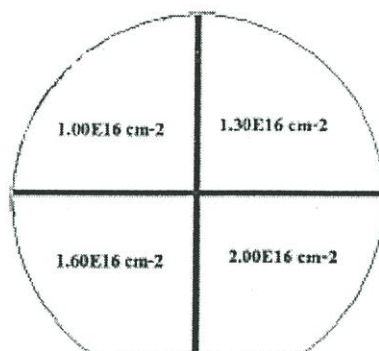


Figure 2. Wafer mapping.

2.1.4 The wafers were then annealed at 800 °C for 15 hours in N_2 atmosphere with the flow of 10 liter/min. After that, the sheet resistance of each section was measured using four point probe. The result is shown in figure 3.

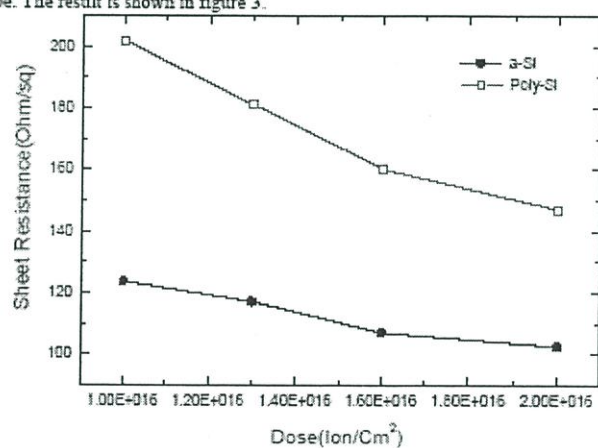


Figure 3. Sheet resistance (Ohm/□) on wafer no.1 and no.2.

2.1.5 The scanning electron micrographs for both wafers shows grain size for wafer no.1 and wafer no.2 in figure 4 and figure 5 respectively.

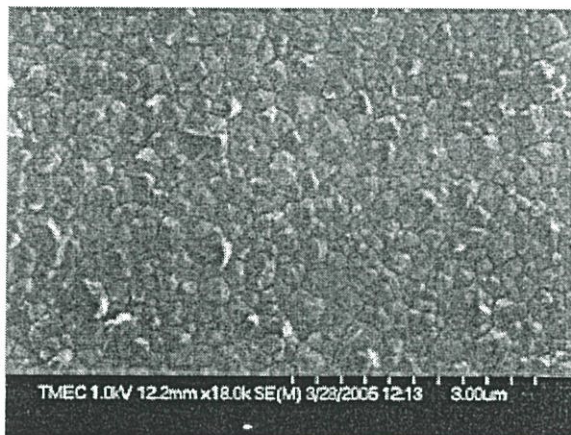


Figure 4. Polysilicon film after ion implantation and annealing.

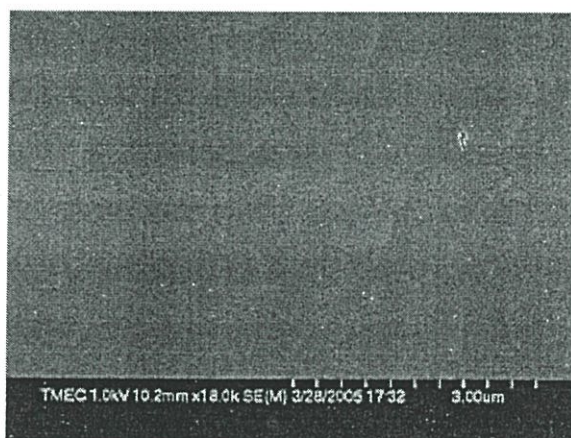


Figure 5. Amorphous silicon after ion implantation and annealing.

2.2 The study of contact resistance.

This is the study of contact resistance between the surface of doped polysilicon film and metal (aluminum). The contact resistance (R_c) can be measured using the Cross Bridge Kelvin (CBK) structure [7]. It can be calculated from the following equation:

$$R_c = \frac{V_H - V_L}{I_{in}} \quad (1)$$

The experiment has the following steps.

2.2.1 Using the photolithography technique, the patterns of CBK structure were printed on both wafers from the previous experiment.

2.2.2 The silicon film was then patterned using dry etching technique. The remaining photoresist was subsequently removed using both oxygen plasma ashing and wet chemical cleaning.

2.2.3 TEOS based silicon dioxide was deposited using LPCVD technique on top of the CBK structures.

2.2.4 Square holes of 10 μm x 10 μm were opened using dry etching technique to be used as contact holes.

2.2.5 500 nm of Al alloy (Al (98%): Cu (0.5%): Si (1.5%)) was sputtered on top of both wafers.

2.2.6 Using the photolithography technique, the patterns of metal wires and pads were printed on both wafers.

2.2.7 The metal film was patterned using dry etching technique. The resulting CBK structure is shown in figure 6. After removing the photoresist, the wafers were sintered at 450 $^{\circ}\text{C}$ for 45 minutes inside 3% H_2 / 97% N_2 atmosphere.

2.2.8 The result is shown in table 1 and figure 7.

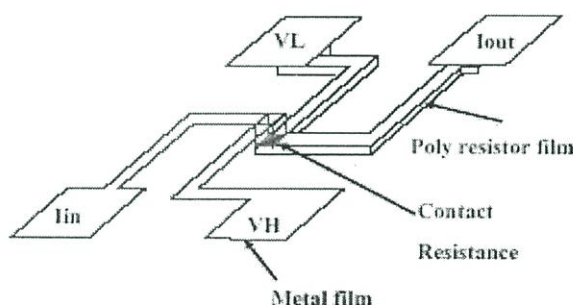


Figure 6. Cross Bridge Kelvin Structure

Film type for Poly-resistor	Dose (ions/cm ²)	Sheet Resistance (Ohm/sq)	Contact Resistance(Ohm) (10 μm x10 μm)
Polysilicon	1.00x10 ¹⁵	201.9	38.9
	1.30 x10 ¹⁵	181.7	35.1
	1.60 x10 ¹⁵	158.3	31.2
	2.00 x10 ¹⁵	147.1	28.6
Amorphous silicon	1.00 x10 ¹⁵	123.7	24.1
	1.30 x10 ¹⁵	117.2	23.2
	1.60 x10 ¹⁵	106.2	22.3
	2.00 x10 ¹⁵	102.6	21.3

Table 1. The measurement result of sheet resistance and contact resistance with respect to film types and implantation doses.

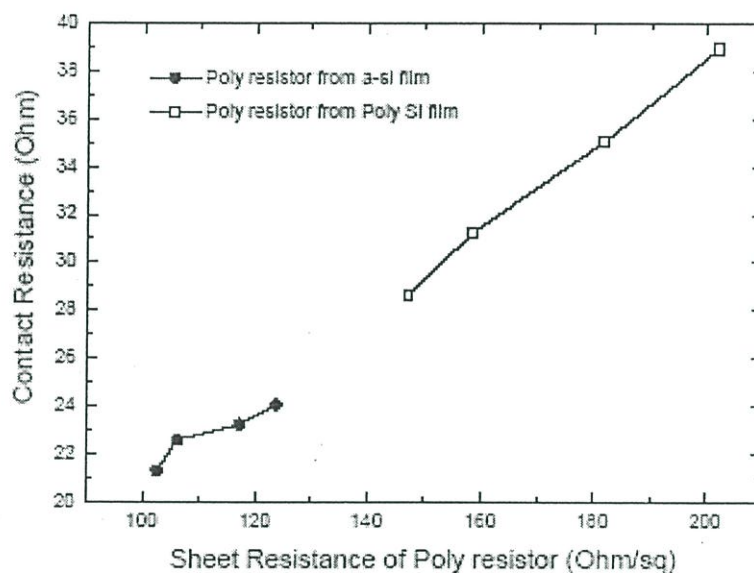


Figure 7. The relationship between sheet resistance of poly-resistor and contact resistance.

2.3 The study of Temperature Coefficient of Resistance

This experiment involves measuring the resistance of poly-resistors with the temperature ranging from 13 to 100 °C. The Temperature Coefficient of Resistance (TCR) can be calculated from equation 2.

$$TCR = \frac{R2 - R1}{R1(T2 - T1)} \quad (2)$$

Where R1 is the resistance at the reference temperature,
 R2 is the resistance at the current temperature,
 T1 is the reference temperature,
 T2 is the current temperature.

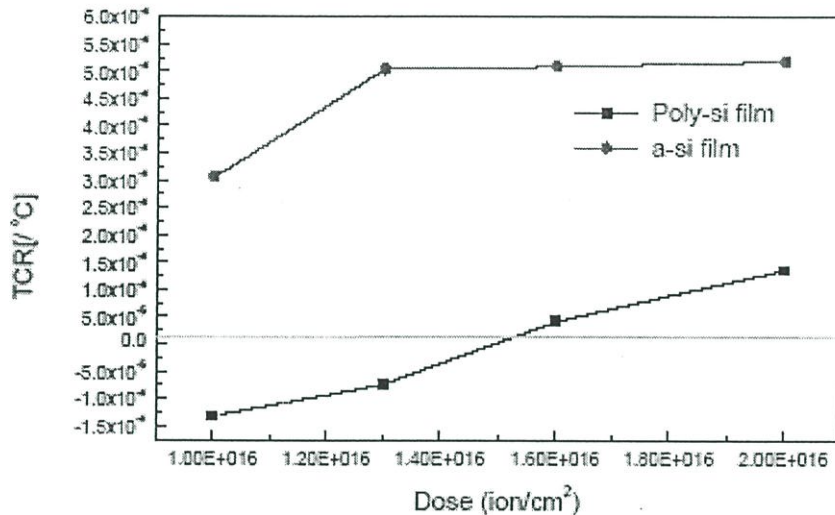


Figure 8. The relationship between doping concentration and TCR of polysilicon film and amorphous silicon film.

3. RESULTS AND DISCUSSION

From the first experiment, the average value of Rsh for polysilicon film is higher than amorphous silicon film by 34.38%. After annealing the films, the grain size of amorphous silicon film is larger than polysilicon film [4]. This can be seen from figure 4 and 5.

The second experiment shows that contact resistance from polysilicon film is consistently higher than amorphous silicon film in every doping condition. However, figure 7 shows that contact resistance has almost linear relationship with respect to sheet resistance. Hence, it can be concluded that contact resistance is strongly influenced by sheet resistance, and therefore doping concentration, rather than the type of silicon film. The film type has only indirect relationship with the contact resistance in term of determining the sheet resistance as shown in the previous experiment.

The result from the third experiment shows that TCR of amorphous silicon film is greater than zero for the dosage used in this experiment. On the other hand, polysilicon film exhibited a negative TCR for the dosage below 1.5×10^{16} ion/cm². Furthermore, the film showed properties similar to Schottky barrier which will affect the linearity of TCR. As a result, it will be more difficult to apply as a temperature sensing device.

From the experiments, one condition was chosen to be used in fabricating a pressure sensor as shown in figure 9. The poly-resistor was made from amorphous silicon film. The film was implanted with the dosage of 1.3×10^{16} ion/cm² at 50keV. Then, the film was annealed at 300 °C for 15 hours in N₂ atmosphere. The average sheet resistance is 117 Ohm/□.

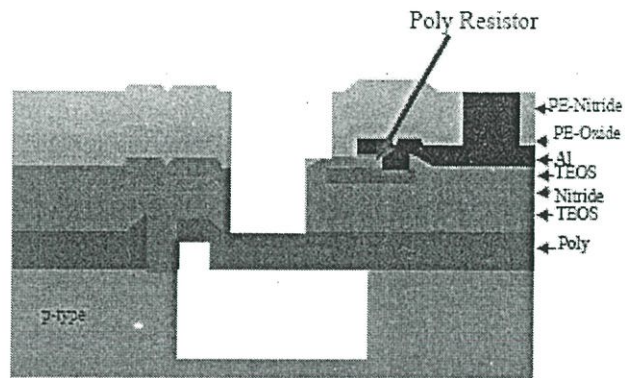


Figure 9. Pressure sensor cross-sectional structure.

3.1 In order to study the relationship between the resistance and pressure, a test was performed with different value of compressed air pressure. The result is summarized in figure 10.

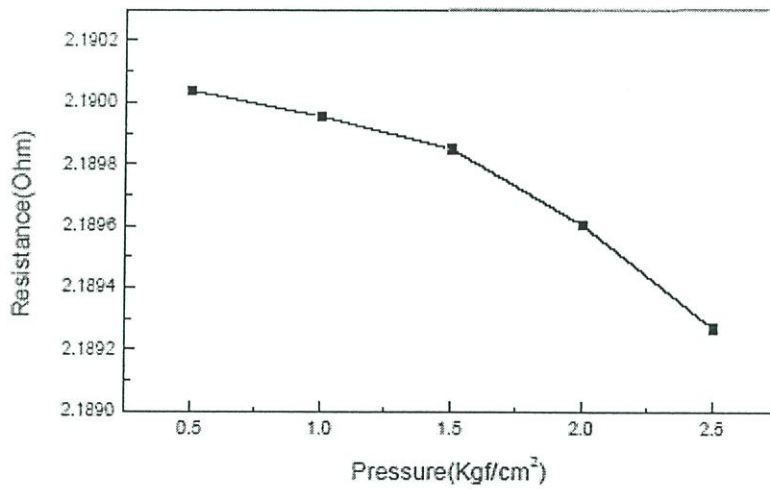


Figure 10. The relationship between pressure and resistance.

3.2 In order to study the relationship between pressure and output voltage, a Wheatstone bridge is used. The supply voltage for the bridge is set at 10 V. The result is shown in figure 11.

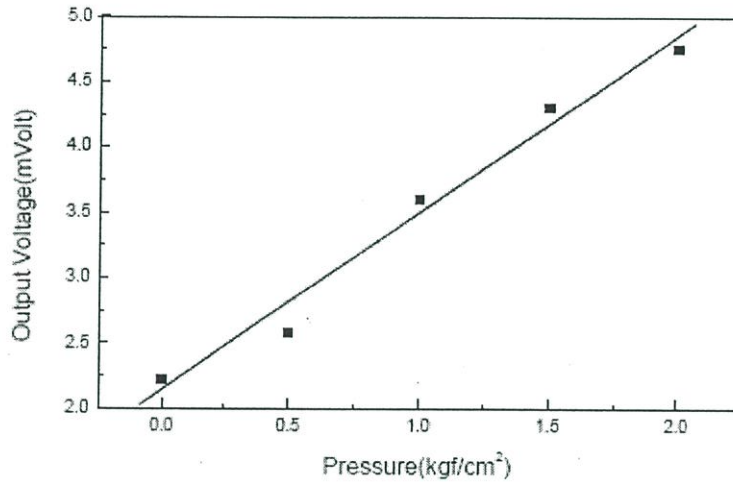


figure 11. The relationship between pressure and output voltage.

From figure 11, the sensitivity of the pressure sensor can be calculated from equation 3.

$$S = \frac{\Delta V}{V_i \Delta P} \quad (3)$$

Where S is sensitivity,

ΔV is the output of the Wheatstone bridge,

ΔP is the change in pressure,

V_i is the supply voltage of the bridge.

The sensitivity from figure 11 is calculated to be 0.12 mV/V/kgf/cm².

4. CONCLUSIONS

Amorphous silicon film is more suitable than polysilicon film to fabricate strain gauge for piezoresistive pressure sensors. Not only it can achieve lower sheet resistance and contact resistance within the required range, but also its TCR is positive and higher than polysilicon film. After an actual pressure sensor was fabricated using amorphous silicon film as strain gauge, with the doping and annealing condition chosen from the experiments, the sensitivity is found to be 0.12 mV/V/kgf/cm².

5. ACKNOWLEDGEMENTS

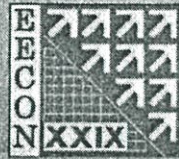
The authors would like to thank the staffs from both TMEC and NECTEC that have been extremely helpful for this project. Without you, this work cannot happen.

6. REFERENCES

- [1] Siamchai, P. 2002 Thailand's First Integrated Circuit Fabrication Facility (2), *EECON25*
- [2] Wolf, S. and Tauber, R.N. 1986 *Silicon Processing For VLSI Vol. 1: Process Technology*. Sunset Beach, California, Lattice Press.
- [3] Wolf, S. and Tauber, R.N. 1995 *Silicon Processing For VLSI Vol. 3: The Submicron MOSFET*. Sunset Beach, California, Lattice Press.
- [4] French, P.J. 2002 Polysilicon: a versatile material for Microsystems, *Sensor and Actuators A* 99, pp. 3-12
- [5] Saejok, K., et.al. 2004 "A Study of Bernas Type Ion Source in Ion Implanter", *EECON27*, pp. 269-272.
- [6] Gupta, S. 2002 Effect of Boron and BF₂⁺ Implant on Polysilicon Resistors, *Journal of The Electrochemical Society*, 149(4), pp. G271 – G275
- [7] Bunjongpru, W., et.al. 2005 Investigation of Reduction of AlSiCu/Si contact resistance due to Si-precipitate for Fabrication of Microelectromechanical System, *EECON28*, pp. 1173-1180.



The EECON-29 Conference Joins the Sixtieth Anniversary Celebration of His Majesty's Accession to the Throne



29th Electrical Engineering Conference

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ ๒๙

Volume II

- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
- ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)



๙-๑๐ พฤศจิกายน ๒๕๕๙

ณ โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ ซิตี้ จอมเทียน พัทยา จังหวัดชลบุรี



ดำเนินการโดย



ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การพัฒนาการสร้างบ่อชนิดเอ็นโดยปรับเทมเพอเจอร์ในการแอนนัล สำหรับวงจรรวมชนิดซีเอ็มอส ขนาด 0.8ไมโครเมตร

Development N-WELL Fabrication by Increasing Temperature of Annealing For 0.8µm CMOS Integration

การุณ แซงจอก¹ มนศรี แสนสมุท¹ จุฑา เรืองพานิช¹ เลอราจ รัตนคุณพิสุทธิ¹ เอกสิทธิ์ไชย ธารวิจิราวัฒน์¹ วาญุเดช หงษ์มันต์¹ ลุศศักดิ์ เนียมเจริญ¹ และ ฉันทพร ไทธัญย์¹

¹ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
314 หมู่ 1 รัชตะเดือน อ.เมืองฯ จ.ระยอง โทร. 038-257-100 ถึง 9 email: karoon.saejok@nec.ac.th
¹ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
3 หมู่ 2 ถนนฉางกรุงฯ เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้ได้นำผลการปรับปรุงกระบวนการแอนนัล ของ การสร้างบ่อชนิดเอ็น (n-well) โดยการเพิ่มอุณหภูมิจาก 1,050 องศาเซลเซียสเป็น 1,150 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้ความลึกของสารเจือ (Xj) 1.3 µm และ ค่าความต้านทานเชิงแผ่น (Rsh) 2.3 MΩ/□ สำหรับ วงจรรวม 0.8µm CMOS และ นำกระบวนการจำลอง (simulation) ด้วยโปรแกรม TSUPREM4 ช่วยในการวิจัยหาเงื่อนไขเวลาในการแอนนัล และปริมาณสารเจือที่เหมาะสม ผลการวิจัยพบว่าอุณหภูมิในการแอนนัล 1,150 องศาเซลเซียส ในการสร้างบ่อชนิดเอ็น ใช้เวลา 2 ชั่วโมง 30 นาที ก็เพียงพอในการอิงพีที่ประจุชนิดฟอสฟอรัส (P⁺) ที่ปริมาณสารเจือ 4.0 x10¹⁵ ions/cm² พลังงาน 140keV ได้ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ผิดพลาด Xj เกือบ 1.7% และ ได้ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดของความต้านทานเชิงแผ่นเกือบทั้งหมดเท่ากับ 5.7% ซึ่งเกินค่ายอมรับได้ใน การนำเงื่อนไขนี้ไปสร้างบ่อชนิดเอ็นของ 0.8µm CMOS จะเห็นว่า ประหยัดเวลาในการบวนการผลิตไปมาก เมื่อเทียบกับการแอนนัลที่ อุณหภูมิ 1,050 องศาเซลเซียสซึ่งต้องใช้เวลานานในการแอนนัลถึง 13 ชั่วโมง

คำสำคัญ : การจำลอง, ความลึกของสารเจือ และ บ่อชนิดเอ็น

Abstract

This paper present the improving of anneal process by increasing the temperature from 1,050 °C to 1,150 °C for N-Well in 0.8µm CMOS Fabrication at Junction depth (Xj) of 1.3µm and Sheet Resistance (Rsh) 2.3 MΩ/□. TSUPREM4 programming is used in simulation this project to quickly find the anneal time and implant condition for helping actual fabrication. The result of actual fabrication are the annealing was done at 2 hrs and 30 min. for 1,150 °C as Implant condition P⁺ species, Dose 4 x 10¹⁵ and energy 140keV. The data is represented at Rsh, Concentration Profile and Xj and found that the result of process fabrication closely matches with the target which

showed that average of percentage error between process fabrication and target of Xj is 1.7% and average of percentage error between process fabrication and target of Rsh is 5.7%. We found that the anneal process at 1,150 °C temperature can reduce time a lot for process fabrication compare with 1,050°C temperature which have to use time 13 hrs.

Keywords: Simulation, Junction Depth and N-Well

1. บทนำ

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อลดต้นทุนและพัฒนารสร้างวงจรรวมด้วยเทคโนโลยี 0.8µm CMOS [1-2] โดยพัฒนาการสร้างบ่อชนิดเอ็น ซึ่งเป็นโครงสร้างหนึ่งภายใน CMOS แต่การสร้างบ่อชนิดเอ็นนั้นจะต้องควบคุมตัวแปร 2 ประการคือ 1.ปริมาณสารเจือ เพราะค่าปริมาณสารเจือมีผลต่อค่า Vth (Threshold Voltage) [3] ภายในอุปกรณ์ CMOS และ 2.ค่าความลึกของสารเจือ เพื่อป้องกันการผลิตกระแสตรงระหว่าง Junction Source/ Drain กับ ซีลิกอน ซึบสเตรท เช่น ถ้า บ่อชนิดเอ็น มี Xj ที่ต่ำกว่าระดับความลึกของ Source/Drain ก็จะทำให้เกิดกระแสตรง ขึ้น ดังนั้นการควบคุมปริมาณสารเจือ และ ค่า Xj จึงเป็นสิ่งที่ยั่งยืน

ในการสร้าง CMOS 0.8ไมครอม[5] ให้ง่ายขนาด ให้ n-well มีความต้านทานเชิงแผ่น 2.3 MΩ/□ และ Xj 1.3 µm [5] และ P-Source/Drain มี Xj 0.5 µm ซึ่งจะเห็นว่า บ่อชนิดเอ็น มี Xj มากกว่า P-Source/Drain เป็นจำนวน 1.3 µm เกือบถึงขั้น Punch through [3] ใน การควบคุม Xj ของ บ่อชนิดเอ็นนั้น จะขึ้นกับพลังงานในการอิงพีที่ประจุ ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ 1 [4]

$$R = \frac{1}{N} \int_0^{-E} \frac{dE}{\sigma_n(E) + \sigma_p(E)} \tag{1}$$

R คือระดับเฉลี่ยที่ไหลจะเข้าไปในเนื้อซิลิกอนมีหน่วยเป็นเมก (m)



Σ คือพลังงานในการยิงประจุ มีหน่วยเป็น eV
 S_n (Σ) คือ Nuclear Stopping เป็นอัตราการสูญเสียพลังงานต่อระยะทางในการชนกับอะตอมของระยะทาง มีหน่วยเป็น eV/nm
 S_e (Σ) คือ Electronic Stopping เป็นอัตราการสูญเสียพลังงานต่อระยะทางในการinteraction กับอิเล็กตรอนของระยะทางมีหน่วยเป็น eV/nm
 N คือ Atomic numberของไอออนที่เข้าไปในเนื้อซิลิกอน
 นอกจากนี้ข้อมูลระยะเวลาในการเจอนฟิล์มผลคือความลึกสารเจือของ n-well เช่นกันโดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2 [4]

$$X_j = (4Dr \ln \frac{Q_0}{C_{sub} \sqrt{\pi Dr}})^{1/2} \quad (2)$$

X_j คือ ความลึกของสารเจือ
 D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่
 r คือ เวลาในการเจอนฟิล์ม
 C_{sub} คือ ความเข้มข้นสารเจือของแผ่นฐานรอง
 Q_0 คือ ปริมาณสารเจือจากกรณียิงประจุ

ผลการวิจัยที่นำมา [6] ได้ทำการสร้างบ่อนิกซิลีนที่เจอนโซ มีระยะเจือคือคือยิงประจุชนิด „P” ที่มีปริมาณสารเจือ 4×10^{13} ion/cm² พลังงาน 140 keV และที่อุณหภูมิในการเจอนฟิล์ม 1,050 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ซึ่งจะเห็นว่าใช้เวลาในการเจอนฟิล์มขนาด งานวิจัยนี้จึงได้ทำการพัฒนากระบวนการเจอนฟิล์ม โดยเพิ่มอุณหภูมิจาก 1,050 องศาเซลเซียส ไปเป็นอุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิมาตรฐานทั่วไปคือจะไม่เกิน 1,200 องศาเซลเซียสที่วัสดุในอุตสาหกรรมเพราะจะทำให้เกิดสิ่งของพื้นผิวที่เสถียรคือรูป[3]) ทำให้เวลาในการเจอนฟิล์มลดลงตามความสัมพันธ์ที่ 2 นอกจากนี้การวิจัยนี้ยังนำไปโปรแกรม TSUPREEM4 [5] มาช่วยในการ simulation เพื่อลดเวลาในการวิจัย

2. การทดลอง และผลการทดลอง

2.1 การทดลอง simulation ด้วยโปรแกรม TSUPREEM4 สร้าง บ่อนิกซิลีน ด้วยเงื่อนไขดังนี้ โดยมีเงื่อนไขแผ่น substrate ที่ความต้านทานแผ่น $8 \Omega\text{-cm}$ และ ความหนา screen Oxide 150 อังสตรอม

2.1.1 สร้าง บ่อนิกซิลีน ที่เจอนโดยการยิงประจุดังตารางที่ 3 ดังนี้ ตารางที่ 1 เจอนโซการยิงประจุสำหรับสร้าง บ่อนิกซิลีน

Wafer No.	Species	Implant condition Dose(Ion/cm ²) Energy(keV)	Anneal time (min)
1	$_{11}P^+$	4.0×10^{13} ; 140	100
2	$_{11}P^+$	4.0×10^{13} ; 140	150
3	$_{11}P^+$	4.0×10^{13} ; 140	180
4	$_{11}P^+$	4.0×10^{13} ; 140	200

2.1.2 Anneal ที่อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียส ที่เวลาตามตารางที่ 1
 2.1.3 ทำการประมวลผล ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการประมวล simulation ด้วยโปรแกรม TSUPREEM4 จากเงื่อนไขตารางที่ 1

Wafer No.	Species	Sheet Resistivity (Ω/\square)	Xj (nm)
1	$_{11}P^+$	2.11	1.8
2	$_{11}P^+$	2.10	2.1
3	$_{11}P^+$	2.11	2.24
4	$_{11}P^+$	2.11	2.34

จากผลการทดลองในตารางที่ 2 พบว่า เจอนโซการเจอนฟิล์มที่เวลา 100 นาที ได้ค่า X_j ตามที่สังเกตุ แต่ค่าความต้านทานเชิงแผ่นมีค่าต่ำกว่า $2.3 \Omega/\square$ จึงทำการทดลองปรับเงื่อนไขการยิงประจุเงื่อนไขเพื่อปรับค่าความต้านทานเชิงแผ่นโดยการ simulation เจอนโซตามตารางที่ 3 ดังนี้

ตารางที่ 3 เจอนโซการยิงประจุสำหรับบ่อนิกซิลีนที่เวลาเจอนฟิล์ม 100 นาที ที่อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียส

Wafer No.	Species	Dose (Ion/cm ²)	Energy (keV)
1	$_{11}P^+$	4.0×10^{13}	150
2	$_{11}P^+$	3.6×10^{13}	150
3	$_{11}P^+$	4.0×10^{13}	140
4	$_{11}P^+$	3.6×10^{13}	140

ตารางที่ 4 ผลการประมวลผล simulation ด้วยโปรแกรม TSUPREEM4 จากเงื่อนไขตารางที่ 3

Wafer No.	Species	Sheet Resistivity (Ω/\square)	Xj (nm)
1	$_{11}P^+$	2.11	1.8
2	$_{11}P^+$	2.34	1.75
3	$_{11}P^+$	2.11	1.79
4	$_{11}P^+$	2.34	1.75

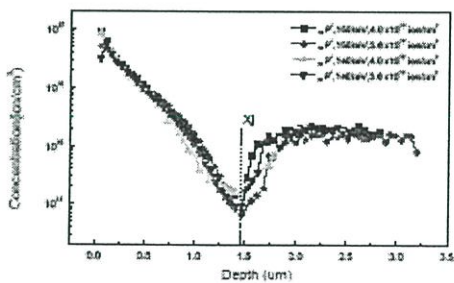


2.2 ทำการทดลองสร้าง N-well ที่อุณหภูมิในการตอนคือ 1,150 องศาเซลเซียส ด้วยขั้นตอนดังนี้

- 2.2.1 นำแผ่นซิลิกอน เวเฟอร์ ที่มีค่าความต้านทาน 6 Ohm-cm ชนิด P <100> มาทำความสะอาด
- 2.2.2 ทำการกรอผิว Screen Oxide ทน 150 องศาเซลเซียสด้วยกระบวนการ Dry Oxidation ด้วยเตา Furnace
- 2.2.3 การทดลองยิงจิงด้วยเครื่อง ไอออน อิมแพลนเตอร์รุ่น Nishin NH-205SR [7] ด้วยเงื่อนไขตามตารางที่ 5
- 2.2.4 ทำความสะอาดแผ่นด้วยสาร $\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{SO}_4$ (3:1) เป็นเวลา 10 นาที
- 2.2.5 Anneal ที่อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียส ในเวลา 100 นาที
- 2.2.6 ทำการลอก Screen Oxide
- 2.2.7 ทำการวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่น ด้วยเครื่อง Four Point Probe ได้ผลดังตารางที่ 5
- 2.2.8 ทำการวัดค่า Xj และ Profile ด้วยเครื่อง SRP ได้ผลดังตารางที่ 5 และ รูปที่ 1

ตารางที่ 5 ผลการทดลองในการนำกระบวนการสร้างจิงจากเงื่อนไขตารางที่ 3

Wafer No.	Species	Sheet Resistivity (Ω/\square)	Xj (μm)
1	11P^+	2.372	1.46
2	11P^+	2.738	1.47
3	11P^+	2.390	1.47
4	11P^+	2.677	1.45



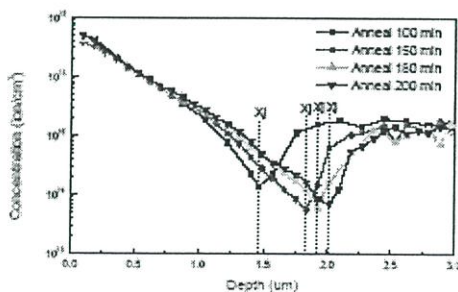
รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Concentration และ Depth ในกระบวนการสร้างจิง ที่วัดด้วย SRP

จากผลการทดลองพบว่า ผลการ simulation ต่างกับผลการทดลองจริง โดยมี Xj จะน้อยกว่า ผล simulation เท่ากับ 0.3 μm ดังนั้นได้ทำการทดลองการแอนนัลโดยใช้เงื่อนไขการเพิ่มเวลา

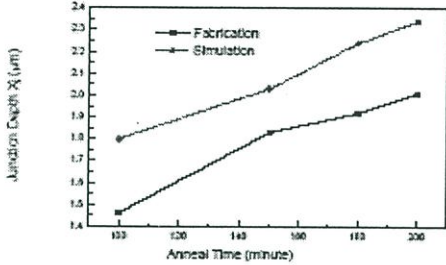
- ในการแอนนัลตามตารางที่ 5 มีขั้นตอนการทดลอง 2.2.9 -2.2.15 ดังนี้
- 2.2.9 นำแผ่นซิลิกอน เวเฟอร์ ที่มีค่าความต้านทาน 6 Ohm-cm ชนิด P<100> มาทำความสะอาด
- 2.2.10 ทำการกรอผิว Screen Oxide ทน 150 องศาเซลเซียสด้วยกระบวนการ Dry Oxidation ด้วยเตา Furnace
- 2.2.11 การทดลองยิงจิงด้วยเครื่อง ไอออนอิมแพลนเตอร์รุ่น Nishin NH-205SR [7] ด้วยเงื่อนไข 11P^+ ปริมาณสารจิง $4 \times 10^{13} \text{ ions/cm}^2$ ที่พลังงาน 140keV
- 2.2.12 ทำความสะอาดแผ่นด้วยสาร $\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{SO}_4$ (3:1) เป็นเวลา 10 นาที
- 2.2.13 แอนนัลที่อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียสที่เงื่อนไขเวลาตามตารางที่ 1
- 2.2.14 ทำการลอก Screen Oxide
- 2.2.15 ทำการวัดค่าความต้านทาน ด้วยเครื่อง Four Point Probe ได้ผลดังตารางที่ 6
- 2.2.16 ทำการวัดค่า Xj และ Profile ด้วยเครื่อง SRP ได้ผลดังตารางที่ 6 รูปที่ 2 และ รูปที่ 3

ตารางที่ 6 ผลการทดลองในการนำกระบวนการสร้างจิงจากเงื่อนไขตารางที่ 1

Wafer No.	Species	Sheet Resistivity (Ω/\square)	Xj (μm)
1	11P^+	2.390	1.46
2	11P^+	2.432	1.83
3	11P^+	2.501	1.92
4	11P^+	2.513	2.01



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Concentration และ Depth ในกระบวนการสร้างจิง ที่วัดด้วย SRP



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Xj และ Anneal time จาก Simulation และ การสร้างจริง จากตารางที่ 1 และ 6

3. วิเคราะห์ผลการทดลอง

ได้ทำการ simulation ที่เงื่อนไขตามตารางที่ 1 และที่ 3 เพื่อให้ได้ค่าตามเป้าหมายคือ สร้หรับวงจรมิติที่ Xj เท่ากับ 1.8 µm ที่ ความดันทางเวจเมนต์ (Sub) 2.3 kV การประมวลผลพบว่าได้เงื่อนไขที่เอื้อต่อการคือ เงื่อนไขการยิงประจุชนิด p⁺ ปริมาณสารเจือ 3.6 x 10¹⁷ ions/cm² ที่พลังงาน 140 keV ซึ่งเป็นผลในตารางที่ 4 โดยจะเห็นว่าการปรับเพิ่มพลังงานการยิงประจุที่จาก 140keV และ 150keV มีผลต่อการเพิ่ม Xj น้อยมากที่เงื่อนไขการแอนนัลอุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียส และเวลา 100 นาที

เมื่อนำเงื่อนไขตามตารางที่ 3 ไปสร้างจริงพบว่า ได้ค่า Xj เฉลี่ยอยู่ที่ 1.47 µm ตามตารางที่ 5 และ รูปที่ 1 โดยได้ค่าที่ต่ำกว่าค่าเป้าหมายเท่ากับ 19.4 % ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับไม่ได้ และพบว่าปรับเพิ่มพลังงานการยิงประจุมีผลต่อการเพิ่ม Xj น้อยมาก เห็นด้วยกับผล simulation จึงได้ทำการปรับปรุงเวลาในการแอนนัลเพื่อปรับปรุงค่า Xj โดยทำการทดลองสร้างวงจรมิติตามเงื่อนไขตามตารางที่ 1 ผลการทดลองจากตารางที่ 6 พบว่าได้เงื่อนไขของเวลาในการแอนนัลเท่ากับ 150 นาที หรือ 2 ชั่วโมง 30 นาที ที่ให้ค่า Xj ได้ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดของ ความดันทางเวจเมนต์เทียบกับเป้าหมาย เท่ากับ 1.7 % ซึ่งเป็นค่ายอมรับได้ในการสร้างวงจรมิติ 0.8µm CMOS

จากผลการทดลองพบว่า ค่า Xj ที่ได้จากการ simulation มีความต่างจากผลที่สร้างจริง เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง Xj กับ เวลาในการแอนนัลของกระบวนการสร้างจริงกับการ simulation จะพบว่ามีความสัมพันธ์ไปทางเดียวกันถึงแม้ค่าจะเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง เฉลี่ยประมาณ 0.30 µm ดังนั้นเมื่อต้องการพัฒนา Xj ในการวิจัยให้มีค่ามากขึ้นในอนาคต สามารถนำค่านี้ไปพิจารณาในการสร้างได้ นอกจากนี้พบว่าความดันทางเวจเมนต์ของผลการ simulation ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อเวลาการแอนนัลเพิ่มขึ้น แต่ในการนำไปสร้างจริงกลับพบว่าความดันทางเวจเมนต์เพิ่มขึ้นนี้จะมีผลกระทบต่อระยะเวลาใน

การแอนนัลเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณสารเจือส่วนหนึ่งที่อุณหภูมิลดลงแพร่ออกไปสู่ภายนอกส่งผลให้ความเข้มข้นสารเจือบนแผ่นเวเฟอร์ลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามสามารถปรับปรุงปัญหานี้ได้โดยการเพิ่มปริมาณสารเจือในการยิงประจุ ในการวิจัยที่ลดค่าความดันทางเวจเมนต์ต่อไป

4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่าในการสร้างป้อนชนิดเอ็น ที่อุณหภูมิการแอนนัล 1,150 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้คุณสมบัติ Xj เท่ากับ 1.8 µm และความดันทางเวจเมนต์ 2.3 kV ใช้เวลาในการแอนนัล 2 ชั่วโมง 30 นาที และเงื่อนไขการยิงประจุ p⁺ ที่ปริมาณสารเจือ 4 x 10¹⁷ ions/cm² ที่พลังงาน 140keV พบว่า ได้ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ผิดพลาด Xj เทียบกับเป้าหมาย เท่ากับ 1.7% และได้ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดของความดันทางเวจเมนต์เทียบกับเป้าหมายเท่ากับ 1.7% ซึ่งเป็นค่ายอมรับได้ในการนำเงื่อนไขไปสร้างป้อนชนิดเอ็นของ 0.8µm CMOS ต่อไป การเพิ่มอุณหภูมิในการแอนนัล จาก 1,050 องศาเซลเซียสเป็น 1,150 องศาเซลเซียส ในการสร้างป้อนชนิดเอ็น สามารถลดเวลา จาก 18 ชั่วโมงเป็น 2 ชั่วโมง 30 นาที ซึ่งจะเห็นว่าประหยัดเวลาในการประมวลผลได้จนวนไปมาก

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณบุคลากร IMEC-NECTEC ทุกท่านที่สนับสนุนการวิจัย และนางอภินันท์ อุทัยรัตน์ และ สราภรณ์กมลไธโยี พรวงมณเฑียรกุลให้การลาดตระเวน สงส. ที่ จุฬาลงกรณ์ ในการวัดด้วยเครื่อง SRP

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Inth Rattaporn and Pavan Simschai, "Progress Report on NECTEC's Microelectronics Project", Proceedings: The First NECT-KOSEF Joint Seminar on Semiconductors, Nov 30-Dec1, 1999, pp. 30-33.
 [2] Pavan Simschai, "Thailand's First Integrated Circuit Fabrication Facility (2)", EECON25, 2002
 [3] Stanley Wolf, "Silicon Processing for VLSI Vol. 1: Process Technology", Lattice Press, 1995.
 [4] Stanley Wolf, "Silicon Processing for VLSI Vol. 3: THE SUBMICRON MOSFET", Lattice Press, 1995.
 [5] Amichai Rungpham, Sarayuth Wisawawanruk, Pawadee Mesappawong, "The development of CMOS Fabrication Technology by TSUPREM-4 & MEDICI" The International Conference on Smart materials, 1-3 December 2004, Chiangmai, Thailand.
 [6] Karocu Szejok, "Study Implimentation in N-WELL fabrication for 0.8µm CMOS Integration" EECON 28, 2005, pp1,073-1,076.
 [7] NH-205R Medium Ion Implanter Operation Manual, Nitron Electric Co., Ltd. Japan.



การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28
28th Electrical Engineering Conference



Volume II

ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

Electrical Engineering



Western
Digital



ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
20 - 21 ตุลาคม 2548
ณ โรงแรม เฟิร์ล วิลเลจ จ.ภูเก็ต

การศึกษาความต้านทานของฟิล์มโพลีซิลิกอน และอมอร์ฟิซิลิกอนหลังการยิงฝังประจุสำหรับ เซ็นเซอร์วัดความดัน
Study of poly-Si and a-Si Film Resistance after Implantation for Pressure Sensor

การุณ แซ่จอก^{1*} มนตรี แสงภุม¹ วาญเดช หรุ่นันท์¹ เจกส์กษณ์ เชาว์วิวัฒน์¹ สุรศักดิ์ เข็มเมจวิญ¹ จัมพร โพธิ์โอ¹

¹ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

51/4 หมู่1 รัชตะเดือน อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 24000 โทร. 038-357-100 อีเมล: karon.saejob@nec.ac.th

²ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3 หมู่ 2 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

บทคัดย่อ

การสร้าง Polycrystalline silicon เพื่อทำตัวต้านทานชนิดฟิล์มที่นิยมใช้ในการผลิตวงจรรวมและ MEMS บทความนี้จะแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างกันของค่า Sheet Resistance (Rsh) ของ Poly resistor ที่สร้างมาจาก ฟิล์มบางที่ต่างกัน 2 ชนิดคือ โพลีซิลิกอน (Poly-si) และ อมอร์ฟิซิลิกอน (a-si) โดยทำการทดลองสร้างฟิล์มที่บริเวณนี้ ด้วยวิธี LPCVD และทำให้อิมพลัน เป็นตัวนำ ด้วยการใช้ยิงประจุที่ปริมาณสารเจือจางมีค่า 1E16, 1.3E16, 1.5E16 และ 2.0E16 ion/cm² หลังจากนั้นนำไปทำการ Annealing ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 ชั่วโมง เพื่อทำการ Activation แล้วนำไปทำการวัด ค่า Rsh ด้วยเทคนิค 4 point probe และพบว่าค่าเฉลี่ย Rsh ที่จากฟิล์ม a-si มีค่าต่ำกว่า Poly-si เท่ากับ 34.48 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นผลมาจากขนาดของผลึกหลังจากการ Anneal ขนาด Grain size ของ a-si มีปริมาณใหญ่กว่า ของ Poly-si นอกจากนี้พบว่าเมื่อทำการ เพิ่มก๊าซ O₂ ในการ Anneal และ การเพิ่ม Screen Oxide ทำให้ Rsh เพิ่มขึ้น สาเหตุมาจาก โบรอนบางส่วนเกิดการ แพร์ เข้าไปใน ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ในระหว่าง Annealing งานวิจัยนี้จะเปรียบเทียบในการเลือกฟิล์มและเทคนิคการ Anneal สำหรับสร้าง Poly resistor ในการนำไปสร้างเซ็นเซอร์ที่จะมีการ Rsh ต่ำ เพราะจะได้ข้อสรุปปริมาณสารเจือในกรณียิงประจุได้

คำสำคัญ : โพลีซิลิกอน, อมอร์ฟิซิลิกอน และ การยิงฝังประจุ

Abstract

Polycrystalline silicon is often used to fabricate p-type resistor in integrated circuit and MEMS. This paper demonstrates the differences of Sheet Resistance (Rsh) of poly silicon that was made from between 2 different types of thin film, i.e. Polysilicon (Poly-si) and amorphous silicon (a-Si) film which are deposited on Silicon wafer by Low Pressure Chemical Vapor Deposition (LPCVD) technique and doping this film by Implantation technique with dose ranging from 1 E16, 1.3E16 and 2.0E16 ion/cm² and then annealing

at 800 °C temperature for 15 hrs for activation. The sheet resistance (Rsh) is then measured with 4-point-probe. The Rsh of poly-Si film is 34.48% higher than a-Si film because annealing of an a-Si film would give larger grain size than annealing of a poly-Si film at the same temperature. Also adding O₂ gas during annealing and including Screen Oxide technique in order to increase Rsh value because boron will diffuse to oxide layer during annealing. This paper will be useful for choosing film type and annealing technique for sensor which need low Rsh because dose of Ion implantation can be reduced.

Key: Poly-Si, a-Si and Implantation

1.คำนำ

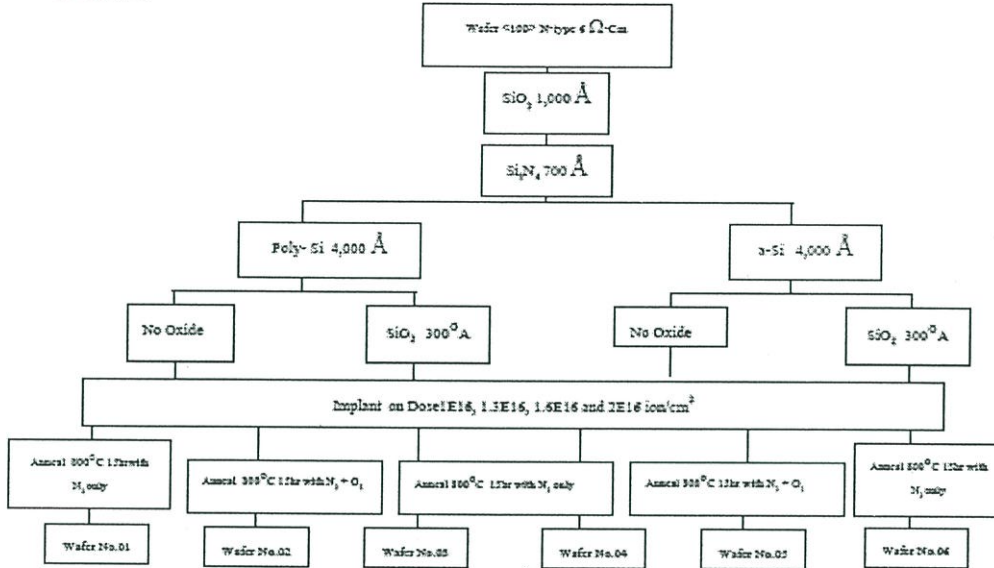
การวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสร้าง Poly Resistor เพื่อสนับสนุนการสร้างวงจรรวม [1] และ MEMS เช่น การสร้าง Poly Gate ที่จำเป็นคือมี poly resistor เป็นตัวนำที่นำมาใช้ทำให้เกิด Inverse ภายในวงจรรวม CMOS [2] ส่วน MEMS จะมีการสร้าง Poly resistor เช่นใช้เป็นส่วนของประกอบภายในเซ็นเซอร์วัดความดัน ภายในวงจรรวมตัวนำเป็นต้น

การสร้าง Poly resistor นั้นโดยทั่วไปจะมาจากฟิล์มบางที่ค่ากัน 2 ชนิดคือ Poly-si และ a-si แล้วนำไปทำการเจือสารด้วยเทคนิคยิงประจุ แต่มีเทคนิคอื่นในการเจือสารเช่น Spin Dope[3] ซึ่งใช้เวลานานในการเจือสารน้อยกว่าแต่มีข้อเสียคือได้ค่าความเที่ยงของปริมาณสารเจือน้อยกว่าเทคนิคการยิงประจุ ดังนั้นการวิจัยนี้เราจึงเลือกวิธีการยิงประจุเพราะต้องการควบคุมค่าความต้านทานที่แม่นยำ หลังจากนั้นก็ทำการ Anneal เพื่อ Activation ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 15 ชั่วโมง ค่าความต้านทานของ Poly resistor ขึ้นกับปริมาณสารเจือที่ทำการเจือลงไปนั่นเองและโดยทั่วไป

สิ่งที่ต้องการให้ค่าความต้านทานของ Poly resistor มีค่าต่ำลงเป็นที่ต้องการที่มีปริมาณสูงมาก เป็นเหตุให้การเจือสารโดยใช้เวลาและกระแสสูงมาก [4] ดังนั้นการวิจัยนี้จึงเป็นไปเพื่อหาวิธีการ Annealing และเลือกชนิดฟิล์มในการสร้าง Poly resistor มีค่าต่ำที่สุดจากการยิงฝังประจุ

EL012

2. การทดลอง



รูปที่ 1 ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนการทดลองอยู่ในรูปที่ 1 และมีรายละเอียดการทดลองโดยเตรียมแผ่นเวเฟอร์ชนิด n-type $\rho < 1000$ ที่ความต้านทาน $6 \Omega\text{-cm}$ แล้วนำมาสร้างชั้น SiO_2 หนา 1,000 Å หลังจากนั้นนำไปทำการสร้าง Si_3N_4 หนา 700 Å แล้วแยกนำไปทำการทดลองดังนี้

2.1 นำแผ่นเวเฟอร์ หมายเลข 01, 02 และ 03 ไปสร้างชั้น poly silicon หนา 4000 Å ด้วยเทคนิค LPCVD ที่อุณหภูมิ 550 °C

2.2 นำแผ่นเวเฟอร์ หมายเลข 04, 05 และ 06 ไปสร้างชั้น a-si หนา 4,000 Å ด้วยเทคนิค LPCVD ที่อุณหภูมิ 550 °C

2.3 นำแผ่นเวเฟอร์ หมายเลข 03 และ 06 มาทำการสร้าง SiO_2 หนา 300 Å ด้วยเทคนิค Thermal Oxide



รูปที่ 2

2.4 ทำการยิงฟอสฟอรัสไอออน (P^+) พลังงาน 50 keV ที่ Dose 1.0E16, 1.30E16, 1.6 E16 และ 2.0E16 Ion/cm^2 โดยใช้เทคนิคการสร้าง Mask ซึ่งสร้างด้วย lithography เพื่อใช้กันในการยิงฟอสฟอรัสให้มีความเข้มข้นดังรูปที่ 2

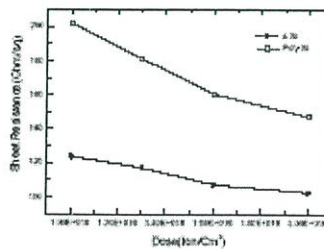
2.5 นำแผ่น เวเฟอร์ หมายเลข 01, 03, 04 และ 06 ไป Anneal ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 15 hr ภายใต้บรรยากาศ N_2 , flow 10 liter/min อย่างเดียว แล้วนำไปวัดความต้านทาน

2.6 นำแผ่น เวเฟอร์ หมายเลข 02 และ 05 ไป Anneal ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 15 hr ภายใต้บรรยากาศ N_2 , flow 10 liter/min และ O_2 1 liter/min. แล้วนำไปวัดความต้านทาน

3.ผลการทดลอง

3.1 ผลการทดลองที่ 1

ผลการวัดค่า R_{sh} (Ω/\square) บนแผ่น wafer No.01 และ 04 ที่ Anneal ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 15 hr ภายใต้บรรยากาศ N_2 แล้ววัดความต้านทานด้วยเครื่อง 4 point Probe ได้ผลดังรูปที่ 3

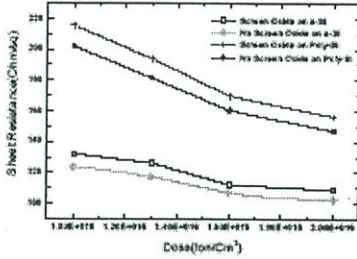


รูปที่ 3

-EL012-

3.2 ผลการทดลองที่ 2

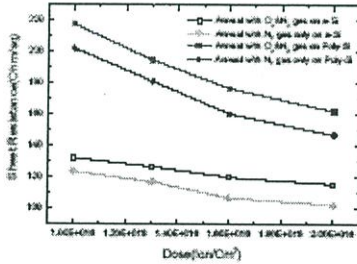
ผลการวัดค่า R_{sh} (Ωcm^2) บนแผ่น Wafer No.01, 03, 04 และ 06 โดย Anneal ที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 15 ชม ภายใต้บรรยากาศ N_2 ผลดังรูปที่ 4



รูปที่ 4

3.3 ผลการทดลองที่ 3

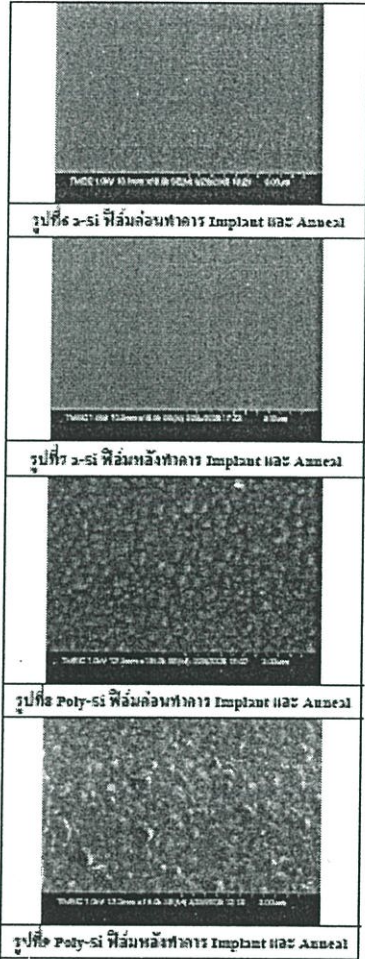
ผลการวัดค่า R_{sh} (Ωcm^2) บนแผ่น Wafer No.01, 02, 04 และ 05 โดยที่แผ่นเวเฟอร์ หมายเลข 01 และ 04 Anneal ที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 15 ชม ภายใต้บรรยากาศ N_2 อย่างเดียว แต่แผ่นเวเฟอร์หมายเลข 02 และ 05 Anneal ที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 15 ชม ภายใต้บรรยากาศ N_2 และ O_2 ได้ผลดังรูปที่ 5



รูปที่ 5

3.4 ผลการถ่ายภาพ SEM (Scanning Electron Microscopy)

ได้นำฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ก่อนที่นำไปทำการ Implant และ anneal ไปทำการวัด Grain size ที่ผิวหน้าแผ่นด้วยเครื่องวัด SEM ได้ผลดังรูปที่ 6 และ 8 ตามลำดับ หลังจากนั้นได้ฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ที่ทำการ Implant (เงื่อนไข 1.5×10^{16} Ion/ cm^2) พลังงาน 30keV และ anneal ที่เงื่อนไข อุณหภูมิ 800°C เวลา 15 ชม ที่ Flow N_2 10 liter/min ไปทำการวัด Grain size ที่ผิวหน้าแผ่นด้วยเครื่องวัด SEM ได้ผลดังรูปที่ 7 และ 9 ตามลำดับ



4.วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองที่ 1 พบว่าค่าเฉลี่ย R_{sh} ของฟิล์ม Poly-Si น้อยกว่าฟิล์ม a-Si เท่ากับ 34.38% มีสาเหตุมาจากหลังจาก Anneal ขนาด Grain size ของ a-Si มีปริมาณใหญ่กว่าของ Poly-Si (5) เห็นได้จากรูปที่ 7 และ 9

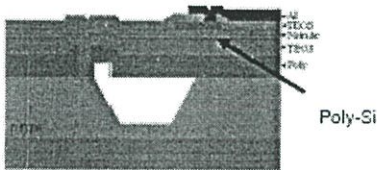
จากผลการทดลองที่ 2 ค่า R_{sh} ของฟิล์ม Poly-Si และฟิล์ม a-Si ที่มี Screen Oxide มีค่าสูงกว่ากรณีที่ไม่มี Screen Oxide เท่ากับ 6.17% และ 3.36% ตามลำดับ มีสาเหตุมาจาก ไบรอนบางส่วนเกิดการ diffusion เข้าไปใน ชั้น Oxide ในระหว่าง Annealing [3]

EL012

จากผลการทดลองที่ 3 ค่า Rsh ของฟิล์ม Poly-Si และฟิล์ม a-Si ที่ใช้เงื่อนไขการ Anneal ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 15 ชม. ภายใต้บรรยากาศ N₂ และ O₂ มีค่าสูงกว่ากรณีที่ใช้เงื่อนไขการ Anneal ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 15 ชม. ภายใต้บรรยากาศ N₂ เท่ากับ 8.20 % และ 9.05 % ตามลำดับ มีสาเหตุมาจากโบรอนบางส่วนเกิดการ diffusion เข้าไปใน ชั้น Oxide เกิดขึ้นในระหว่าง Annealing [3]

5. ประโยชน์ใช้สอยของสารผลึกจากเซอร์โคเรจันความถี่

จากผลการทดลองการนำฟิล์มโพลิซิลิคอนในสารละลาย Poly Resistor ที่สร้างจากฟิล์ม a-Si โดยการยิงประจุชนิดที่ปริมาณ 1.3E16 ion/cm² และพลังงาน 50keV และ Anneal ที่เงื่อนไข Anneal ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 15 ชม. ภายใต้บรรยากาศ N₂ ได้ Rsh เท่ากับ 117 Ohm/□ แล้วนำไปสร้างในเซ็นเซอร์ตรวจจับ ความดันตัวรูปที่ 10



รูปที่ 10 เซ็นเซอร์ตรวจจับความดัน

6. สรุปผลการทดลอง

ค่า Rsh ของ Poly Resistor ที่สร้างจากฟิล์ม Poly-Si มีค่าสูงกว่าฟิล์ม a-Si ที่ทุกค่าปริมาณการยิงประจุหลังจาก Anneal ขนาด Grain size ของ a-Si มีปริมาณ ใหญ่กว่า ของ Poly-Si นอกจากนี้อะบบการใช้เทคนิค screen Oxide และเทคนิคการ anneal โดยการเพิ่ม Flow O₂ ไม่ช่วยให้ค่า Sheet Resistance ลดลง แต่กลับทำให้มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิด Diffusion ของโบรอนเข้าไปในชั้น Oxide เกิดขึ้นในระหว่าง Annealing ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงฟิล์ม a-Si และให้เงื่อนไขการ Anneal ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 15 ชม. ภายใต้บรรยากาศ N₂ ในการสร้าง Poly Resistor เพราะจะได้ค่าความต้านทานที่ต่ำซึ่งทำให้สามารถลดปริมาณการเงาสารในการยิงได้ ประจุทำให้ราคาเงาสารได้เร็วขึ้น

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ บุคลากร TMEC-NECTEC ทุกท่าน

8. เอกสารอ้างอิง

[1] Pavan Simechhi, "Thailand's First Integrated Circuit Fabrication Facility (2)", EECON27, 2004.
[2]. STANLEY WOLF, "SILICON PROCESSING FOR VLSI Vol. 1: PROCESS TECHNOLOGY", Lattice Press, 1995.

[3]. STANLEY WOLF, "SILICON PROCESSING FOR VLSI Vol. 3: THE SUBMICRON MOSFET", Lattice Press, 1995.
[4]. Karoon Saekok, "A Study of Boron Type Ion Source in Ion Implanter", EECON27, 2004, pp269-272.
[5] Sandhya Gupta, "Effect of Boron and BF2- Implant on Polysilicon Resistors", 2002



การุณ แสงจอก

วทน.สาขาฟิสิกส์ จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น คณิตศาสตร์ ปี พ.ศ.2539 ทำงานเป็นตำแหน่งวิศวกร ณ บริษัททรานส์เจเนอรัล จำกัด ปี พ.ศ. 2540 หลังจากนั้นทำงานในตำแหน่งวิศวกร ณ.ไบโพรเซสซิงเทคโนโลยี จำกัด ปี.ศ. 2543

ปัจจุบันทำงานใน ตำแหน่งผู้ร่วมนักวิจัยที่ ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์



มนตรี แสนละมุล

ได้รับ วท.บ.ฟิสิกส์ จากมหาวิทยาลัยนครสวรรค์

ปี พ.ศ.2546 ปัจจุบันทำงานในตำแหน่งผู้ช่วย

นักวิจัย ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์



ชาญเชษฐ ทรูพันธ์

ได้รับ วท.บ. สาขาวิชาชีววิทยา มหาวิทยาลัย

รามคำแหง พ.ศ. 2531 วทม. สาขาวิชา

เทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

พระจอมเกล้าธนบุรี ทำงานในตำแหน่ง

นักวิทยาศาสตร์คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล พ.ศ.2531

ปัจจุบันเป็นนักวิจัย ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์



สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

วทน.สาขาฟิสิกส์ จากมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ปริญญาโท และ เอกสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สงข

ปัจจุบัน เป็นอาจารย์ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สงข.



อัมพร โพธิ์ชัย

ได้รับวทบ.สาขาฟิสิกส์ จากมหาวิทยาลัย

ศิลปากร พ.ศ. 2534 ได้รับ วทม. สาขา

วิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอม

เกล้า (คุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2537 ได้รับ Master of Engineering

(พ.ศ.2541) และ Ph.D.(พ.ศ.2545) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จาก

Katholieke University Leuven (KU Leuven) ประเทศเบลเยียม

ปัจจุบันทำงานในตำแหน่งนักวิจัย ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโคร

อิเล็กทรอนิกส์



การศึกษาการยิงฝังประจุในการสร้างบ่อชนิดเอ็น สำหรับวงจรรวม 0.8 μ m CMOS
Study Implantation in N-WELL fabrication for 0.8 μ m CMOS Integration

การุณ แซร์จอก^{1*} มนตรี แสนลมูล¹ จมูรา เรืองพาณิชย์¹ สุวัฒน์ โลลิตพันธ์¹ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ¹ และ จัสมพร โพธิ์ไธ¹
¹ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ
31/4 หมู่ 17 จัตุรัสเดือน อ.เมืองฯ ละโว้จันทรา 24000 โทร. 035-357-100 ถึง 9 email: kgreen.saejok@necotec.or.th
²ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
3 หมู่ 2 ถนนลลจจกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

บทคัดย่อ

ในการวิจัยนี้ทำเพื่อการเปรียบเทียบ การจำลอง (Simulation) ด้วยโปรแกรม TSUPREM4 กับการทำไปสร้างจริงในกระบวนการผลิต ในการสร้างบ่อชนิดเอ็น (N-well) ที่มีค่าความลึก (Junction Depth) 1.8 μ m และ ค่าความต้านทานเชิงผิว 2.3 kOhm/ \square สำหรับ 0.8 μ m CMOS ที่เงื่อนไขการยิงฝังประจุที่พลังงาน 140keV และ 150keV และโดสแอนน์ ผลลัพธ์งานมีปริมาณสารเจือ 3.6E12 ion/cm² และ 4.0E12 ion/cm² แล้ว Anneal ที่อุณหภูมิ 1,050 องศาเซลเซียส เวลา 18 ชั่วโมง แล้ววัดผลออกมา เป็นความต้านทานเชิงผิว (Sheet Resistivity) , Concentration Profile และค่าความลึก (Junction Depth) แล้วพบว่าผลการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับผลการ Simulation คือ ค่าเฉลี่ย เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดของ Sheet Resistivity (Rsh) เท่ากับ 10.73 % และ ค่า ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ผิดพลาด ของ Junction Depth (Xj) เท่ากับ 1.8%

คำสำคัญ : การจำลอง, ค่าความลึก และ บ่อชนิดเอ็น

Abstract

This paper compares between Simulation using TSUPREM4 programming and the actual fabrication of N-Well at Junction depth (Xj) of 1.8 μ m and Sheet Resistivity (Rsh) 2.3 kOhm/ \square . Implantation energy are 140keV and 150keV with each energy value has dose of 3.6 E12 and 4.0E12 ion/cm². The annealing was done at 1,050 °C for 18hrs. The data is represented as Sheet Resistivity (Rsh) , Concentration Profile and Junction depth (Xj) and found that the result of process fabrication closely matches

with the simulation which showed that average of percentage error between process fabrication and simulation of Rsh is 10.73% and average of percentage error between process fabrication and simulation of Junction depth (Xj) is 1.8%

Keywords: Simulation , Junction Depth and N-Well

1. คำนำ

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อสนับสนุนการสร้างวงจรรวมด้วยเทคโนโลยี 0.8ไมครอน[1-2] คือการสร้างบ่อชนิด n-well ซึ่งเป็นโครงสร้างหนึ่งภายใน CMOS แต่การสร้าง n-well นั้นจะต้องควบคุมตัวแปร 2 ประการคือ 1.ปริมาณสารเจือ เพราะค่าที่ปริมาณสารเจือมีผลต่อค่า Vth (Threshold Voltage) [3] ภายในอุปกรณ์ CMOS และ 2.ค่าความลึกของสารเจือ เพื่อป้องกันอาการเกิดการลัดวงจรระหว่าง Junction Source/Drain กับ ซิลิกอน ซับสเตรท เช่น ถ้า N-Well มี Junction Depth (Xj) หักกว่าระยะความลึกของ Source /Drain ก็จะทำให้เกิด ลัดวงจร ขึ้น ดังนั้นการควบคุมปริมาณสารเจือ และ ค่าความลึกของสารเจือ เป็นสิ่งที่จำเป็น

ในการสร้าง CMOS 0.8ไมครอน[3] ได้กำหนด ให้ n-well มีความต้านทานเชิงผิว 2.3 kOhm/ \square และ Junction Depth (Xj) 1.8 μ m [3] และ P-source/Drain มี Junction Depth (Xj) 0.5 μ m ซึ่งเห็นว่า n-well มีความลึกมากกว่า P-source/Drain เป็นจำนวน 1.3 μ m เพื่อป้องกัน Punch through [3] ในการควบคุมความลึกของ n-well นั้น จะขึ้นกับพลังงานในการยิงฝังประจุ ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ : [4]

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28 (ECON28) 20-21 ตุลาคม 2548 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

$$R = \frac{1}{N} \int_0^{-R} \frac{dE}{Sn(E) + Se(E)} \quad (4)$$

R คือระยะเลี้ยวที่ไอออนเข้าไปในเนื้อซิลิคอนมีหน่วยเป็น m
 S คือพลังงานในการประจุ มีหน่วยเป็น eV
 Sn (E) คือ Nuclear Stopping เป็นอัตราการสูญเสียพลังงานต่อระยะทางในการรบกวนกับอะตอมของอะตอม มีหน่วยเป็น eV/m
 Se (E) คือ Electronic Stopping เป็นอัตราการสูญเสียพลังงานต่อระยะทางในการ interaction กับอิเล็กตรอนของอะตอม มีหน่วยเป็น eV/m
 N คือ Atomic number ของไอออนที่เข้าไปในเนื้อซิลิคอน

ดังนั้นเราจึงปรับค่าถึงพลังงานความลึกของสารเจือ ด้วยการปรับค่าพลังงานการยิงประจุด้วยเครื่องไอออนอินทนาการ และ ปริมาณสารเจือเพื่อปรับค่าความต้านเชิงผิว (Sheet Resistivity) แต่ต้องทำการทดลองหลายค่าในกระบวนการสร้างจริง เป็นเหตุให้เกิดการเลือกค่าใช้จำเป็นจำนวนมาก เราจึงจำเป็นต้องมีวิธีคำนวณการทดลองด้วยวิธีการ Simulation โดยในที่นี้เราใช้โปรแกรม TSUPREM4

2. การทดลอง และ ผลการทดลอง

2.1 การทดลอง Simulation ด้วยโปรแกรม TSUPREM4[5]

สร้าง N-well ด้วยเงื่อนไขดังที่

2.1.1 สร้าง N-well ที่เงื่อนไขการยิงประจุดังตารางที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการยิงประจุสำหรับสร้าง N-well

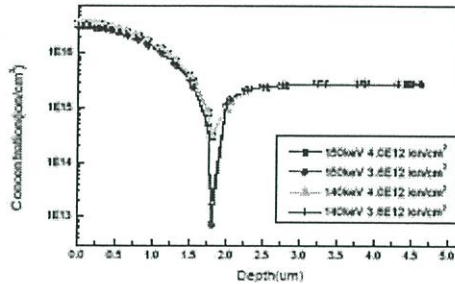
Wafer No.	Species	Dose (Ion/cm ²)	Energy (keV)
1	B ⁺	3.6 E12	140
2	B ⁺	4.0 E12	140
3	B ⁺	3.6 E12	130
4	B ⁺	4.0 E12	130

2.1.2 Anneal ที่อุณหภูมิ 1,050 องศาเซลเซียส 18 ชั่วโมง [5]

2.1.3 ทำการประมวลผล ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 2 และ รูปที่ 1

ตารางที่ 2 ผลการทดลอง Simulation ด้วยโปรแกรม TSUPREM4

Wafer No.	Species	Sheet Resistivity (Ω/□)	Xj (μm)
1	B ⁺	2.48	1.79
2	B ⁺	2.23	1.84
3	B ⁺	2.48	1.80
4	B ⁺	2.23	1.83



รูปที่ 1 ความเข้มข้นระดับความลึก Concentration กับ Depth ของ N-well Simulation ด้วยเงื่อนไขดังที่

2.2 ทำการทดลองสร้าง N-well ในกระบวนการสร้างจริง ด้วยขั้นตอนดังนี้

2.2.1 นำแผ่นซิลิคอน เพลย์ ที่มีค่าความต้านทาน 8 Ohm-cm ชนิด N <100> มาทำผิวหน้า

2.2.2 ทำการสร้าง Screen Oxide หนา 150 อังสตรอมด้วยกระบวนการ Dry Oxidation ด้วยเตา Furnace

2.2.3 การทดลองยิงด้วยเครื่อง ไอออน อินทนาการด้วยรุ่น nichin nsh-2052L[6] ด้วยเงื่อนไขตามตารางที่ 1

2.2.4 ทำความสะอาดแผ่นด้วยสาร H₂O₂/H₂SO₄ (3:1) เป็นเวลา 10 นาที

2.2.5 Anneal ที่อุณหภูมิ 1,050 องศาเซลเซียส 18 ชั่วโมง

2.2.6 ทำการลอก Screen Oxide

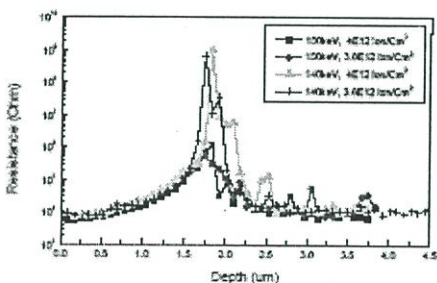
2.2.7 ทำการวัดค่าความต้านทาน ด้วย 4 Point Probe ได้ผลดังตารางที่ 3

2.2.8 ทำการวัดค่า ความลึก Junction Depr (Xj) และ Profile ด้วยเครื่อง SRP (Spreading Resistance Profile) ได้ผลดังตารางที่ 3 และ รูปที่ 2 และ รูปที่ 3

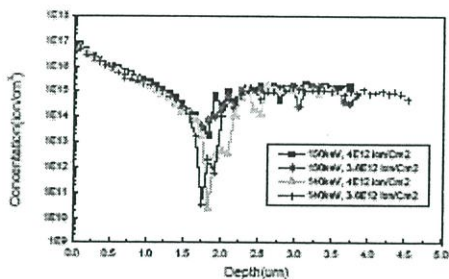
E1001

ตารางที่ 3 ผลการทดลองในการนำกระบวนการสร้างจังก์ชัน

Wafer No.	Species	Sheet Resistivity (Ohm/□)	Nj (1/cm²)
1	$_{31}P^+$	2.77	1.73
2	$_{31}P^+$	2.40	1.50
3	$_{31}P^+$	2.77	1.73
4	$_{31}P^+$	2.50	1.85



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Resistance และ Depth ในกระบวนการสร้างจังก์ชัน ที่วัดด้วย SSP



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Concentration และ Depth ในกระบวนการสร้างจังก์ชัน ที่วัดด้วย SSP

ตารางที่ 4 % Error ระหว่าง กระบวนการสร้างจังก์ชัน กับ การ Simulation

Energy (keV)	Dose (Ion/cm²)	% Error ระหว่าง กระบวนการสร้างจังก์ชัน กับ การ Simulation	
		Sheet Resistivity	Nj
140	3.6 E 12	11.85%	2.23%
	4.0E12	7.62%	2.17%
150	3.6 E 12	11.85%	2.78%
	4.0E12	12.11%	0.0%

3.วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองตามตาราง ที่ 2 3 และ 4 พบว่า ผลการทดลองในการ สร้างจังก์ชันได้ใกล้เคียงกับ ผลการ simulation โดยพบว่า ที่ ค่าเฉลี่ย เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดของ sheet Resistivity (Rsh) เท่ากับ 10.73 % และ ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ผิดพลาด ของ Junction Depth (Jd) เท่ากับ 1.8% ซึ่งความผิดพลาดส่วนมากมาจากการมีตัวแปร SSP ซึ่งปกติมีค่า accuracy อยู่ที่ +/- 5 % หรือกระบวนการในการสร้าง ช่องชนิดเอ็น ซีพิด้าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดประมาณ 5% และจากการทดลอง เพื่อให้ได้ Jd มีค่า 1.5 um ที่ความต้านทานเชิงผิว (Rsh) 2.3 kohm/□ ทำให้เราสามารถเลือกเงื่อนไขการ อิงฟังก์ชันที่ พลังงาน 140 keV ปริมาณสารเจือ 4 E12 ion/cm² ดังนั้นการ simulation สามารถลดเวลาในการทดลอง และ ค่าใช้จ่าย ในการสร้างจังก์ชัน

นอกจากนี้ยังพบว่า ที่ พลังงานเดียวกัน ค่าเจือไนต์ค่า ปริมาณสารเจือมากกว่า จะได้ค่า Rsh ที่น้อยกว่า และ มีค่า Jd สึกกว่า เนื่องจากปริมาณสารเจือมากกว่าทำให้เกิดการ Drive in เข้าไปในเนื้อ ซีลิกอนได้มากกว่า

4.สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่า การ simulation มีค่าใกล้เคียงกับ ผล การสร้างจังก์ชัน โดยพบว่า ที่ ค่าเฉลี่ย เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดของ sheet Resistivity (Rsh) เท่ากับ 10.73 % และ ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ผิดพลาด ของ Junction Depth (Jd) เท่ากับ 1.8% และสามารถเลือกเงื่อนไขการอิงฟังก์ชันที่ พลังงาน 140 keV และปริมาณสารเจือ 4 E12 ion/cm² สำหรับ การสร้าง N-well ของ CMOS 0.8 ไมครอน ดังนั้นการ simulation ด้วย



TSUPREM4 สามารถพิสูจน์ ในกรณีนำไปจำลองการทดลองว่าได้ผลใกล้เคียงกับการทดลองจริง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ เพื่อลดต้นทุนการผลิตที่ไม่จำเป็น ลดเวลาในการทดลอง และค่าใช้จ่าย ในการสร้างวงจรรวมค่าไป

5. กิจกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณบุคลากร INEC-NECTEC ทุกท่านที่สนับสนุนการวิจัย และนายอลันน้อย กุฑวัฑฒิน และ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง สจล. ที่ อนุญาตให้ใช้ชื่อ ในการวิจัยด้วย เพรื่อง 52.P

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Itri Rittipom and Pavan Siamchai, "Progress Report on NECTEC's Microelectronics Project", Proceedings The First NECTEC-KOSEF Joint Seminar on Semiconductors, , Nov 30-Dec1, 1999, pp. 30-33.
 [2] Pavan Siamchai, "Thailand's First Integrated Circuit Fabrication Facility (2)", ECON25, 2002
 [3] Stanley Wolf, "Silicon Processing for VLSI Vol. 1: Process Technology", Lattice Press, 1995.
 [4] Stanley Wolf, "Silicon Processing for VLSI Vol. 3: THE SUBMICRON MOSFET", Lattice Press, 1995.
 [5] Amacha Ruangphani, Sanyuth Wisawarwzank, Pawadee Metappawong, "The development of CMOS Fabrication Technology by TSUPREM-4 & MEDICI" The International Conference on Smart materials, 1-3 December 2004, Imperial Mee Ping, Chiangmai, Thailand.
 [6] NH-206R Medium Ion Implanter Operation Manual, Nissan Electric Co., Ltd. Japan.



จรรจน แช่อจก
 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ จาก
 มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีนครินทร์ ปี พ.ศ.2539
 ทำงานในตำแหน่งวิศวกร ณ บ.ชัยไมโครจน
 จำกัด ปี พ.ศ.2540 หลังจากนั้นทำงานใน
 ตำแหน่งวิศวกร บ.โรโบ อิเล็กทรอนิกส์ จำกัด ปี พ.ศ.2543 ปัจจุบัน
 ทำงานในตำแหน่งผู้ช่วยนักวิจัย ที่ ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์

ตำแหน่งวิศวกร บ.โรโบ อิเล็กทรอนิกส์ จำกัด ปี พ.ศ.2543 ปัจจุบัน
 ทำงานในตำแหน่งผู้ช่วยนักวิจัย ที่ ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์



มนตรี แสนละมุล, วท.บ.ฟิสิกส์ จาก
 มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ ปี พ.ศ.2546 ปัจจุบัน
 ทำงานในตำแหน่งผู้ช่วยนักวิจัย ศูนย์
 เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ มีความ

สนใจงานวิจัยทางด้าน Ion Implanter development and Semiconductor processing



นายอนุชา เรืองพาณิชย์
 วท.ม.อิเล็กทรอนิกส์ จากสถาบันเทคโนโลยีพระ
 จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2537
 วิจัยในส่วนงาน ด้าน Layout test chip design.

Process & Devices Simulation Semiconductor Measurement & Parameter extraction



สุวัฒน์ สิริสัทพันธ์
 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาไฟฟ้า จาก
 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ปี พ.ศ. 2528
 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ควบคู่บัณฑิต
 จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปี พ.ศ. 2534

และ พ.ศ. 2540 คนที่ 4 ปี ปัจจุบันทำงานในตำแหน่งนักวิจัย ที่ ศูนย์
 เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์



สุรศักดิ์ นิยมมจริย
 วทบ.สาขาฟิสิกส์ จากมหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 ปริญญาโท และ เอกสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สจล
 ปัจจุบัน เป็นอาจารย์ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะ
 วิศวกรรมศาสตร์ สจล.



สมพร โพธิ์โย
 ได้รับวทบ.สาขาฟิสิกส์ จากมหาวิทยาลัยศิลปากร
 พ.ศ. 2534 ได้รับ วทม. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จาก
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอม

เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2537 ได้รับ Master of Engineering (พ.ศ.2541) และ Ph.D.(พ.ศ.2545) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จาก Katholieke University Leuven (KU Leuven) ประเทศเบลเยียม ปัจจุบันทำงานในตำแหน่งนักวิจัย ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์



การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27
27th Electrical Engineering Conference

Volume II

สาขาทศวรรษ

- ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)

11-12 พฤศจิกายน 2547

โรงแรมโซฟิเทล ราชา ออคิด ขอนแก่น



ดำเนินการจัดประชุมโดย
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น



การศึกษาลักษณะการฉีดประจุชนิดเบอรอนาสในเครื่องยิงฝังประจุสำหรับกระบวนการผลิตวงจรรวม

A Study of Bernas Type Ion Source in Ion Implanter
for Integrated Circuit Fabrication

การุณ แซ่จอก นนศรี แสนละมุล สุวัฒน์ โลภิกพันธ์ การัน สยามรัช และ จิธี อุทธาภรณ์

ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ
51/4 หมู่ 1 จังหวัดเชียงใหม่ จ.เชียงใหม่ 24000 โทร. 038-857-100 ถึง 9 โทรสาร 038-857175 email: Karoon.saejok@necitec.or.th

บทคัดย่อ

ในการยิงฝังประจุด้วยแหล่งกำเนิดประจุชนิดเบอรอนาส เป็นที่นิยมในปัจจุบันในขั้นตอนการเจือสารสำหรับกระบวนการผลิตวงจรรวม อย่างไรก็ตามการใช้เครื่องยิงฝังประจุกระแสขนาดกลาง (Medium-Current Ion Implanter) ไปใช้ในการเจือสารที่มีปริมาณเข้มข้นสูง เช่นพื้นที่ซอร์ส และเดรนสำหรับกระบวนการผลิต CMOS นั้นจำเป็นต้องอาศัยที่รองรับกระแสไอออนที่มีค่าสูง โดยการหาเงื่อนไขของ จักรวาลไหล กล้าช กระแสอาร์ค และ กระแสที่ป้อนแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก

ในการวิจัยนี้ได้หาเงื่อนไขเพื่อได้ค่ากระแสไอออน I_B สูงสุด โดยการเจือสารชนิดพีโดยใช้ก๊าซโบรอนไตรฟลูออไรด์ (BF₃) ในเครื่องยิงฝังประจุกระแสขนาดกลางและพบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมคือ จักรวาลไหลกล้าช เท่ากับ 0.8 cc/min กระแสอาร์ค เท่ากับ 3.8 แอมแปร์ และ กระแสที่ป้อนแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กเท่ากับ 1.3 แอมแปร์

คำสำคัญ : แหล่งกำเนิดประจุ, กระแสไอออน, กระบวนการผลิตวงจรรวมชนิดซีมอส

Abstract

The Bernas-type ion source of implantation is widely used for doping process in IC fabrication. However, using medium-current ion implanter to create a high-dose implantation such as a source/drain region of CMOS integrated circuit that have to using high ion Beam current, most notably the adjustments of gas flow, arc current and source magnet current.

This study attempts to maximize the Boron ion beam current (I_B) for doping a p-type region using Borontrifluoride (BF₃) gas in a medium-current ion implanter. We have found that the optimal flow of BF₃ is 0.8 cc/min

with the source magnet current at 1.3A and arc current at 3.8A

Keywords: Ion Source, Ion Beam Current, CMOS Integrated Circuit

1. คำนำ

การวิจัยเป็นการวิจัยเพื่อสนับสนุนการวิจัยวงจรรวมด้วยเทคโนโลยีที่ต่ำกว่า 1 ไมครอน[1-4] ซึ่งต้องสร้างบริเวณ Active area ที่มีความเข้มข้นสูงมาก เช่น ซอร์สและเดรน ที่สารเจือปริมาณ 5×10^{18} ไอออน/ซม³ ซึ่งใช้เทคนิคการเจือสารด้วยไอออนอิมพลานเตอร์ และจากความสัมพันธ์[5,6] ดังสมการที่ 1 จะเห็นว่าปริมาณสารเจือแปรผันโดยตรงกับกระแสไอออน และเวลา แต่การยิงสารเจือใช้เวลาากเกินไปจะเป็นผลให้ชั้นโพสิทีฟซีดี แค้ตัวทำให้ล้าจัดการยาก

$$D = IT/NQA \quad (1)$$

D = ปริมาณสารเจือ หน่วย ไอออน / ซม³

T = เวลาในการยิง หน่วย วินาที

I = กระแสไอออน หน่วยเป็น แอมแปร์

N = จำนวนประจุต่อไอออน 1ตัว เช่น 11B⁺ เท่ากับ 1

Q = 1.6×10^{19} คูลอมป์

A = เป็นพื้นที่หน้าตัดเป็นตารางเซนติเมตร

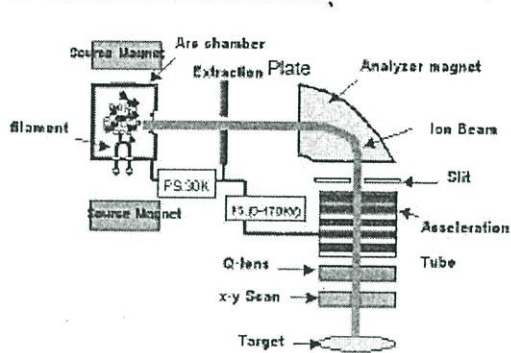
ด้วยเหตุนี้เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์จึงจำเป็นต้องคำนึงถึงกระแสไอออนในปริมาณมาก ๆ เพื่อการสารเจือสารที่มีความเข้มข้นสูง และลดเวลาในการยิงฝังประจุ

ปริมาณกระแสไอออนของเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ ส่วนใหญ่จะขึ้นกับแหล่งกำเนิดประจุ ดังนั้นการหาเงื่อนไขค่าที่ดีที่สุดภายในแหล่งกำเนิดประจุมีความสำคัญต่อค่ากระแสไอออน

โดยทั่วไปแหล่งกำเนิดประจุที่นิยมใช้ในปัจจุบันมี 2 ชนิด [7] คือ ชนิดฟรีแมน (Freeman type) และ ชนิดเบอรอนาส (Bernas Type) แต่ชนิดเบอรอนาสจะดีกว่าประเภทที่มีอายุการใช้งานนานกว่า ซึ่งในการวิจัยนี้ของกล่าวเฉพาะชนิดเบอรอนาสเท่านั้น

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27 (EECON27) 11-12 พฤศจิกายน 2547 มข.

2. หลักการทำงานของเครื่องยิงฟิวเจอร์



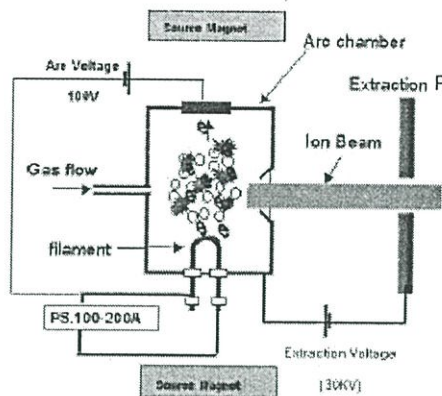
รูปที่ 1 แผนผังของเครื่องยิงฟิวเจอร์

หลักการทำงานของเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ คือประจุจะถูกสร้างด้วยแหล่งกำเนิดประจุ (Ion Source) แล้วประจุบวกจะถูกดึงออกมาด้วยศักย์ไฟฟ้า Extraction ประมาณ -30 kV แล้วเคลื่อนที่ไปสู่ Analyzer magnet และ ประจุที่ไม่ต้องการจะถูกกรองออกที่ตำแหน่งนี้ หลังจากนั้นประจุที่ผ่านการกรองจะเคลื่อนที่ผ่าน Slit และ ถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าเพิ่มอีก 0-170kV ที่ Acceleration tube หลังจากนั้นจะถูก โฟกัสด้วย Quadrupole-lens และ การลำเลียงประจุไอออนด้วย X-Y Scan ไปยังเป้าหมาย

3. แหล่งกำเนิดประจุชนิดเบอว์เรส และ Extraction

แหล่งกำเนิดประจุชนิดเบอว์เรส จะประกอบไปด้วย Arc Chamber, ขดลวดทั้งขด (Filament), แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก (Source Magnet) และ แหล่งจ่ายก๊าซ ดังรูปที่ 2 โดยมีการทำงานโดยการจ่ายกระแสให้ขดลวดประมาณ 200A และมีกรจ่ายค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่าง Arc Chamber และ ขดลวด 100V อิเล็กตรอนจากขดลวดทั้งขดจะเคลื่อนไปยัง Arc chamber จะไปชนกับกลุ่มก๊าซทำให้เกิดการไอออไนเซชัน (Ionization) ซึ่งอิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกเหนี่ยวนำด้วยแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก ทำให้เกิดการหมุนตัว (spin) เพื่อเพิ่มอัตราการวน ทำให้มีประจุมากขึ้น ส่วนประจุบวกจะถูกดูดไปยัง Extraction plate ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ 30kV เมื่อเทียบกับ Arc Chamber

หมายเหตุ แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก (Source Magnet) คือ สนามแม่เหล็กที่ตำแหน่ง แหล่งกำเนิดประจุ และ



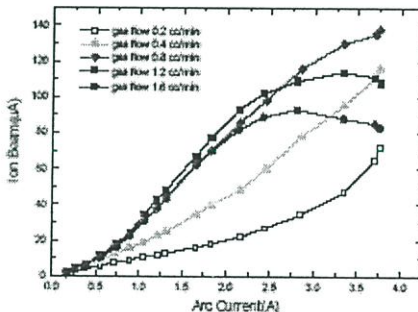
รูปที่ 2 แผนผังของส่วนแหล่งกำเนิดประจุไอออนชนิดเบอว์เรส

กระแสอาร์ค (Arc Current) คือกระแสอิเล็กตรอนที่วิ่งจากขดลวด ไปยัง Arc Chamber ปริมาณ Arc Current จะขึ้นกับกระแส ที่จ่ายให้กับ ขดลวดทั้งขด โดยทั่วไป กระแส ที่จ่ายให้ขดลวดจะเท่ากับ 100-200A

4. การทดลอง และผลการทดลอง

การทดลองปรับค่ากระแสไอออนครั้งนี้ใช้เครื่องยิงประจุรุ่น NH 20SR medium current ซึ่งมีแหล่งกำเนิดประจุชนิด เบอว์เรส และปล่อยก๊าซ BF₃ แล้วใช้ Analyzer Magnet เลือก ประจุไอออน „B“ ที่ AMU (Atomic mass number) = 11

การทดลอง 4.1 ใช้พลังงาน 100keV และได้ทำการวัดกระแสไอออนที่ค่า Arc current ตั้งแต่ 0 ถึง 3.8 A โดยการแปรค่า Gas Flow 0.2, 0.4, 0.8, 1.2 และ 1.6 cc/min และ กระแสที่ป้อนแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก (Source Magnet Current) เท่ากับ 1.07 A ผลการทดลองได้ดังรูปที่ 3

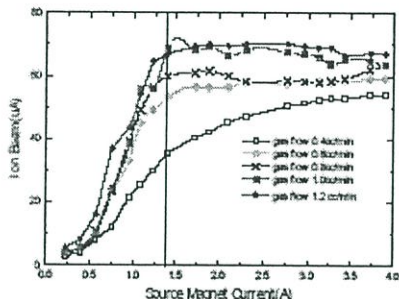


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Ion Beam Current กับ Arc Current

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27 (EECON27) 11-12 พฤศจิกายน 2547 มช.

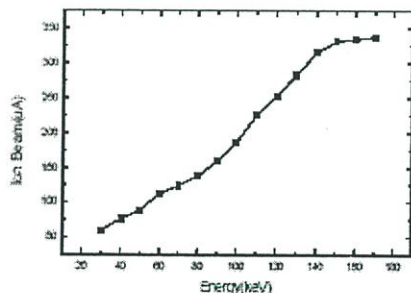
ECON 27

การทดลอง 4.2 ใช้พลังงาน 100keV และได้ทำการวัดกระแสไอออนขณะที่ทำการปรับค่ากระแสที่ป้อนแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก เปลี่ยนตั้งแต่ 0 ถึง 4.0 A และปรับค่า Gas Flow 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 และ 1.2 cc/min Arc Current เท่ากับ 1.62A ผลการทดลองได้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Ion Beam กับ Source Magnet Current

การทดลอง 4.3 ได้ทำการวัดกระแสไอออนที่ค่า พลังงาน ตั้งแต่ 30 keV ถึง 170 keV และที่ค่า Gas Flow 0.8 cc/min Arc current เท่ากับ 3.8 A และกระแสที่ป้อนแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก 1.3A ผลการทดลองได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Ion Beam กับ Energy

5.วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองรูปที่ 3 พบว่า ที่ค่า Gas flow เท่ากับ 0.2, 0.4 และ 0.8 cc/min กระแสไอออนเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่ม Arc current เพราะว่ามีปริมาณก๊าซเกิดไอออนในเซเวนหรือเกิดการดีสชาร์จเพิ่มขึ้นอยู่ภายใน Arc chamber แต่ที่ค่า Gas flow ที่ช่วง 1.2 และ 1.6 cc/min พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงกระแสไอออนกลับ Arc current สองความสัมพันธ์คือ ค่ากระแสไอออนเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่ม Arc current ในช่วง 0-2.7A เพราะว่ามีปริมาณก๊าซเกิดไอออนในเซเวนหรือเกิดการดีสชาร์จเพิ่มขึ้นอยู่ภายใน Arc chamber และ ค่ากระแสไอออนลดลงเมื่อทำการเพิ่ม Arc current ในช่วง 2.7-4 A ที่เป็นเช่นนั้นเพราะว่ามีปริมาณก๊าซมากและ Arc current มากเกินไป [8] ทำให้จึงเกิดไอออนไม่ชนวนมากเกินไปและขอยกมานอก Arc Chamber เป็นเหตุให้ทิศทางเคลื่อนที่กระแสไอออนเปลี่ยนไป เมื่อทำการดึงไอออนจาก Arc Chamber ไปยัง Extraction plate เป็นเหตุให้กระแสไอออนส่วนหนึ่งไม่ผ่านรูของ Extraction plate ทำให้ปริมาณกระแสไอออนลดลง เพราะฉะนั้นปริมาณก๊าซควรอยู่ในระดับที่เหมาะสมซึ่งในที่นี้พบว่าเป็นค่าคือไว้ เท่ากับ 0.8cc/min

จากผลการทดลองรูปที่ 4 พบว่า ที่ค่า Gas flow เท่ากับ 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 และ 1.2 cc/min กระแสไอออนเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่ม Source Magnet Current ในช่วง 0-1.3A ที่เป็นเช่นนั้นเพราะว่ามีปริมาณ อิเล็กตรอนที่ไปชนกลุ่มก๊าซอุณหภูมิต่ำด้วยสนามแม่เหล็ก และเมื่อทำการเพิ่มค่า Source Magnet Current จะทำให้ อิเล็กตรอนเกิดการ Spin มากขึ้น ทำให้เกิดการดีสชาร์จมากขึ้น เป็นเหตุให้เกิดกระแสไอออนมากขึ้น แต่กระแสไอออนเริ่มคงที่เมื่อเพิ่ม Source Magnet Current ช่วง 1.3-4.0Aที่เป็นเช่นนั้นเพราะว่ามีปริมาณกลุ่มก๊าซต่ำลงที่ การเพิ่มค่า Source Magnet Current จะทำให้ อิเล็กตรอนเกิดการ Spin มากขึ้นในได้ทำให้กลุ่มการดีสชาร์จมากขึ้นเป็นเหตุให้กระแสคงที่ ดังนั้นกระแสของแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กที่ทำให้เกิดการไอออนในเซเวนสูงสุด คือ 1.3A

จากผลการทดลองรูปที่ 5 พบว่าเมื่อทำการเพิ่มพลังงานปริมาณกระแสไอออนมีการเพิ่มขึ้น ที่เป็นเช่นนั้นอธิบายได้จาก ผลของ Space charge [9] ภายในกระแสไอออน ที่พลังงานค่าขนาดของ Space Charge ในอุณหภูมิกว่ากระแสไอออนที่พลังงานสูง โดยที่เมื่อ Space charge มากจะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกระแสไอออน มีขนาดใหญ่ขึ้นเป็นเหตุให้ถูกลดแรงออกมาจะเคลื่อนที่ผ่าน slit ทำให้กระแสลดลงแล้วถ้า Space charge มีขนาดเล็กกว่า กระแสไอออนจะเคลื่อนที่ผ่าน slit ได้มากกว่าทำให้ได้กระแสไอออนมากกว่า ดังนั้นที่พลังงานมากขึ้น ทำให้กระแสไอออนมากขึ้น

จากเงื่อนไขที่ทำการทดลองนี้เราได้มีเงื่อนไขที่ดีที่สุดไปทำการปรับค่ากระแส สูงสุดซึ่งได้เท่ากับ 331uA โดยมีเงื่อนไขการปรับดังนี้ คือ ชนิด Li^+ , พลังงาน 150keV, Arc current เท่ากับ 3.8 A, ค่ากระแสที่ป้อน

EJL14

แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กเท่ากับ 1.5A ค่ากระแสไอออนในสนามกร นำไปใส่ในสารเจือปนชนิดที่ ที่ความเข้มข้น 5×10^{18} ไอออน/ซม³ ใช้เวลา ประมาณ 6.9 นาที ที่พื้นที่ 160 ตารางเซนติเมตร ความหนา 1

6.สรุปผลการทดลอง

จากการหาเงื่อนไขแหล่งกำเนิดประจุเพื่อปรับค่ากระแสไอออนให้ได้ค่าสูงสุด พบว่าปริมาณ ที่เหมาะสมการยิงประจุ วมิลลิ "B" คือ Gas flow เท่ากับ 0.8 cc/min ค่ากระแสที่ป้อนแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก เท่ากับ 1.3 A ค่า Arc Current เท่ากับ 3.5A นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อทำการเพิ่มพลังงาน แล้วค่ากระแสไอออนก็จะเพิ่มขึ้นตาม เมื่อนำเงื่อนไขไปใช้ในการปรับกระแสซึ่งสามารถสร้างกระแสไอออน เท่ากับ 331µA ที่พลังงาน 150keV ซึ่งสามารถนำไปสร้างสารเจือที่มีควมเข้มข้นสูงในเวลาอันสั้นได้ จะเป็นประโยชน์ในการสร้างวงจรรวมเทคโนโลยีต่ำกว่า 1 ไมครอนต่อไป

7.กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณบุคลากร IMEC-NECTEC ทุกท่านที่สนับสนุนการวิจัย

8.เอกสารอ้างอิง

- [1] Iti Rittaporn and Pavan Siamchai, "Progress Report on NECTEC's Microelectronics Project", Proceedings The First NRCT-KOSEF Joint Seminar on Semiconductors, , Nov 30-Dec1, 1999, pp. 30-33.
- [2] Pavan Siamchai, "Thailand's First Integrated Circuit Fabrication Facility (2)", EECON25, 2002
- [3] STANLEY WOLF, "SILICON PROCESSING FOR VLSI Vol. 1: PROCESS TECHNOLOGY", Lattice Press, 1995.
- [4] STANLEY WOLF, "SILICON PROCESSING FOR VLSI Vol. 3: THE SUBMICRON MOSFET", Lattice Press, 1995.
- [5] Iti Rittaporn and Pavan Siamchai, "Progress Report on NECTEC's Microelectronics Project", Proceedings The First NRCT-KOSEF Joint Seminar on Semiconductors, , Nov 30-Dec1, 1999, pp. 30-33.
- [6] Seonank Panyokeow and Iti Rittaporn, "Microelectronics Industry and Research and Development in Thailand " ASEAN-ROK Workshop on Microelectronics, Bangkok, Feb 21-23, 2000
- [7] Ion Implanter Technology for 0.25um Device, Applied Material, 2000,pp14-16
- [8] NH-205R Medium Ion Implanter Operation Manual, Nissin Electric Co., Ltd. Japan.
- [9] Heiner Ryzzel and Ingolf Ruge, " Ion Implantation", John & Sons Ltd, 1986, pp 130-132.



กาวุช แซ่จ๊อค
วิทยาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ จาก
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปี พ.ศ.2539
ทำงานในตำแหน่งวิศวกร ณ บ.ชัยไมโครดอน
จำกัด ปี พ.ศ. 2540 หลังจากนั้นทำงานใน

ตำแหน่งวิศวกร บ.ไอโปร อิเล็กทรอนิกส์ จำกัด ปี พ.ศ.2543 ปัจจุบัน
ทำงานในตำแหน่งผู้ช่วยนักวิจัย ที่ ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์



มนตรี แวนละมุก, วท.บ.ฟิสิกส์ จาก
มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ ปี พ.ศ. 2546 ปัจจุบัน
ทำงานในตำแหน่งผู้ช่วยนักวิจัย ศูนย์
เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ มีความ
สนใจงานวิจัยทางด้าน Ion Implanter development and Semiconductor

processing



สุวัฒน์ สโรสุกพันธ์
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาไฟฟ้า จาก
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ปี พ.ศ. 2528
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ศึกษบัณฑิต
จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปี พ.ศ. 2534

และพ.ศ. 2540 คามลัดคัม ปัจจุบันทำงานในตำแหน่งนักวิจัย ที่ ศูนย์
เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์



กววิน สมวันจ๊ะ วศ.บ. เกียรตินิยมอันดับสอง
และ วศ.ม. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จาก จุฬาลง
กรณ์มหาวิทยาลัย Ph. D สาขาไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ จากสถาบัน
เทคโนโลยีแห่งไคเคียว พ.ศ. 2539 ตำแหน่งปัจจุบัน นักวิจัย process
integration ศูนย์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์

ปัจจุบันทำงานในตำแหน่งนักวิจัย ที่ ศูนย์



จิตติ อุทธารณ์
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหามบัณฑิต และ
คุณวุฒิปดิก สาขา ฟิสิกส์ประยุกต์ จาก
มหาวิทยาลัยไคเคียว ประเทศญี่ปุ่น ปี
พ.ศ. 2526 พ.ศ. 2528 และ พ.ศ. 2531

คนลำดับ หลังจากนั้นทำงานที่ Superconductivity Research Laboratory

(SRL) จาก International Superconductivity Technology

Center (ISTEC) ในตำแหน่ง Senior Researcher ปี พ.ศ. 2531-2539

ประเทศญี่ปุ่น ปัจจุบันทำงาน ตำแหน่งหัวหน้าศูนย์วิจัย ที่ ศูนย์
เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์



การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27 (EECON27) 11-12 พฤษภาคม 2547 มช.

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 26
26th Electrical Engineering Conference

NECTEC

Seagate
We turn on ideas

ABB

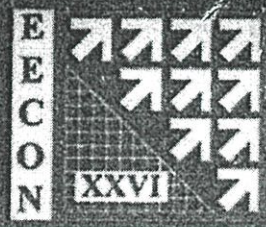
AIS

Volume II
สาขาบทความ
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- ไฟฟ้าสถิต (CM)



6-7 พฤศจิกายน 2546
โรงแรมโกลเด้นแลนด์ ซะอ่า จ.เพชรบุรี

สนับสนุนโดย:
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีวิศวกรรมกำลังไฟฟ้า



การพัฒนากระบวนการปลูกฟิล์มโลหะหลายชั้นด้วยเทคนิคสปัตเตอริงสำหรับการสร้างวงจรรวม

Development of Multi-layer Metallisation using Sputtering Technique for Integrated Circuit Fabrication

การุณ แซ่จอก อิศริ เสนาบุรณ สุวิวัฒน์ โสภิตพันธ์ กาวัน สยามชัย และ อภิสิทธิ์ อุตสาหกรรม
ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ
51/4 หมู่1 รัชตะเดือน อมเมือง ฉะเชิงเทรา 24000 โทร. 038-857-100 ถึง 9 email: Karoon.saejok@nectec.or.th

Kazuo Imai และ Kazuhito Sakuma
NTT-Advance Technology Corporation
2-1-1 Nishi-shinjuku Shinjuku-ku Tokyo, Japan Tel. 8190-1123-4762 email: imai@chizai.ntt-at.co.jp

บทคัดย่อ

ได้มีการปลูกฟิล์มโลหะอัลลอย AISI ด้วยเทคนิคสปัตเตอริงภายใต้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระลอกคลื่นวิทยุ (RF Sputtering) บนแผ่นฐานซิลิคอน และ ซิลิคอนไดออกไซด์ โดยได้ทำการทดลองแปรค่าพลังงานของคลื่นวิทยุในช่วง 100-200วัตต์ จากนั้นได้ทำการวิเคราะห์สภาพผิวของชั้นฟิล์มด้วยเทคนิค AFM (Atomic Force Microscopy) การวิเคราะห์องค์ประกอบของเนื้อฟิล์มที่ระดับความลึกต่างๆ ด้วยเทคนิค SIMS (Secondary Ion Mass Spectroscopy) รวมถึงการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าพบว่าพลังงานของคลื่นวิทยุดังกล่าวมีผลต่อคุณสมบัติของชั้นฟิล์มโลหะอัลลอย ซึ่งข้อมูลที่ได้รับนี้จะประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการสร้างวงจรรวมโลหะแบบหลายชั้นสำหรับวงจรรวมความหนาแน่นสูงต่อไป

คำสำคัญ: การปลูกฟิล์มโลหะหลายชั้น, สปัตเตอริง, วงจรรวมซิลิคอน

Abstract

Growing of AISI alloy film has been done using RF Sputtering technique. The films were grown on silicon and silicon dioxide substrates under RF power varied from 100-200W. Atomic Force Microscopy: AFM, Has been used to check surface morphology. Secondary Ion Mass Spectroscopy: SIMS, has been used to evaluate the film content profile. Electrical property of the films was also verified. The results show that, morphology and film content respond to the RF power during sputtering time. Advantage of this experiment could be enhanced in fabrication of multi-layer-metal integrated circuit.

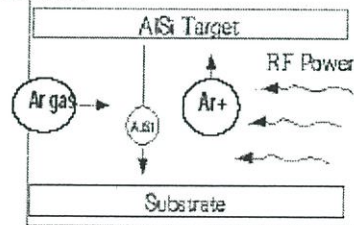
Keywords: Multi-layer Metallization, Sputtering, CMOS Integrated Circuit

1. คำนำ

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาวิจัยเพื่อสนับสนุนการสร้างวงจรรวมขนาดใหญ่ที่จำเป็นต่อการเชื่อมต่อระหว่างทรานซิสเตอร์เป็นจำนวนมากในพื้นที่จำกัด เช่นการสร้างวงรีโพลีโคท 1 ชั้น และชั้นโลหะ 2 ชั้น ชั้นของโลหะที่ใช้คืออัลลอยของ AI ที่มีซิลิคอนผสมอยู่ 2% เพื่อป้องกันการเกิดปรากฏการณ์แพร่ซึมที่รอยต่อบริเวณ Source/drain ของอะลูมิเนียม (Spiking)

ในขั้นตอนการ Sintering เพื่อสร้างรอยต่อแบบ โอห์มิก ชั้น AISI นี้สร้างโดยวิธี ออบยูนในอุณหภูมิที่ 400 องศาเซลเซียสบรรยากาศของก๊าซ N₂ 97% และ H₂ 3% แต่กรณีที่เกิด Sintering ในระหว่างทำการสปัตเตอริง นั้นเป็นสิ่งที่ไม่ดีเพราะไม่สามารถควบคุมกระบวนการทำงานให้คงที่ได้ และความเรียบของเนื้อฟิล์ม AISI เป็นสิ่งสำคัญต่อกระบวนการสร้างฟิล์มชั้นต่อไปเพราะกรณีที่ฟิล์มที่มีผิวเรียบทำใหฟิล์มชั้น ทำใหการสร้างรูปแบบ (print pattern) ในชั้นต่อไปทำได้ยาก เพราะไม่เห็นรูปแบบฟิล์มที่ถูกสร้างในลำดับก่อนที่ใช้เป็นจุดอ้างอิง เป็นเหตุให้รูปแบบที่สร้างขึ้นมีโอกาสไม่ตรงกับรอยต่อที่ต้องการหรือคลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งที่ต้องการ นอกจากนี้ฟิล์มที่มีโครงสร้างหยาบจะมีความพรุนภายใน เป็นเหตุให้มีความสมบัติการนำไฟฟ้าที่ไม่ดี ดังนั้นฟิล์มที่เรียบย่อมมีความสำคัญต่อกระบวนการสร้างวงจรรวมซึ่งจะใช้ในฟิล์มโลหะหลายชั้น

2. เครื่อง สปัตเตอริง



รูปที่ 1 Sputtering Diagram

การทดลองสร้างแผ่นฟิล์ม AISI นี้ใช้เครื่องสปัตเตอริงรุ่น ANELVA SPF 210 ด้วย RF ที่ความถี่ 13.56 เมกะเฮิรตซ์

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 26 (EECON26) 6-7 พฤศจิกายน 2546 สจพ.

EE37

ภายในระบบที่มีสูญญากาศ ระดับ 5X10⁻⁷ ฟิล์มจะใช้ก๊าซอาร์กอน (Ar) ที่อุณหภูมิตั้งเป็นพลาสมาและไปรวมกับ เป้า AISI (AISI Target) ด้วยค่าพลังงานต่างๆ เช่น 150วัตต์ อาจให้ความดันสูญญากาศที่ กำหนด หลังจากนั้น AISI ที่อุณหภูมิดิวอาร์กอนพลาสมาจะเคลื่อนที่ไป เคลือบกันตัวอย่างหรือตำแหน่งที่ติดตั้งสารสร้างฟิล์ม AISI

3. การทดลอง

ทำการทดลองโดยนำแผ่นเวเฟอร์มาทำการทดลองตามเงื่อนไขตาม ตารางที่ 1 และ ใ้จุดสนใจของแผ่นเวเฟอร์ก่อนทำการทดลองดังนี้

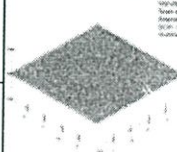
ตารางที่ 1 เงื่อนไขของการทดลอง

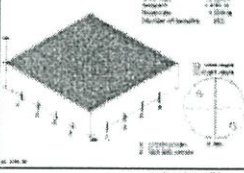
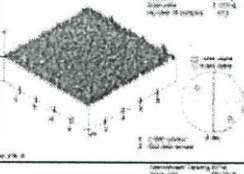
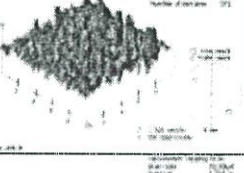
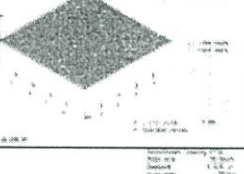
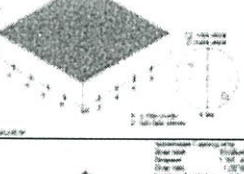
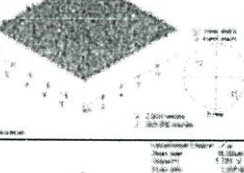
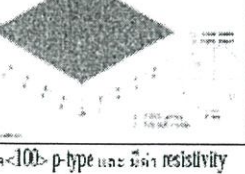
Wafer No.	เงื่อนไขการทดลอง				
	Substrate type	Opt Pressure (mbar.)	Power / Reflect (W)	Pre-sputter (min)	Sputter time (min)
1.	Si	2x10 ⁻³	100/20	5	85
2.	Si	2x10 ⁻³	135/35	5	59
3.	Si	2x10 ⁻³	170/40	5	50
4.	Si	2x10 ⁻³	200/50	5	48
5.	SiO ₂	2x10 ⁻³	100/20	5	85
6.	SiO ₂	2x10 ⁻³	135/35	5	59
7.	SiO ₂	2x10 ⁻³	170/40	5	50
8.	SiO ₂	2x10 ⁻³	200/50	5	48

4. ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองจากกราฟค่า resistance, Reflectance และการเปรียบเทียบด้วย AFM (Atomic Force Microscope)

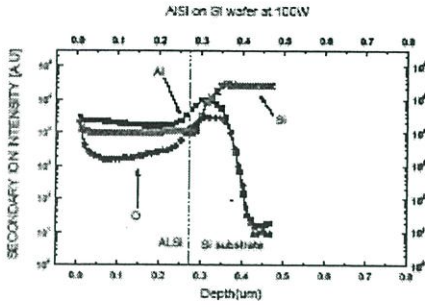
ตารางที่ 2 ผลการวัด resistance, Reflectance และการเปรียบเทียบด้วย AFM (Atomic Force Microscope)

แผ่นเวเฟอร์ที่	ผลการทดลอง			AFM (Atomic Force Microscope) picture
	R (Ohm)	Reflectance (%)	ความหนา (nm)	
1	0.6	100	0.276	
Growth Rate (Angstrom/min)				
32.5				

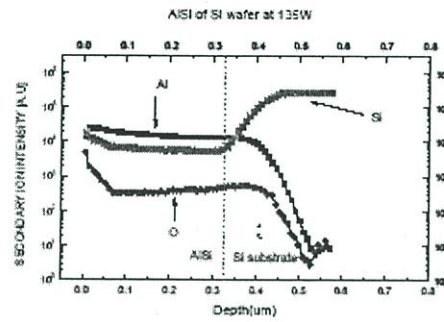
2	0.6	100	0.32	
Growth Rate (Angstrom/min)				
50.4				
3	0.6	75	0.324	
Growth Rate (Angstrom/min)				
64.8				
4	0.6	50	0.5	
Growth Rate (Angstrom/min)				
104.2				
5	0.6	100	0.276	
Growth Rate (Angstrom/min)				
32.5				
6	0.6	100	0.32	
Growth Rate (Angstrom/min)				
50.4				
7	0.6	90	0.324	
Growth Rate (Angstrom/min)				
64.8				
8	0.6	90	0.5	
Growth Rate (Angstrom/min)				
104.2				

หมายเหตุ แผ่น Si substrate เป็นชนิด <100> p-type และ มีค่า resistivity เท่ากับ 35 Ohm-cm

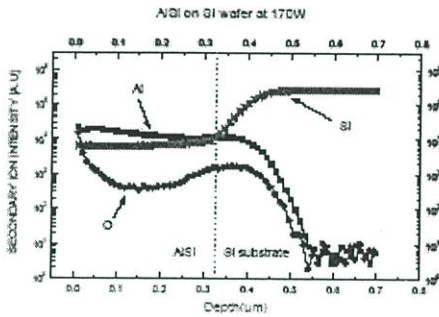
DL37



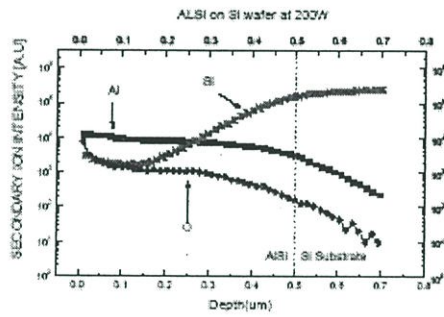
รูปที่ 2 a ผล SIMS พิสูจน์ AlSi บนซิลิคอนเวเฟอร์ ที่ 100W



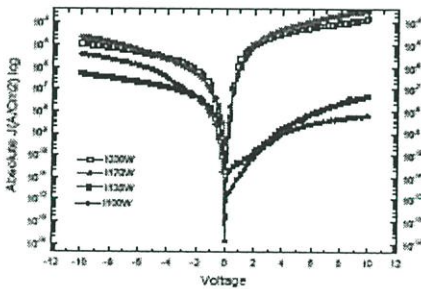
รูปที่ 2 b ผล SIMS พิสูจน์ AlSi บนซิลิคอนเวเฟอร์ ที่ 135W



รูปที่ 2 c ผล SIMS พิสูจน์ AlSi บนซิลิคอนเวเฟอร์ ที่ 170W



รูปที่ 2 d ผล SIMS พิสูจน์ AlSi บนซิลิคอนเวเฟอร์ ที่ 200W



รูปที่ 3 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของฟิล์มที่ระดับพลังงาน RF ต่างๆ

4.2 ผลการทดลองเกี่ยวกับเครื่องมือ SIMS (Secondary Ion Mass Spectroscopy)

ได้ทำการนำแผ่นทดลองหมายเลข 1, 2, 3 และ 4 ซึ่งเป็นเงื่อนไข RF สเปคเตอร์ริง บนซิลิคอนเวเฟอร์ที่พลังงาน 100W, 135W, 170W และ 200W ไปทำการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบของเนื้อฟิล์มในระดับความลึกต่างๆ ด้วยเทคนิค SIMS ที่ได้ผลดังรูปที่ 2

4.3 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า

ได้ทำการนำแผ่นทดลองหมายเลข 1, 2, 3 และ 4 ซึ่งเป็นเงื่อนไข RF สเปคเตอร์ริง บนซิลิคอนที่พลังงาน 100W, 135W, 170W และ 200W ไปทำการวัดด้วยคุณสมบัติกระแสและแรงดัน โดยการป้อนความต่างศักย์ -10 โวลต์ ถึง 10 โวลต์ ที่ตำแหน่งฟิล์ม AlSi และ ให้นำบริเวณซิลิคอนเป็นควารต์และผลการวัดได้ดังรูปที่ 3

5.วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่าในการสร้างฟิล์ม AlSi บน ซิลิคอนเวเฟอร์ โดย RF สเปคเตอร์ริง ที่พลังงาน 100W และ 135W จะได้ฟิล์มที่มีลักษณะราบเรียบมาก ที่พลังงาน 170W ได้ฟิล์มที่มีลักษณะขรุขระเล็กน้อยและที่พลังงาน 200W ได้ฟิล์มที่มีลักษณะขรุขระมาก ว่าในการสร้างฟิล์ม AlSi บน ซิลิคอนไดออกไซด์ ที่พลังงาน 100W, 135W, 170W และ 200W มีความแตกต่างกันไม่มากนัก ดังนั้นพลังงานจาก RF สเปคเตอร์ริงมีผลต่อความราบเรียบของฟิล์ม AlSi บน ซิลิคอน โดยเมื่อเพิ่มพลังงาน RF สเปคเตอร์ริงให้สูงขึ้น ความราบเรียบของผิวจะลดลง

จากผลการวิเคราะห์ SIMS จะเห็นได้ว่าองค์ประกอบปริมาณการแพร่ของอะลูมิเนียมจากบริเวณรอยต่อ AlSi โดยระยะการแพร่จะมีเงาเพิ่มขึ้น

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 26 (EECON26) 6-7 พฤศจิกายน 2546 สจพ.

เมื่อมีการใช้พลังงาน RF สูงขึ้น กระบวนการแพร่ของอะตอมจะเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการขยายขอบเขตของโลหะที่ละลาย ถ้าการขยายขอบเขตนี้มากเกินไปจะทำให้บริเวณของ Source/Drain ในโครงสร้าง CMOS จะเกิดการทะลุเสียหายได้ (Spiking effect)

ผลการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อ ตามรูปที่ 3 จะเห็นว่าเมื่อใช้พลังงาน RF สูงขึ้น สภาพการนำไฟฟ้าของรอยต่อจะเป็นลักษณะหน้าสัมผัสโหนดมากขึ้น แต่การเกิดปรากฏการณ์นี้เป็นสิ่งที่ควรหลีกเลี่ยงในกระบวนการผลิตวงจรรวม เพราะเป็นการเกิดขึ้นเองโดยอัตโนมัติการควบรวม(Self Sintering)

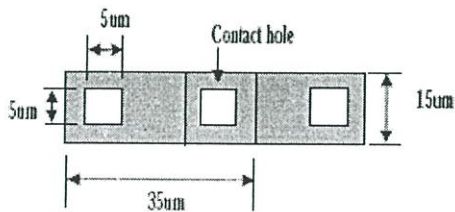
6. การประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตวงจรรวม

จากการทดลองนี้เราได้นำเงื่อนไข RF สเปคเตอร์ริงที่พลังงาน 135 W ไปทำการสร้าง 2 metal layers โดยทำการออกแบบเป็น Contact Chain เพื่อทดสอบ การนำไฟฟ้า และการเชื่อมต่อของฟิล์ม AISI เพื่อนำไปสร้างตัวเชื่อมนำไฟฟ้าของ CMOS ต่อไป

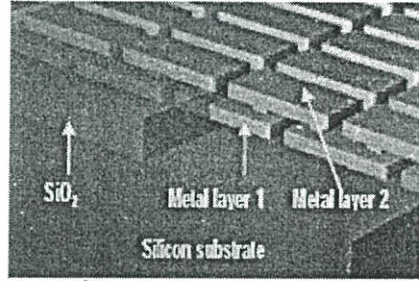
การออกแบบเป็น Contact Chain ซึ่งแต่ละอันมีขนาด 15 ไมครอน x 35 ไมครอน หนา 5,000 Å และ Contact hole ขนาด 5 ไมครอน x 5 ไมครอน ดังรูปที่ 4 และ 5 นำมาต่อกันดังรูปที่ 6 คือฟิล์ม AISI ชั้นที่ 1 และ รูปที่ 7 คือฟิล์ม AISI ชั้นที่ 2 ซึ่งเป็น Contact Chain ที่สมบูรณ์ ซึ่งระหว่าง ตำแหน่ง 1 กับตำแหน่ง 2 มี 2 contact chains, ระหว่างตำแหน่ง 2 กับตำแหน่ง 3 มี 280 contact chains และ ระหว่าง ตำแหน่ง 2 กับตำแหน่ง 4 มี 480 contact chains โดยมีการสร้างจำนวนซิลิคอนไดออกไซด์ชั้นระหว่างชั้นฟิล์มของ AISI ชั้นที่ 1 และ 2 ด้วยวิธีการ PECVD (Plasma Enhance Chemical Vapor Deposition) หนา 5000 Å [4] โดยผลที่ได้คือ ค่าความต้านทานระหว่างชั้นฟิล์ม ของ AISI ชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 เป็นดังตารางที่ 3 นี้มีความสามารถนำไฟฟ้าได้ดี

ตารางที่ 3 ค่าความต้านทานของ Contact chain

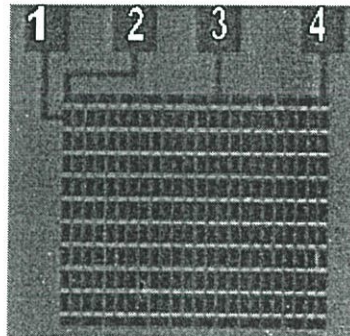
ตำแหน่ง	จำนวน Contact Chain	ความต้านทาน(Ω)
R1,2	2	10
R2,3	48	58
R2,4	280	91



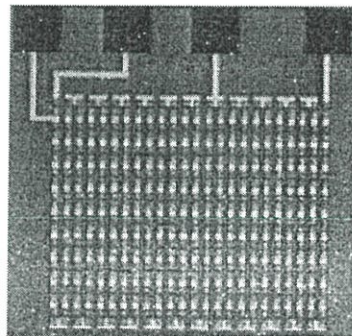
รูปที่ 4 ขนาดของ 1 Contact Chain



รูปที่ 5 แบบจำลองโครงสร้างของ Contact Chain



รูปที่ 6 Contact Chain of 1st layer AISI film



รูปที่ 7 Contact Chain of 2nd layer AISI film

EL37

7. สรุปผลการทดลอง

พลังงานจาก RF สเปคเตอร์ริงมีผลต่อการรวมตัวของฟิล์ม AISI บน ซิลิคอน โดยเมื่อเพิ่มพลังงาน RF สเปคเตอร์ริงให้สูงขึ้น ความเรียบของผิวลดลง แต่ความความเรียบของฟิล์ม AISI บนซิลิคอนไดออกไซด์มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย นอกจากนี้พลังงาน RF ในขณะปลูกฟิล์มจะทำให้เกิดการแพร่ของอะตอมลงไปในชั้นฟิล์ม

ซีดีคอน ทำให้ขอมเขตของอิเล็กตรอนขยายออกไปจากรอยต่อ ซึ่งหากไว้
พลังงานสูงเกินไปจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ Spiking ในโครงสร้าง
รอยต่อ Source/Drain ได้ แม้ว่าจะเลือกหน้าสัมผัสโลหะมีกั้นก็เป็นการเกิด
ในสภาวะที่ไม่สามารถควบคุมได้ ซึ่งจะเกิดผลเสียต่อกระบวนการเกิด
วงจรรวม นอกจากนี้ความเรียบของชั้นฟิล์มโลหะจะต้องควบคุมให้มี
ความเหมาะสมเพื่อประโยชน์ในการถ่ายแบบลวดลายในลำดับขั้นต่อไป

8. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ อ. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ หัวหน้าศูนย์วิจัย
อิเล็กทรอนิกส์ สจว. รวมทั้ง คณาจารย์ และเจ้าหน้าที่ของศูนย์ทุกท่าน
ในความร่วมมือด้านสถานที่ เครื่องจักร และบุคลากร ของของคุณ Mr.
Sakakibara และบุคลากรของ NTT-AT ประเทศญี่ปุ่นในการถ่ายทอด
เทคโนโลยีและสนับสนุนวัสดุ วัสดุภัณฑ์ในการวิจัย และ ขอขอบคุณ
NEDO แห่ง MITI ประเทศญี่ปุ่นที่สนับสนุนเงินทุนในการร่วมวิจัย และ
ขอขอบคุณบุคลากร TMEC-NECTEC ทุกท่าน

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Iti Rittaporn and Pavan Stanchai, "Progress Report on NECTEC's Microelectronics Project", Proceedings The First NRCT-KOSEF Joint Seminar on Semiconductors., Nov 30-Dec1, 1999, pp. 30-33.
- [2] Pavan Stanchai, "Thailand's First Integrated Circuit Fabrication Facility (2)", EECON25, 2002
- [3] Kwck K. Ng, "COMPLETE GUIDE TO SEMICONDUCTOR DEVICES", International edition, pp.30-54, 1995.
- [4] STANLEY WOLF, "SILICON PROCESSING FOR VLSI Vol. 1: PROCESS TECHNOLOGY", Lattice Press, 1995.
- [5] STANLEY WOLF, "SILICON PROCESSING FOR VLSI Vol. 3: THE SUBMICRON MOSFET", Lattice Press, 1995.
- [6] Iti Rittaporn and Pavan Stanchai, "Progress Report on NECTEC's Microelectronics Project", Proceedings The First NRCT-KOSEF Joint Seminar on Semiconductors., Nov 30-Dec1, 1999, pp. 30-33.
- [7] Somsak Paryakeow and Iti Rittaporn, "Microelectronics Industry and Research and Development in Thailand" ASEAN-ROK Workshop on Microelectronics, Bangkok, Feb 21-23, 2000

10. ประวัติผู้เขียนบทความ



ศาสตราจารย์ ดร. วิภาดา ศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ จาก
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปี พ.ศ.2539 ทำงานใน
ตำแหน่งวิศวกร ๗ บ.ชั้นในนครจน จำกัด ปี พ.ศ. 2540

หลังจากนั้นทำงานในตำแหน่งวิศวกร. ไอ โป

อิเล็กทรอนิกส์ จำกัด ปี พ.ศ.2543 ปัจจุบันทำงานในตำแหน่งผู้ช่วย

นักวิจัย ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์



ภิกษิ เสนาบุรณ์, สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขา
วิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ จากสถาบันเทคโนโลยีปทุม
วันในปี พ.ศ. 2514 ปัจจุบันทำงานตำแหน่งผู้ช่วยนักวิจัย
ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์



สุวัฒน์ สโรกิตพันธ์, วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาไฟฟ้า
จากมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ปี พ.ศ. 2528

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต และดุษฎีบัณฑิต จาก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปี พ.ศ. 2534 และ พ.ศ. 2540 ตามลำดับ ปัจจุบัน
ทำงานในตำแหน่งนักวิจัย ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์



ภาวิน สยามชัย, วศ.บ. เกียรตินิยมอันดับสอง
และวศ.ม. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าจาก จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย Ph. D สาขาไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์
จากสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย พ.ศ. 2539

ตำแหน่งปัจจุบัน นักวิจัย process integration ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์



จิตติ อุทธารณ์, วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัย
และดุษฎีบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ จากมหาวิทยาลัย
เทคโนโลยี ประเทศญี่ปุ่น ปี พ.ศ. 2526 พ.ศ. 2528 และ พ.ศ.
2531ตามลำดับ หลังจากนั้นทำงานที่ Superconductivity
Research Laboratory (SRL) จาก International Superconductivity
Technology Center (ISTEC) ในตำแหน่ง Senior Resercher ปี พ.ศ. 2531-
2539 ประเทศญี่ปุ่น ปัจจุบันทำงานตำแหน่งรักษาการมีผู้อำนวยการ
ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์



Kazuo Imai, วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัย และ
ดุษฎีบัณฑิต สาขาอิเล็กทรอนิกส์ จาก Osaka University
ปี พ.ศ. 2514 พ.ศ.2516 และ 2534 ตามลำดับ ปัจจุบัน
ทำงานตำแหน่ง project leader of International
Technology Transfer Project at NTT Advanced Technology
Corperation Japan.



Kazuhito Sakuma received the B.S. degree from
Kougakuin University in 1976, the M.S. and Ph.D.
degree from Saitama University in 1997. He is now
a Senior Manager of International Technology
Transfer Project at NTT-AT Corp., Japan.

ECT

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 26 (EECON26) 6-7 พฤศจิกายน 2546 สจพ.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายการุณ แซ่จอก
วัน เดือน ปีเกิด	29 กันยายน 2515
สถานที่เกิด	จังหวัดสงขลา
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2539 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ความชำนาญเฉพาะด้าน	- กระบวนการยึ่งฝึ่งประจุ - กระบวนการเคลือบโลหะ - กระบวนการผลิตวงจรรวม CMOS (5-0.8ไมครอน)
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ. 2539- 2540	วิศวกรฝ่ายผลิต บริษัทซัพไมครอนมหาชนจำกัด
พ.ศ. 2540-2543	วิศวกรฝ่ายผลิต บริษัทไฮโปรอิเล็กทรอนิกส์มหาชนจำกัด
พ.ศ. 2543- ปัจจุบัน	ผู้ช่วยนักวิจัย ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ แห่งชาติ

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิทยานิตยพนธ์นี้

- [1] **Karoon Saejok**, Ekalak Chaowicharat, Montree Saenlamool, Kowit Sowsuwan, Charndet Hruanun, Surasak Niemcharoen and Amporn Poyai. "Study of Polycrystalline and Amorphous Silicon Film Resistance as Resistor in Piezoresistive Pressure Sensor." ICAS2006, Vol. 1, November 2006, pp.590-598
- [2] การุณ แซ่จอก, มนตรี แส่นละมุล, ชาญเดช หรูนันต์, เอกลักษณ์ เขาวิจิรัตน์, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และ อัมพร โพธิ์ไย. "การศึกษาความต้านทานของโพลีซิลิคอน และ อมอร์ฟิซิลิคอนหลังการยึ่งฝึ่งประจุ สำหรับ เซนเซอร์วัดความดัน." การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า, ครั้งที่ 28, ปี 2548, หน้า 117-1120
- [3] การุณ แซ่จอก, มนตรี แส่นละมุล, อนุชา เรืองพานิช, เอกลักษณ์ เขาวิจิรัตน์, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และ อัมพร โพธิ์ไย, "การพัฒนาการสร้างบ่อชนิดเอ็นโดยปรับเพิ่มอุณหภูมิการแอนนีส สำหรับ วงจรรวม 0.8 μ m CMOS" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า, ครั้งที่ 29, ปี 2549,

หน้า 685-688

- [4] การุณ แซ่จอก, มนตรี แสนละมุล, อนุชา เรืองพานิช, สุวัฒน์ โสภิตพันธ์, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และ อัมพร โพธิ์ไย, “การศึกษาการยิงฝังประจุในการสร้างบ่อชนิดเอ็น สำหรับวงจรรวม $0.8\mu\text{m}$ CMOS”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า, ครั้งที่ 28, พ.ศ. 2548, หน้า 1073-1076
- [5] การุณ แซ่จอก, มนตรี แสนละมุล, สุวัฒน์ โสภิตพันธ์, ภาวัน สยามชัย และ อธิธิ ฤทธาภรณ์ . “การศึกษาอุปกรณ์กำเนิดประจุชนิด เบอร์นาสในเครื่องยิงฝังประจุสำหรับกระบวนการผลิตวงจรรวม.” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า, ครั้งที่ 27, พ.ศ. 2547, หน้า 269-272
- [6] การุณ แซ่จอก, กิตติ เสนาบุรณ์, สุวัฒน์ โสภิตพันธ์, ภาวัน สยามชัย และ อธิธิ ฤทธาภรณ์ “การพัฒนากระบวนการปลูกฟิล์มโลหะหลายชั้นด้วยเทคนิคสปีดเตอร์ริงสำหรับการสร้างวงจรรวม” ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 26, ปี 2546, หน้า 1391-1395

ผลงานวิจัยด้านอื่นๆของผู้แต่ง

- [1] อัมพร โพธิ์ไย, อนุชา เรืองพานิช, การุณ แซ่จอก, วิน บรรจงปรุ, มนตรี แสนละมุล
“The Effect of Fabrication Techniques to the Threshold Voltage of Submicron CMOS Technology” การประชุมวิชาการ Technology and Innovation for Sustainable Development Conference (TISD2006), ปี 2549
- [2] มนตรี แสนละมุล , การุณ แซ่จอก , อนุชา เรืองพานิช, โอภาส ศรีทวีศักดิ์, อัมพร โพธิ์ไย และ อธิธิ ฤทธาภรณ์, “การศึกษาคุณสมบัติในการยิง โบรอนฟลูออไรด์ในกระบวนการสร้างขอสเตรนสำหรับ $0.8\mu\text{m}$ CMOS”การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28, ปี 2548
- [3] มนตรี แสนละมุล , การุณ แซ่จอก , นพพล พงษ์พันธ์จันทรา, กรรณนิกา อุประโคตร, โกวิท ไชวสุวรรณ, เจริญมิตร วรเดช, อัมพร โพธิ์ไย และ อธิธิ ฤทธาภรณ์ , “การศึกษาการยิงฝังประจุโบรอนอะตอมมิกส์นัมเบอร์ต่างๆของพลาสมา BF_3 ต่อค่าความต้านทานเชิงผิว” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28, ปี 2548
- [4] อัมพร โพธิ์ไย , อนุชา เรืองพานิช, การุณ แซ่จอก, วิน บรรจงปรุ, ภาวดี มีสรรพวงศ์, นิภาพรรณ ภูละมัย และ อธิธิ ฤทธาภรณ์, “ผลของความร้อนต่อกระแสรั่ว ในรอยต่อโคบอลต์ซิลิไซด์” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28, ปี 2548
- [5] มนตรี แสนละมุล , การุณ แซ่จอก , อัมพร โพธิ์ไย, ภาวัน สยามชัย และ อธิธิ ฤทธาภรณ์.

“เทคนิคการยิงฝึงประจุปริมาณสารเชื้อสูงด้วยเครื่องยิงฝึงประจุกระแสนาคกลาง” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า, ครั้งที่ 27, พ.ศ. 2547, หน้า 257-260

- [6] อัครพงษ์ เอกศิริ, สุวัฒน์ โสภิตพันธ์, การุณ แซ่จอก , อธิธิ ฤทธาภรณ์, “การติดตั้งและพัฒนาเครื่องยิงฝึงประจุสำหรับกระบวนการผลิตสารกึ่งตัวนำ เครื่องแรกของประเทศไทย” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 25, ปี 2545