

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

การทดลองในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อต้องการทราบเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการสร้าง 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

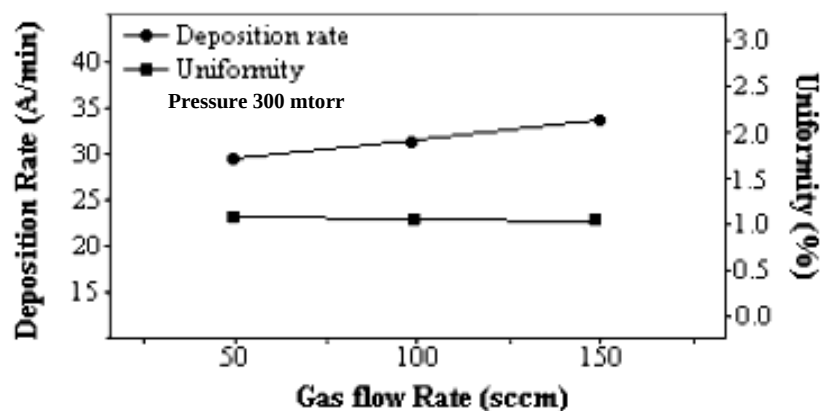
ขั้นตอนการล้าง	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)
PIRANHA (H_2O_2 : H_2SO_4 1:3)	5	120
DI	10	22
HF	1	25
DI	5	22
เป่าให้แห้ง	10	22

จากนั้นทำการทดลองปลูกฟิล์ม Poly-Si และ a-Si โดยการปรับอัตราการจ่ายก๊าซ SiH_4 ด้วยเงื่อนไขตามตารางที่ 5.2

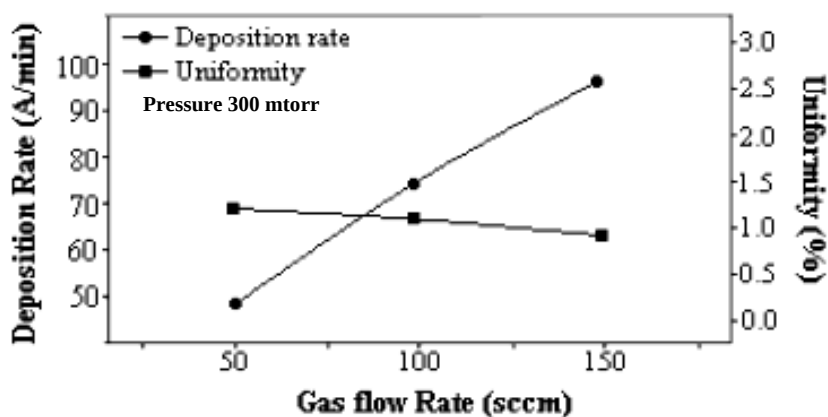
ตารางที่ 5.2 เงื่อนไขการเตรียมฟิล์ม Poly-Si และ a-Si โดยการปรับอัตราการจ่ายก๊าซ SiH_4 ด้วย LPCVD

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 ($\text{\AA}/\text{min}$) และความสม่ำเสมอ (uniformity) (%) ที่มีผลต่ออัตราการจ่ายก๊าซดังรูปที่ 5.1 และรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบฟิล์ม a-Si กับ อัตราการจ่ายก๊าซ SiH_4 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 ได้อัตราการเคลือบฟิล์มที่มีค่า 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 ซึ่งแสดงการเพิ่มอัตราการจ่ายก๊าซ 50, 100 และ 150 sccm ได้อัตราการเคลือบฟิล์มที่มีค่า 46, 73 และ 94 Å/min ตามลำดับ และมีค่า uniformity 1.28, 1.1 และ 0.9% ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าที่อัตราการจ่ายก๊าซที่ 150 sccm เป็นเงื่อนไขสำหรับการปลูกฟิล์ม Poly-Si ที่ดีและเหมาะสมเพราะว่าได้อัตราการเคลือบฟิล์มสูงสุดและ uniformity ต่ำสุด

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

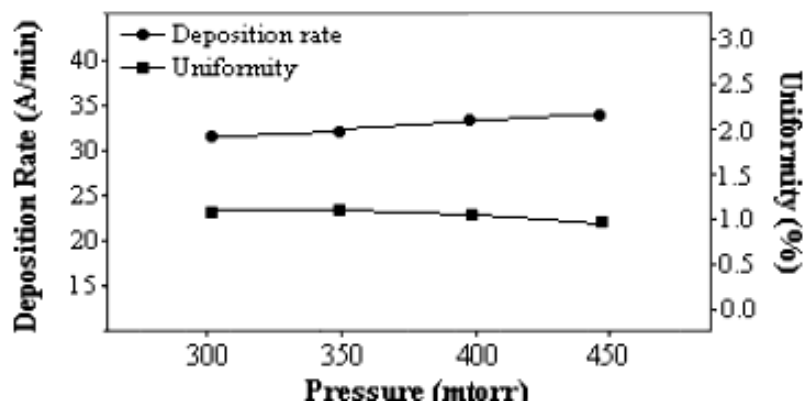
5.1.2 การหาเงื่อนไขการปลูกฟิล์ม Poly-Si และ a-Si โดยการปรับความดันภายในท่อควอทซ์

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

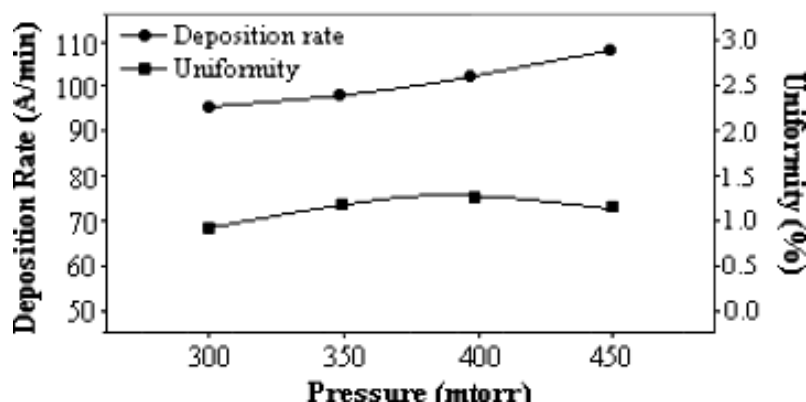
ตารางที่ 5.3 เงื่อนไขการเตรียมฟิล์ม Poly-Si และ a-Si โดยการปรับความดัน ด้วย LPCVD

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 ความดัน และ 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 A/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 A/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

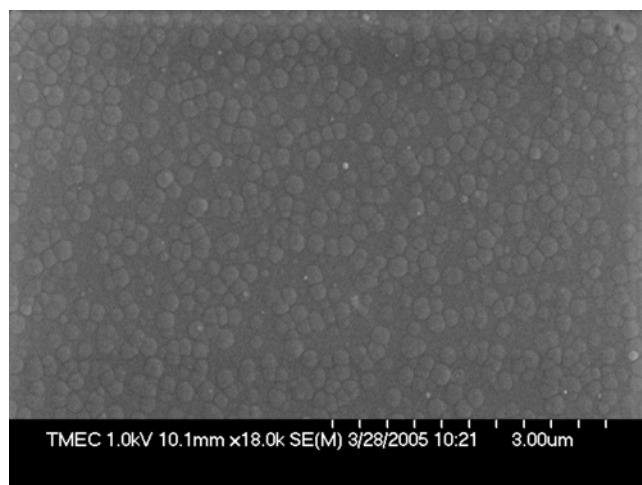
ตารางที่ 5.5 ผลการวัดคุณสมบัติของฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ด้วยเครื่องอิลลิปโซมิเตอร์

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 Diffractrometer) เพื่อดูว่ามีผลึกหรือไม่ และจากผลการวัดปรากฏว่าไม่มีผลึกซึ่งแสดงในภาคผนวก ค ดังนั้นผลการวัดนี้สามารถยืนยันฟิล์มที่สร้างขึ้นมีคุณสมบัติฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ถูกต้องตามมาตรฐานที่กำหนดไว้

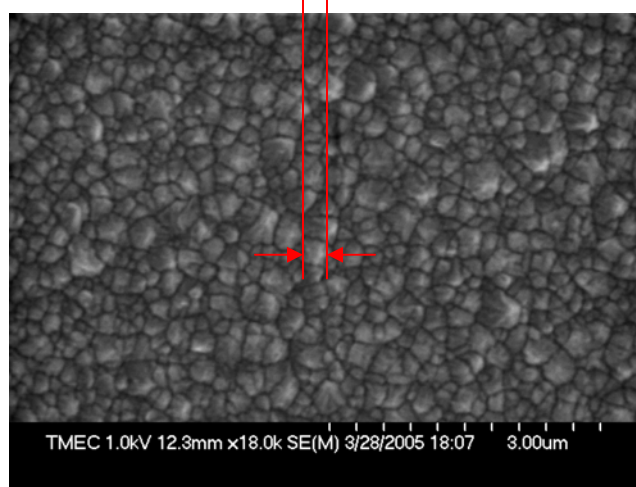
- ผลการวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

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 จะเห็นว่ามิลักษณะขรุขระและมีขนาดเกรนอยู่ทั่วแผ่น โดยค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาด 0.3 ไมครอน

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

การทดลองในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความต้านทานเชิงแผ่นและโครงสร้างที่ผิวของ Poly-Si และ a-Si

5.2.1 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการศึกษาคุณสมบัติฟิล์ม Poly-Si และ a-Si หลังกระบวนการยิงฝังประจุ

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

- นำแผ่นฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ไปทำการยิงฝังประจุโบรอน (B^+) พลังงาน 50 keV ที่ปริมาณสารเจือ (Dose) $1.0 \times 10^{16} \text{ ion/cm}^2$
- นำแผ่นฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ไปแอนนัลด้วยเตาที่อุณหภูมิ 800°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 ด้วยเครื่องโพร์พอยท์โพรบก่อนและหลังกระบวนการยิงฝังประจุ

ชนิดฟิล์ม	ก่อนทำการยิงฝังประจุและแอนนัล	หลังทำการยิงฝังประจุและแอนนัล
	ความต้านทานเชิงแผ่น($\Omega/\square$)	ความต้านทานเชิงแผ่น($\Omega/\square$)
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 ก่อนทำการยิงฟุ้งประจุและแอนนัลมีค่าสูงมาก ทำให้ไม่สามารถวัดได้โดยเครื่องโพรมิเทร็กซ์ Prometrix Rs-30 เพราะมีกำลังความสามารถวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่นในช่วง $5 \text{ m}\Omega/\square$ - $5 \text{ M}\Omega/\square$ แสดงว่าค่าความต้านทานของ ฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ก่อนทำการยิงฟุ้งประจุและแอนนัลมีค่ามากกว่า $5 \text{ M}\Omega/\square$ หลังจากนั้นนำฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ไปทำการยิงฟุ้งประจุที่เงื่อนไขยิงฟุ้งประจุโบรอน (B^+) พลังงาน 50 keV ที่ ปริมาณสารเจือ $1.0 \times 10^{16} \text{ ion/cm}^2$ และแอนนัลที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 15 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน (N_2) ที่อัตราการไหลเท่ากับ 10 ลิตรต่อนาที แล้วนำไปวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่นพบว่าความต้านเชิงแผ่นของฟิล์ม Poly-Si มีค่า $201.95 \Omega/\square$ และความต้านเชิงแผ่นของฟิล์ม a-Si มีค่า $123.75 \Omega/\square$ จะพบว่าค่าความต้านทานเชิงแผ่นของ a-Si มีค่าต่ำกว่า Poly-Si หลังจากกระบวนการเจือสารที่ปริมาณสารเจือเดียวกัน

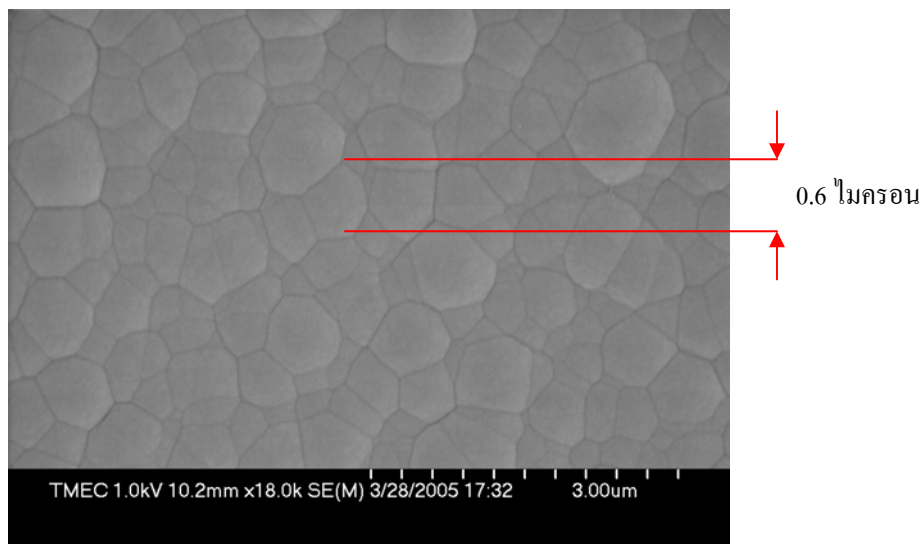
5.2.3 ผลการวัดด้วยเครื่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ผลการวัดผิวของชั้นฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดหลังการยิงฟุ้งประจุแสดงดังรูปที่ 5.6

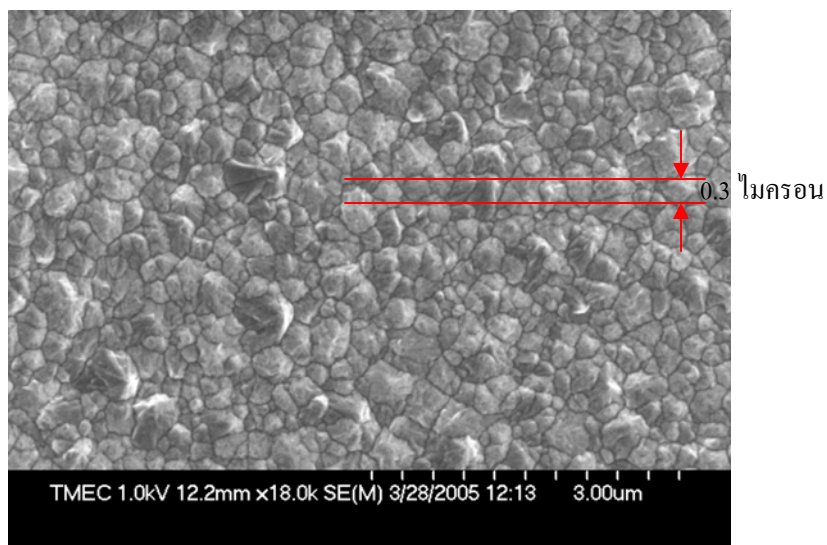
จากรูปที่ 5.6 ผลการวัดผิวหน้าของชั้นฟิล์ม a-Si ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดหลังการยิงฟุ้งประจุ และ แอนนัล จะเห็นว่า มีลักษณะค่อนข้างเรียบและมีขนาดเกรนอยู่ทั่วแผ่น โดยค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาด 0.6 ไมครอน เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับก่อนการยิงฟุ้งประจุและแอนนัลรูปที่ 5.5 (ก) จะเห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงจากเดิมไปมากโดยก่อนการยิงฟุ้งประจุและแอนนัลผิวหน้าของชั้นฟิล์ม a-Si ไม่มีขนาดเกรน และหลังจากผ่านกระบวนการยิงฟุ้งประจุและแอนนัลผิวหน้าของชั้นฟิล์ม a-Si มีขนาดเกรนที่มีค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.6 ไมครอน

ส่วนผลการวัดผิวหน้าของชั้นฟิล์ม Poly-Si ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดหลังการยิงฟุ้งประจุ และ แอนนัล จะเห็นว่ามีลักษณะขรุขระและมีขนาดเกรนอยู่ทั่วแผ่น โดยค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาด 0.3 ไมครอน เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับก่อนการยิงฟุ้งประจุและแอนนัลรูปที่ 5.5 (ข) จะเห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

เมื่อนำผิวหน้าของชั้นฟิล์ม a-Si และ Poly-Si หลังการยิงฟุ้งประจุ และ แอนนัล มาเปรียบเทียบกับกันจะพบว่าขนาดเกรนของชั้นฟิล์ม a-Si ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าของชั้นฟิล์ม Poly-Si



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.6 (ก) รูปผิวหน้าฟิล์มของ a-Si หลังการยิงฟุ้งประจุ และ แอนนีสล

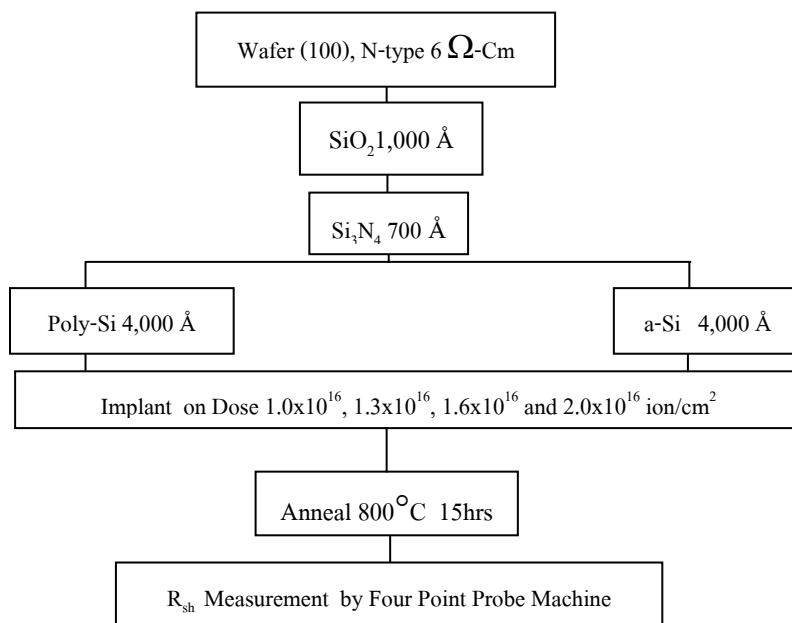
(ข) รูปผิวหน้าฟิล์มของ poly-Si หลังการยิงฟุ้งประจุ และ แอนนีสล

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

ในการทดลองในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการทราบความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของโพลีซิลิเกตที่สร้างจาก ฟิล์ม Poly-Si และ a-Si กับปริมาณสารเจือในกระบวนการยิงฝังประจุ

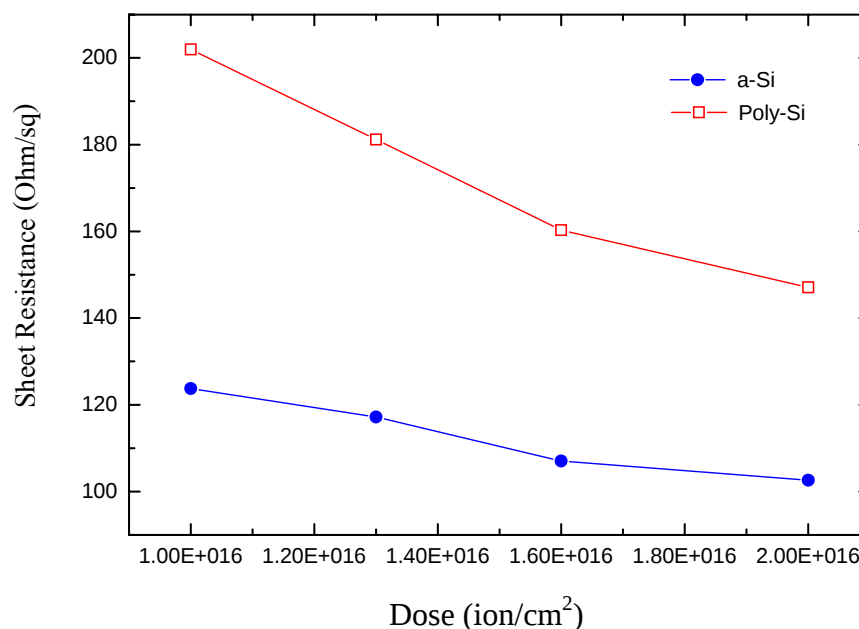
5.3.1 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการศึกษาความต้านทานของ โพลีซิลิเกตที่สร้างจากฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ที่เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเจือในกระบวนการยิงฝังประจุ

นำแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ ขนาด 6 นิ้ว ชนิดเอ็น (100) ที่มีสภาพความต้านทาน $6 \Omega - \text{cm}$ แล้วนำไปทำความสะอาดด้วยเงื่อนไขตามตาราง 5.1 แล้วทำการปลูกฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) หนา $1,000 \text{ \AA}$ ด้วยเตา ที่อุณหภูมิ $1,000^\circ\text{C}$ หลังจากนั้นทำการปลูกซิลิคอนไนไตรด์ (Si_3N_4) หนา $700 \text{ \AA}$ ด้วยเทคนิค LPCVD ที่อุณหภูมิ 700°C หลังจากนั้นทำการปลูกฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ที่ความหนา $4,000 \text{ \AA}$ ด้วยระบบ LPCVD ด้วยเงื่อนไขจากการทดลองใน 5.1 หลังจากนั้นนำแผ่นฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ไปทำการยิงฝังประจุโบรอน ($_{11}\text{B}^+$) พลังงาน 50 keV ที่เงื่อนไขปริมาณสารเจือดังนี้คือ 1.0×10^{16} , 1.30×10^{16} , 1.6×10^{16} และ $2.0 \times 10^{16} \text{ ion/cm}^2$ แล้วนำไปทำความสะอาดด้วยเงื่อนไขตามตาราง 5.1 หลังจากนั้นนำไปทำการแอนนัลด้วยเตาที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 15 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน (N_2) ที่อัตราการไหลเท่ากับ 10 ลิตรต่อนาที หรือพิจารณาขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานอย่างง่ายจากรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 ขั้นตอนการทดลองในหัวข้อ 5.3

5.3.2 ผลการวัดความต้านทานเชิงแผ่นด้วยเครื่องโพรมอยท์โพรบ



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 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณสารเจือมีผลให้ความต้านทานเชิงแผ่นลดลง เช่นเดียวกับกรณีของฟิล์ม 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

โพลีซิลิคอนจากแผ่นฟิล์ม a-Si ที่สร้างขึ้นมีความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์มโพลีซิลิคอนต่ำกว่าจึงเป็นทางเลือกที่ดีกว่า อย่างไรก็ตาม ยังมีเทคนิคในการลดความต้านทานเชิงแผ่นสำหรับ ฟิล์ม โพลีซิลิคอน โดยการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการแอนนัล ซึ่งจะทำให้การทดลองในหัวข้อต่อไป

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

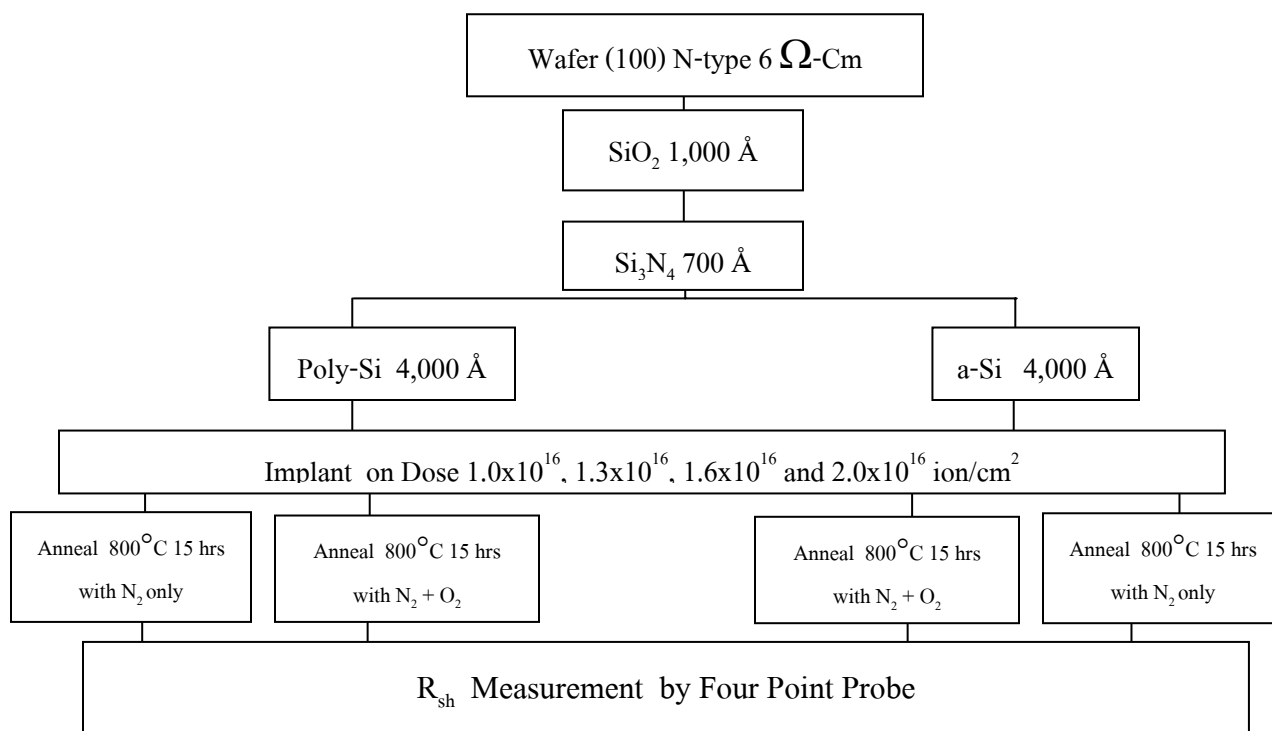
เนื่องจากการสร้างโพลีซิลิคอน จะต้องใช้เวลาในการแอนนัลที่ เวลา 15 ชั่วโมง ซึ่งเป็นเวลาค่อนข้างนานทำให้เกิดการแพร่ออกของสารเจือปนสู่ภายนอกระหว่างทำการแอนนัล ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาโครงสร้างและความต้านทานของ โพลีซิลิคอนที่สร้างจาก ฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ที่การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการแอนนัล โดยการเพิ่มออกซิเจนเพื่อให้เกิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ให้เป็นชั้นป้องกันการแพร่ออกของสารเจือปน

5.4.1 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการศึกษาโครงสร้างและความต้านทานของ โพลีซิลิคอนที่สร้างจาก 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 $1,000^\circ \text{C}$ หลังจากนั้นทำการปลูกซิลิคอนไนไตรด์ (Si_3N_4) หนา $700 \text{ \AA}$ ด้วยเทคนิค LPCVD ที่อุณหภูมิ 700°C หลังจากนั้นทำการปลูกฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ที่ความหนา $4,000 \text{ \AA}$ ด้วยระบบ LPCVD ด้วยเงื่อนไขจากการทดลองใน 5.1 หลังจากนั้นนำฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ไป ทำการยิงฟุ้งประจุโบรอน (B^+) พลังงาน 50 keV ที่เงื่อนไขปริมาณสารเจือปนนี้คือ 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°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

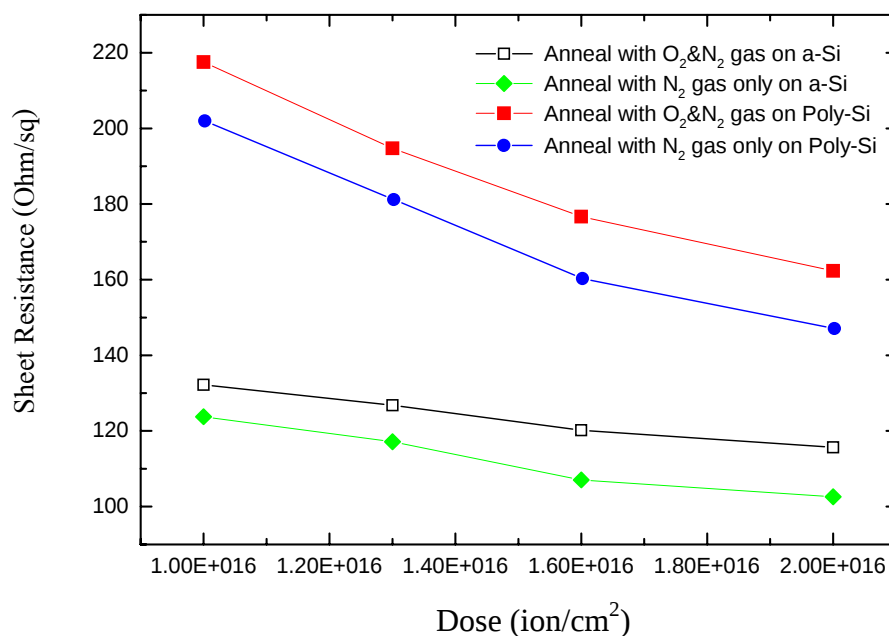
5.4.2 ผลการวัดความต้านทานเชิงแผ่นด้วยเครื่องโพรบ

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 ลิตรต่อนาทีในการแอนนัล และได้ค่าความต้านทานเชิงแผ่นเท่ากับ 132.2, 126.77, 120.16 และ 115.68 Ω/□ ตามลำดับ ที่เงื่อนไขการจ่ายก๊าซ ออกซิเจน (O₂) ที่อัตราการไหลเท่ากับ 1 ลิตรต่อนาที และ ก๊าซไนโตรเจน (N₂) ที่อัตราการไหลเท่ากับ 10 ลิตรต่อนาทีในการแอนนัล ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มการจ่ายก๊าซ ออกซิเจน (O₂) ในการแอนนัล ทำให้ค่าความต้านทานเชิงแผ่นเพิ่มขึ้นที่ทุกปริมาณสารเจือ โดยความต้านทานเชิงแผ่นเพิ่มขึ้นจากกรณีไม่ได้จ่ายก๊าซ ออกซิเจน (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 ลิตรต่อนาทีในการแอนนัล และได้ค่าความต้านทานเชิงแผ่นเท่ากับ 216.12, 193.03, 175.94 และ 161.32 $\Omega/\square$ ตามลำดับ ที่เงื่อนไขการจ่ายก๊าซออกซิเจน (O_2) ที่อัตราการไหลเท่ากับ 1 ลิตรต่อนาที และ ก๊าซไนโตรเจน (N_2) ที่อัตราการไหลเท่ากับ 10 ลิตรต่อนาที ในการแอนนัล ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มการจ่ายก๊าซออกซิเจน (O_2) ในการแอนนัล ทำให้ค่าความต้านทานเชิงแผ่นเพิ่มขึ้นที่ทุกปริมาณสารเจือ โดยความต้านทานเชิงแผ่นเพิ่มขึ้นจากกรณีไม่ได้จ่ายก๊าซออกซิเจน (O_2) เท่ากับ 9.05 %

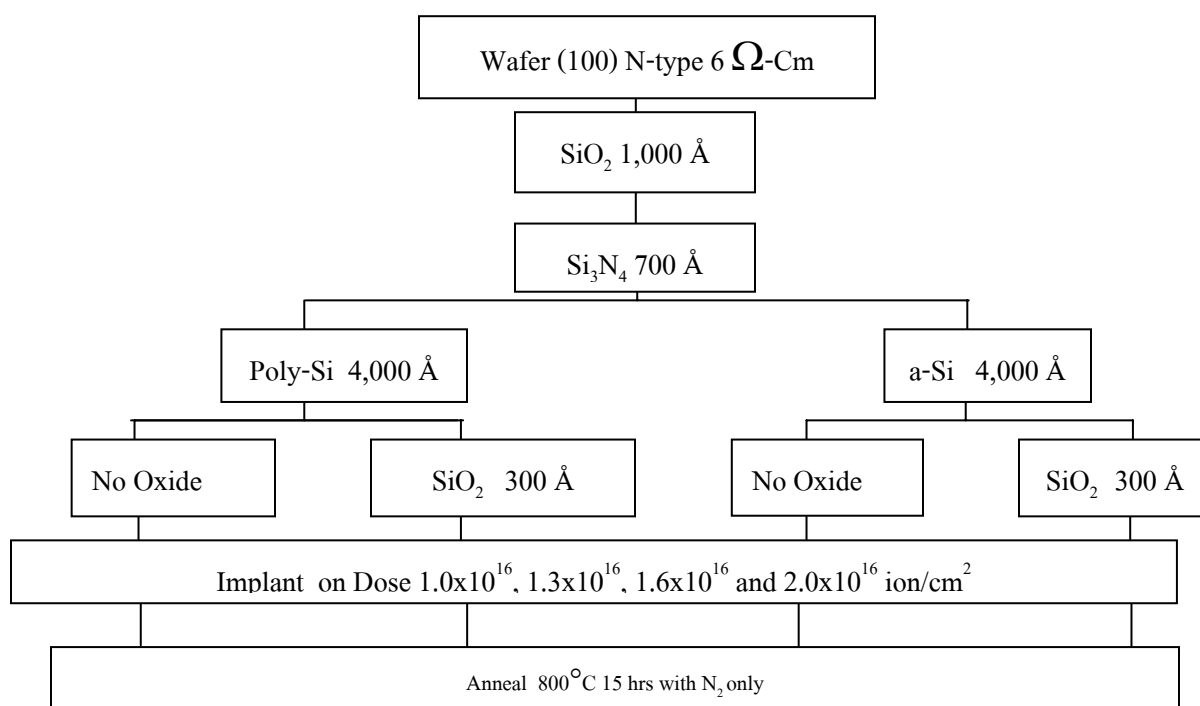
นอกจากนี้หลังการเตรียมชั้นพบว่ามีการเกิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หนา 200 Å ทำให้ฟิล์ม a-Si กับ Poly-Si หายในปริมาณ 100 Å หรือ ปริมาณ 2.5 % ของความหนา 4,000 Å ซึ่งทำให้ความต้านทานเชิงแผ่นควรเพิ่มขึ้น 2.5 % แต่ในการทดลองจริงพบว่า มีค่าความต้านทานเชิงแผ่น ของ ฟิล์ม Poly-Si และ ฟิล์ม a-Si เพิ่มขึ้น 9.05 % และ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



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

5.5 ศึกษาความต้านทานของโพลีซิลิไซด์ที่สร้างจาก ฟิล์ม Poly-Si และ a-Si โดยการเพิ่มชั้นซิลิคอนไดออกไซด์[24,25]

เนื่องจากการสร้างโพลีซิลิไซด์ จะต้องใช้เวลาในการแอนนัลที่ เวลา 15 ชั่วโมง ซึ่งเป็นเวลาค่อนข้างนานทำให้เกิดการแพร่ออกของสารเจือปนสู่ภายนอกระหว่างทำการแอนนัล ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาโครงสร้างและความต้านทานของโพลีซิลิไซด์ที่สร้างจากฟิล์ม Poly-Si และ a-Si โดยการเพิ่มชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ก่อนการยิงฝังประจุ เพื่อใช้เป็นชั้นฟิล์มป้องกันการแพร่ออกของสารเจือปนระหว่างการแอนนัล

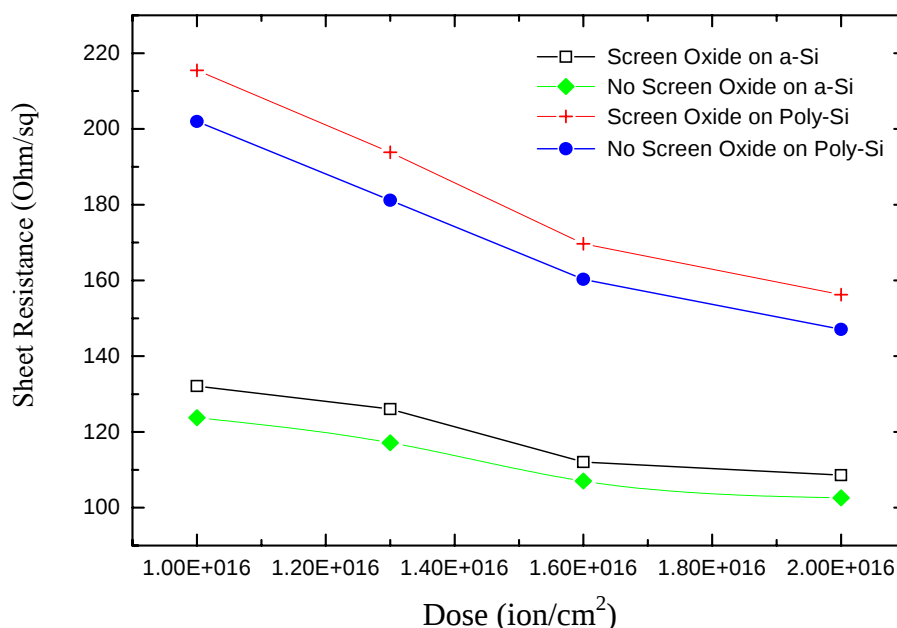


รูปที่ 5.11 ขั้นตอนการทดลองในหัวข้อ 5.5

5.5.1 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการศึกษาความต้านทานของ โพลีซิลิโคนที่สร้างจาก ฟิล์ม Poly-Si และ a-Si โดยการเพิ่มชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

นำแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ ขนาด 6 นิ้ว ชนิดเอ็น (100) ที่มีสภาพความต้านทาน $6 \Omega \cdot \text{cm}$ แล้วนำไปทำความสะอาดด้วยเงื่อนไขตามตารางที่ 5.1 แล้วทำการปลูกฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) หนา $1,000 \text{ \AA}$ ด้วยเตา ที่อุณหภูมิ $1,000^\circ\text{C}$ หลังจากนั้นทำการปลูกซิลิคอนไนไตรด์ (Si_3N_4) หนา $700 \text{ \AA}$ ด้วยเทคนิค LPCVD ที่อุณหภูมิ 700°C หลังจากนั้นทำการปลูกฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ที่ความหนา $4,000 \text{ \AA}$ ด้วยระบบ LPCVD ด้วยเงื่อนไขจากการทดลองใน 5.1 หลังจากนั้นทำการปลูกฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) หนา $300 \text{ \AA}$ ที่อุณหภูมิ 400°C หลังจากนั้นนำฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ไปทำการยิงฟุ้งประจุโบรอน (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°C เป็นเวลา 15 ชั่วโมง ที่การจ่ายก๊าซไนโตรเจน (N_2) ที่อัตราการไหลเท่ากับ 10 ลิตรต่อนาที หรือพิจารณาขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานอย่างง่ายจากรูปที่ 5.11

5.5.2 ผลการวัดความต้านทานเชิงแผ่นด้วยเครื่องโพรมิตที่โพรบที่เงื่อนไขเพิ่มชั้นซิลิคอนไดออกไซด์



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 $\Omega/\square$ ตามลำดับ ที่เงื่อนไขไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บนฟิล์ม a-Si และได้ค่าความต้านทานเชิงแผ่นเท่ากับ 131.91, 124.93, 111.71 และ 107.37 $\Omega/\square$ ตามลำดับ ที่เงื่อนไขเพิ่มชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บนฟิล์ม a-Si ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บนฟิล์ม a-Si ทำให้ค่าความต้านทานเชิงแผ่นเพิ่มขึ้นที่ทุกปริมาณสารเจือ โดยความต้านทานเชิงแผ่นเพิ่มขึ้นจากกรณีไม่ได้เพิ่มชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บนฟิล์ม a-Si เท่ากับ 5.86 %

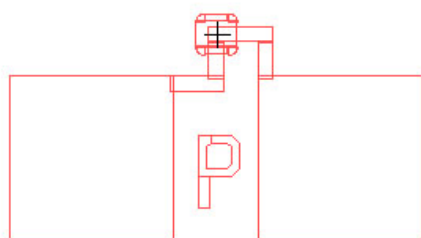
พิจารณาในส่วนของฟิล์ม Poly-Si เมื่อทำการเพิ่มปริมาณสารเจือ 1.0×10^{16} , 1.3×10^{16} , 1.6×10^{16} และ 2.0×10^{16} ion/cm² จะได้ค่าความต้านทานเชิงแผ่นเท่ากับ 201.95, 181.73, 158.34 และ 147.07 $\Omega/\square$ ตามลำดับ ที่เงื่อนไขไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บนฟิล์ม Poly-Si และได้ค่าความต้านทานเชิงแผ่นเท่ากับ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

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

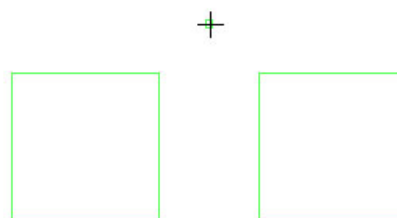
5.6 ศึกษาความต้านทานรอยสัมผัสระหว่างผิวโพลิรีซิสเตอร์ที่ได้รับการเจือสารกับ โลหะ [19,20]

ในการทดลองการศึกษาค่าความต้านทานรอยสัมผัสระหว่างผิวโพลิรีซิสเตอร์ (Contact Resistance: R_c) ที่ได้รับการเจือสารกับโลหะนี้จะหาความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณสารเจือภายในเนื้อฟิล์มโพลิรีซิสเตอร์กับค่า R_c และ ความสัมพันธ์ระหว่างโพลิรีซิสเตอร์ที่สร้างจากเนื้อฟิล์ม Poly-Si และ a-Si กับค่า R_c เพื่อที่จะศึกษาว่าปริมาณสารเจือ และ ฟิล์ม Poly-Si และ a-Si มีผลต่อค่า R_c อย่างไร

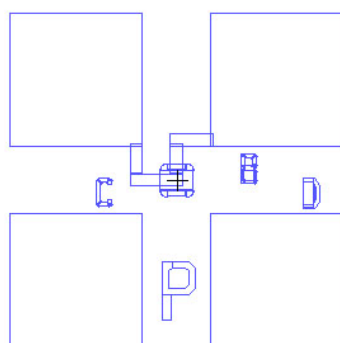
5.6.1 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการศึกษาความต้านทานรอยสัมผัสระหว่างผิวโพลีซิลิคอนที่ได้รับการเจือสาร กับ โลหะ



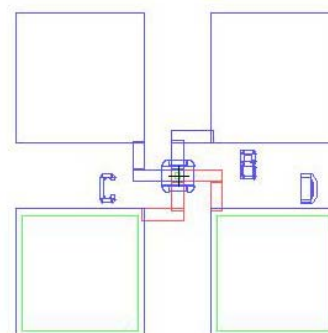
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 5.13 มาสก์ของ CBK ที่เขียนโดยโปรแกรม L-edit

(ก) มาสก์สำหรับโพลีซิลิคอน

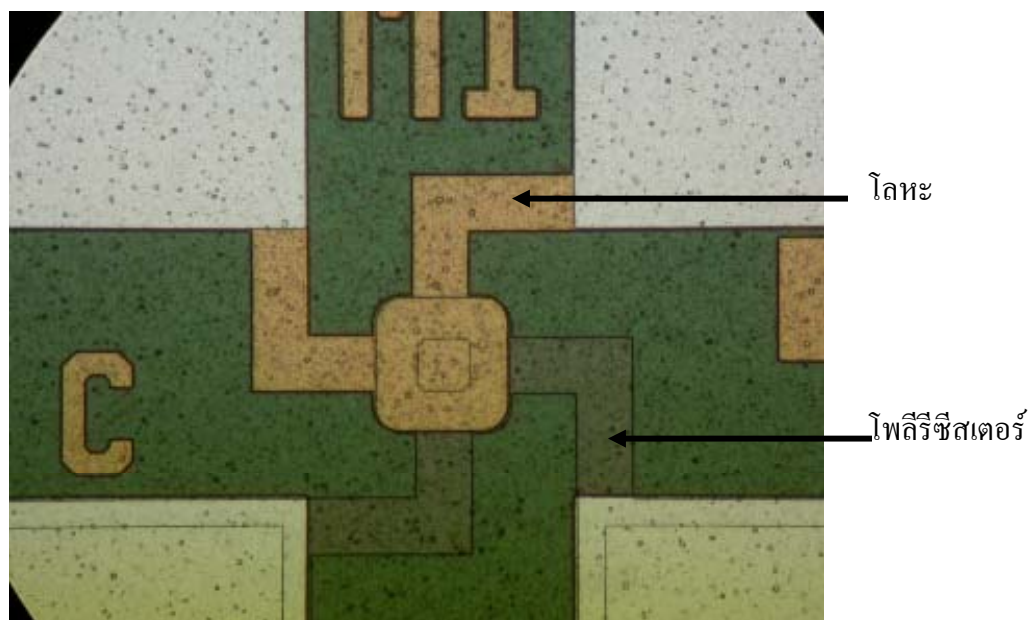
(ข) มาสก์สำหรับกัดเปิดช่อง

(ค) มาสก์สำหรับขั้วโลหะ

(ง) โครงสร้างมาสก์ (CBK) เมื่อเสร็จสมบูรณ์

นำชิ้นงานในการทดลอง 5.3 มาทำเป็นโครงสร้าง CBK โดยมีวิธีการสร้างดังนี้

ทำการสร้างมาสก์ดังรูปที่ 5.13 หลังจากนั้นนำชิ้นงานในการทดลอง 5.3 ไปทำการเคลือบน้ำยาโฟโตริซิส ไปทำการถ่ายภาพ มาสก์ ดังรูปที่ 5.13 (ก) ลงบนแผ่นเวเฟอร์ จากการฉายแสงด้วยเครื่องสเตปเปอร์ (Stepper) หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปกัดชั้นฟิล์มโพลีซิลิคอนให้เป็นลวดลาย 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% ด้วยวิธีสปัตเตอร์ริงค์ หนา 5,000 อังสตรอม แล้วทำการ ซินเตอร์ริงค์ (Sintering) ด้วยก๊าซผสมระหว่างก๊าซไฮโดรเจน (H_2) 3% ต่อก๊าซไนโตรเจน (N_2) 97% ที่ อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ในเวลา 45 นาที [16, 26] หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปทำการเคลือบน้ำยาโฟโตริซิส แล้วทำการถ่ายภาพ มาสก์ ดังรูปที่ 5.13 (ค) ลงบนชิ้นงานแล้วทำการฉายแสงด้วยเครื่องสเตปเปอร์ หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปกัดชั้นโลหะออกเป็นลวดลาย ที่เป็นโครงสร้าง CBK ด้วยวิธีการกัดแบบแห้งได้โครงสร้างดังรูปที่ 5.13 (ง) และเมื่อนำชิ้นงานไปถ่ายภาพ ได้ดังรูปที่ 5.14

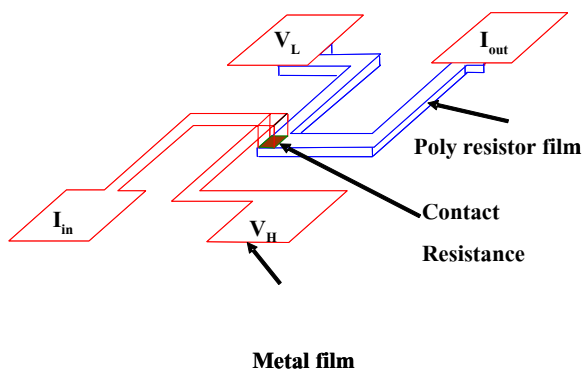


รูปที่ 5.14 ชิ้นงานที่สร้างเป็นโครงสร้าง CBK

5.6.2 ผลการทดลองศึกษาความต้านทานรอยสัมผัสระหว่างผิวโพลีซิลิคอนที่ได้รับการเจือสารกับโลหะ

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 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานรอยสัมผัสระหว่างผิวโพลีซิลิคอนที่ได้รับการเจือสารกับโลหะ กับความต้านทานเชิงแผ่น

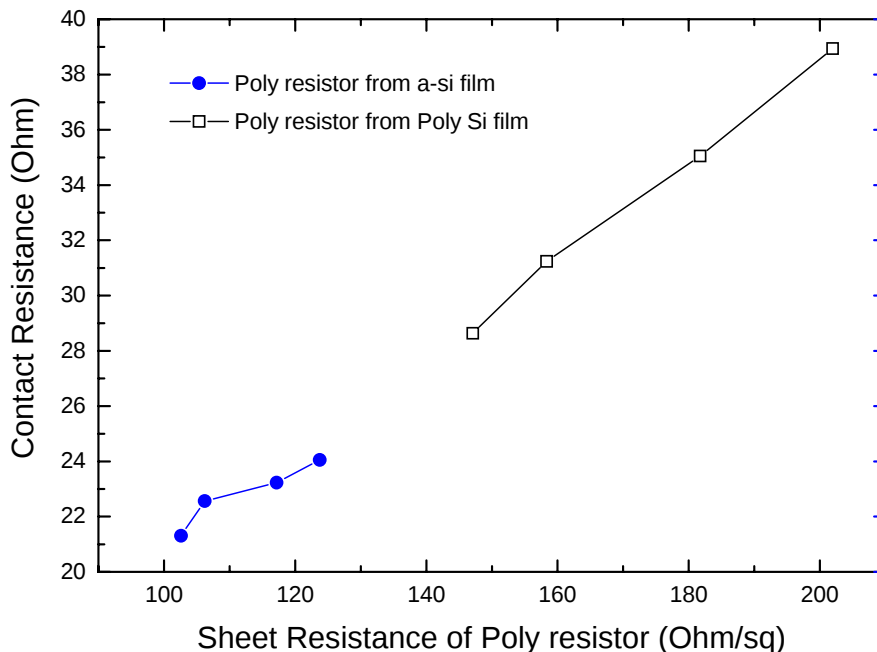
ชนิด ฟิล์มที่ใช้สร้าง โพลีซิลิคอน	ปริมาณสารเจือ จากยี่ ฝั่งประจุ (ion/cm ²)	Sheet Resistance (Ω/□)	Contact Resistance (Ω) ที่พื้นที่ขนาด (10 μm x10 μm)
Poly-Si	1.00x10 ¹⁶	201.95	38.94
	1.30 x10 ¹⁶	181.73	35.05
	1.60 x10 ¹⁶	158.34	31.24
	2.00 x10 ¹⁶	147.07	28.63
a-Si	1.00 x10 ¹⁶	123.75	24.05
	1.30 x10 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 $\Omega/\square$ 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 $\Omega/\square$ 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 ที่ทุกเงื่อนไขปริมาณสารเจือในการยิงฝังประจุมีสาเหตุมาจากสภาพความต้านทานของฟิล์ม 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 ค่าความต้านทานรอยสัมผัสระหว่างโพลีซิลิคอนแปรรูปโดยตรงกับปริมาณสารเจือ และเมื่อพิจารณาโพลีซิลิคอนที่สร้างจากฟิล์ม a-Si อย่างเดียวก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน



รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความต้านทานเชิงแผ่น กับ R_c

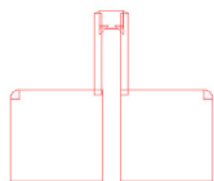
5.7 ศึกษาหาค่า ทีซีอาร์ ของโพลีรีซิสเตอร์ [24]

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 ไปทำการเคลือบน้ำยาโฟโตรีซิส ไปทำการถ่ายภาพ มาสก์ ดังรูปที่ 5.17 (ก) จากการฉายแสง ด้วยเครื่อง สเตปเปอร์ (Stepper) หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปกัด ชั้นฟิล์มโพลีซิลิคอนให้เป็นลวดลาย ด้วยวิธีการกัดแบบแห้ง (Dry Etching) แล้วล้างน้ำยาโฟโตรีซิส ออก หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปปลูกซิลิคอนไดออกไซด์ ที่ความหนา 1,000 Å โดยวิธี LPCVD หลังจากนั้นนำชิ้นงานทำการเคลือบน้ำยาโฟโตรีซิส ไปทำการถ่ายภาพ มาสก์ ดังรูปที่ 5.17 (ข) แล้วนำชิ้นงาน ทำการกัดเป็นช่องสี่เหลี่ยมที่ขนาด 10 ไมครอน x 10 ไมครอน ด้วยวิธีการกัดแบบแห้ง แล้วล้างน้ำยา น้ำยาโฟโตรีซิสออก หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปเคลือบฟิล์มโลหะ ด้วย AlCuSi ที่มีส่วนผสม Al:Cu:Si : 98% :0.5%:1.5% ด้วยวิธีสปีเตอร์ริงค์ หนา 5,000 อังสตรอม แล้วทำการซินเตอร์ริงค์ (Sintering) ด้วย

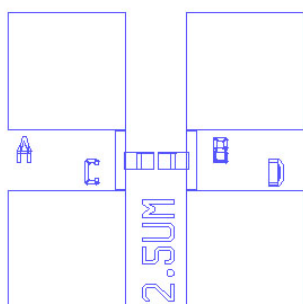
ก๊าซผสมระหว่างก๊าซไฮโดรเจน(H_2) 3% ต่อก๊าซไนโตรเจน (N_2) 97% ที่ อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ในเวลา 45 นาที [16,24] หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปการเคลือบน้ำยาโฟตรีซิส แล้วทำการถ่ายภาพมาสก์ ดังรูปที่ 5.17 (ก) ลงบนชิ้นงานแล้วทำการฉายแสง ด้วยเครื่องสเตปเปอร์ หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปกัดชั้นโลหะออกเป็นลวดลาย ที่เป็นชิ้นงานสำหรับวัดความต้านทานโพลิรีซิสเตอร์ ด้วยวิธีการกัดแบบแห้งได้โครงสร้างดังรูปที่ 5.17 (ง) และเมื่อนำชิ้นงานไปถ่ายภาพได้ดังรูปที่ 5.18



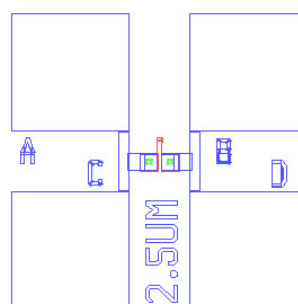
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

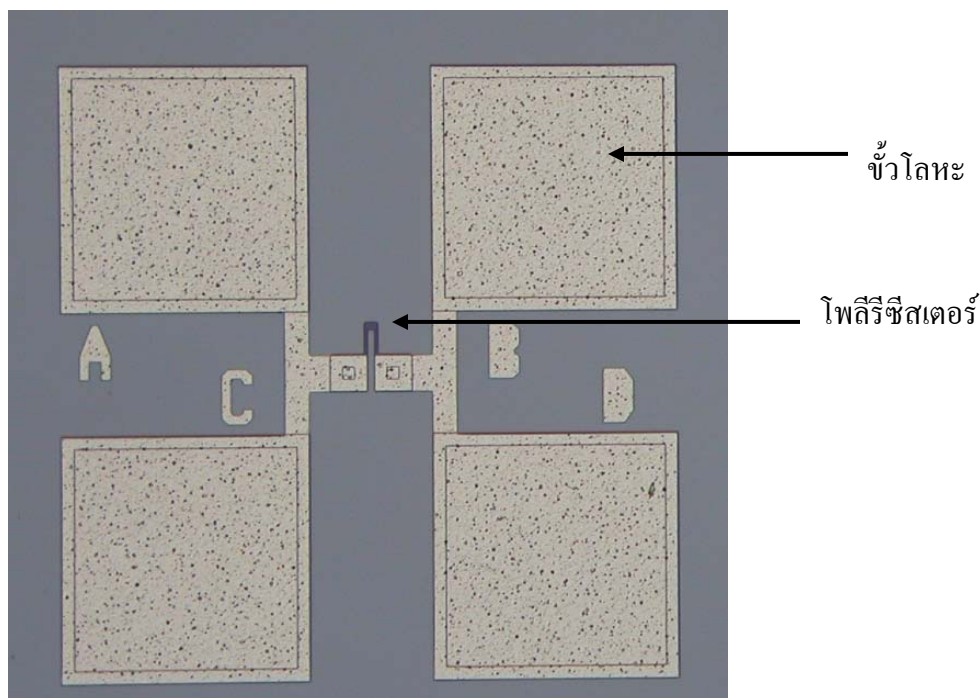
รูปที่ 5.17 มาสก์ของวัดความต้านทานโพลิรีซิสเตอร์ ที่เขียนโดยโปรแกรม L-edit

(ก) มาสก์สำหรับโพลิรีซิสเตอร์

(ข) มาสก์สำหรับกัดเปิดช่อง

(ค) มาสก์สำหรับขั้วโลหะ

(ง) โครงสร้างมาสก์ ในการวัดความต้านทานโพลิรีซิสเตอร์เมื่อเสร็จสมบูรณ์



รูปที่ 5.18 สลวดลายสำหรับวัดความต้านทานโพลีซิลิคอน 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 ค่าความต้านทานที่

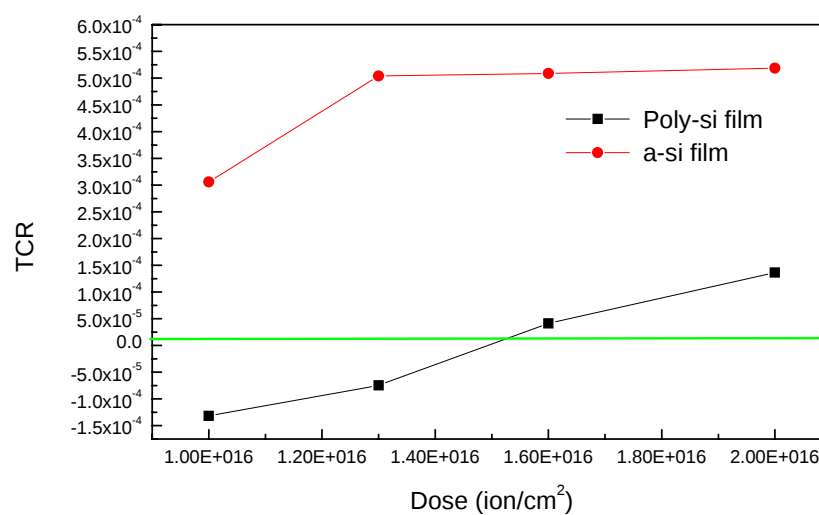
อุณหภูมิห้อง, $R(T)$ คือ ค่าความต้านทานที่อุณหภูมิ T , T_0 คือ อุณหภูมิห้อง และ T คือ อุณหภูมิต่างๆ

ค่าความต้านทานของ โพลีซิลิคอน โดยการปรับอุณหภูมิ 25-100 องศาเซลเซียส จะได้ค่าดังตารางที่ 5.5 จะเห็นว่าโพลีซิลิคอน ที่สร้างจากฟิล์ม Poly-Si ที่ปริมาณสารเจือ 1.0×10^{16} - 1.3×10^{16} ion/cm^2 จะมีค่าความต้านทานลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่วนที่ปริมาณสารเจือ 16×10^{16} - 2.0×10^{16} ion/cm^2 จะมีค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และโพลีซิลิคอนที่สร้างจากฟิล์ม a-Si มีค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ทุกปริมาณสารเจือในการทดลองนี้

ตารางที่ 5.8 ค่าความต้านทานของ โพลีซิลิคอน ที่อุณหภูมิ 25-100 องศาเซลเซียส

ชนิด ฟิล์มที่ใช้ สร้าง โพลีซิลิคอน	ปริมาณสารเจือ จากการยิงฝัง ประจุ (ion/cm ²)	ความต้านทานโพลีซิลิคอนวัดที่อุณหภูมิต่างๆ (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

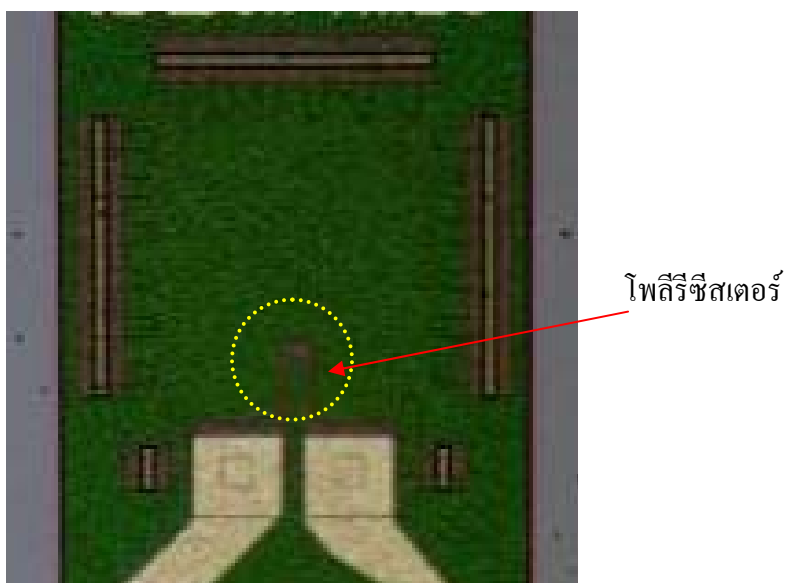
เมื่อพิจารณาในฟิล์มของ Poly-Si ที่ปริมาณสารเจือ 1.0×10^{16} , 1.3×10^{16} , 1.6×10^{16} และ 2.0×10^{16} ion/cm² จะได้ค่าของ TCR เท่ากับ -1.32×10^{-4} , -4.12×10^{-5} , 4.12×10^{-5} และ 1.36×10^{-4} ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าค่า TCR ของ ฟิล์ม Poly -Si มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณสารเจือ โดยมีค่าน้อยกว่าศูนย์ในช่วงปริมาณสารเจือ $1.0-1.5 \times 10^{16}$ 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 เป็นโพลิรีซิสเตอร์ในการตรวจจับความดัน 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 การทดสอบนำโพลิรีซิสเตอร์ไปใช้ในระบบการสร้างเซ็นเซอร์ตรวจจับความดัน

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

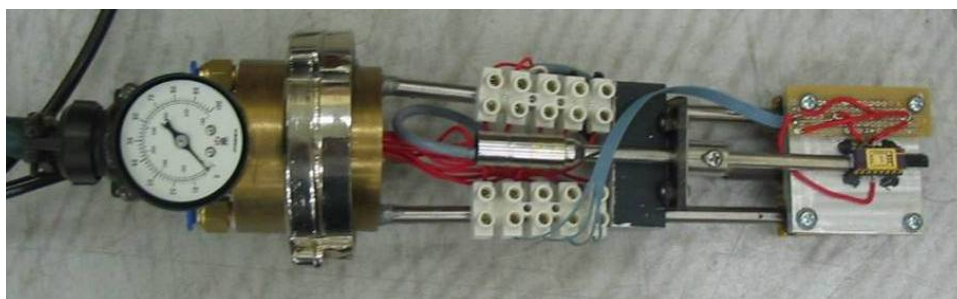


รูปที่ 5.20 อุปกรณ์ตรวจจับความดันที่สร้างในงานวิจัยนี้

5.8.1 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ความต้านทานเป็ยโซริซีฟทิป หรือโพลิรีซีสเตอร์ กับ การเปลี่ยนแปลงความดัน

5.8.1.1 การทดลองศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ความต้านทานเป็ยโซริซีฟทิป หรือโพลิรีซีสเตอร์ กับ การเปลี่ยนแปลงความดัน

ทำการทดลองโดยนำอุปกรณ์ตรวจจับความดันมาทดสอบโดยใส่ลงในชุดแทนจับดังรูปที่ 5.21 (ก) หลังจากนั้นนำชุดแทนจับลงในถังอัดความดัน ดังในรูปที่ 5.21 (ข) หลังจากนั้นทำการอัดความดันในช่วง 0-80 kPa หลังจากนั้นทำการวัดค่าความต้านทานของโพลิรีซีสเตอร์



(ก)

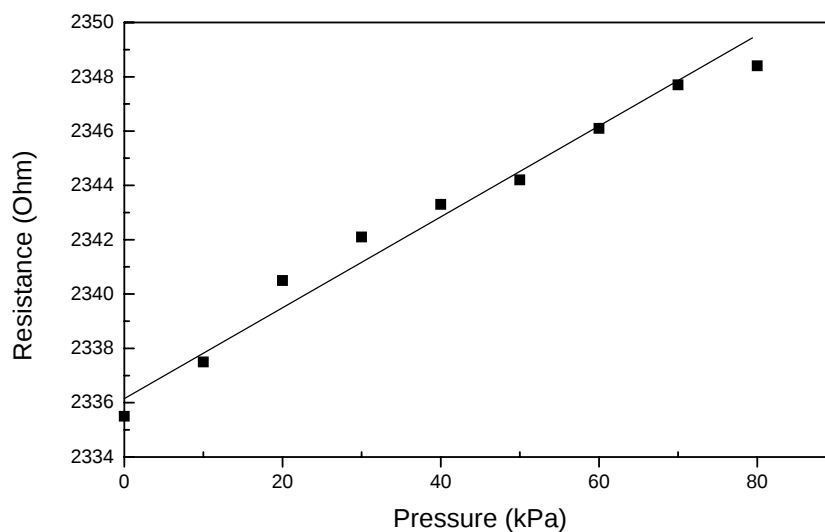


(ข)

รูปที่ 5.21 (ก) ชุดแท่นจับ (ข) ถังอัดความดัน

5.8.1.2 ผลการทดลองศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ความต้านทานเปิยโซรีชีฟทีป หรือ โพลีรีชีสเตอร์ กับการเปลี่ยนแปลงความดัน

ผลการทดลองหลังการวัดความต้านทานเปิยโซรีชีฟทีปที่ความดันในช่วง 0-80 kPa แสดงดังใน รูปที่ 5.22 ซึ่งจะพบว่าเมื่อทำการเพิ่มค่าความดันความต้านทานเปิยโซรีชีฟทีปจะเพิ่มขึ้น



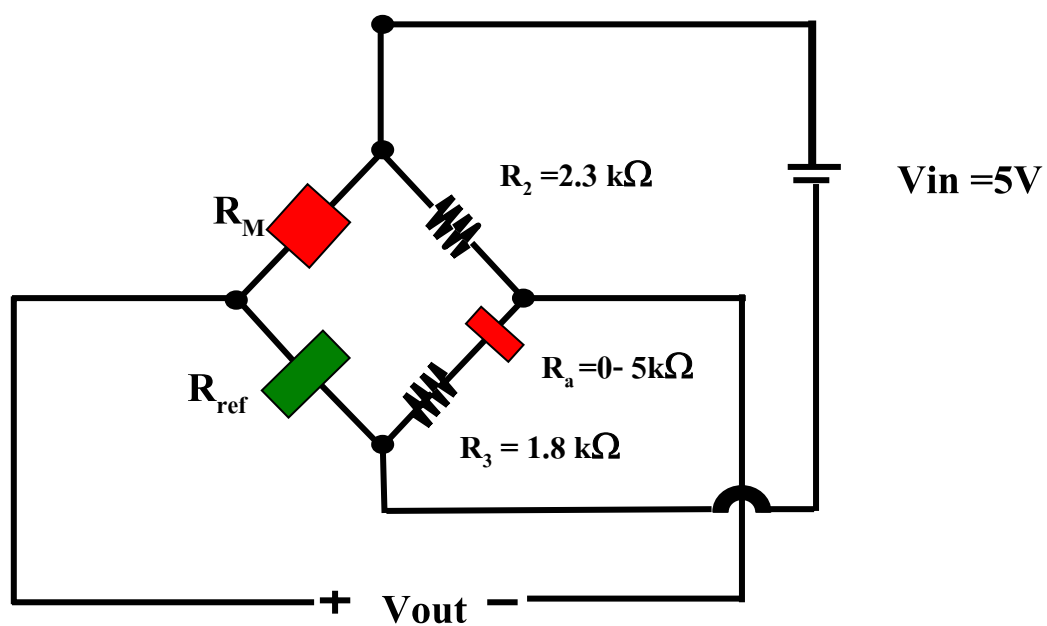
รูปที่ 5.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง Pressure กับ Resistance

5.8.2 การศึกษาหาค่าความไวของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน

5.8.2.1 การทดลองศึกษาหาค่าความไวของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน

ทำการทดลองความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความดัน-แรงดันไฟฟ้า โดยต่อวงจรวัดสโตนบริดจ์ดังรูปที่ 5.23 โดยมีแหล่งจ่ายแรงดัน (V_m) เท่ากับ 5 V ตัวต้านทาน R_m คือ ความต้านทานของโพลิริซีสเตอร์ของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน มีค่าเริ่มต้นที่ 2.3 k Ω ที่ความดัน 0 kPa, ตัวต้านทาน R_{ref} คือ ความต้านทานของโพลิริซีสเตอร์ที่ใช้เป็นตัวอ้างอิง 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

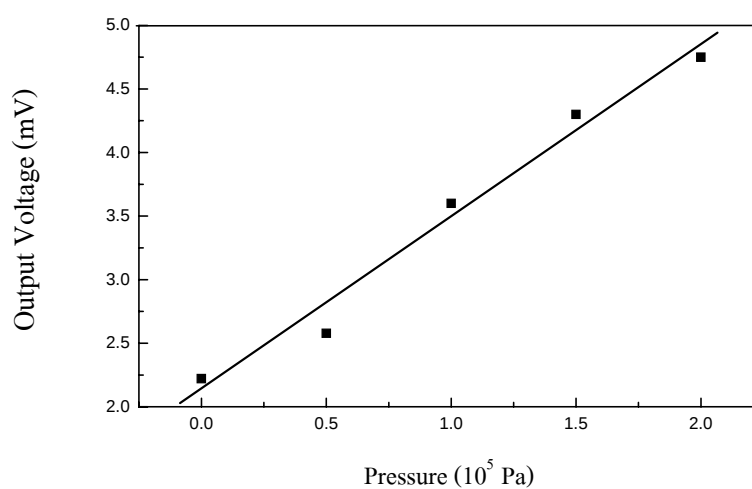
เมื่อต่อวงจรวัดสโตนบริดจ์เข้ากับระบบเสร็จแล้วทำการจ่ายแรงดันให้วงจรเท่ากับ 5 V แล้วปรับค่า R_a เพื่อให้ได้ V_{out} มีค่าต่ำที่สุดหรือเท่ากับ ศูนย์ ที่ความดัน 0 kPa จากนั้นทำการวัดค่า V_{out} ขณะที่ทำการปรับค่าความดัน 0-200 kPa



รูปที่ 5.23 วงจรวีทสโตนบริดจ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

5.8.2.2 ผลการทดลองศึกษาหาค่าความไวของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน

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

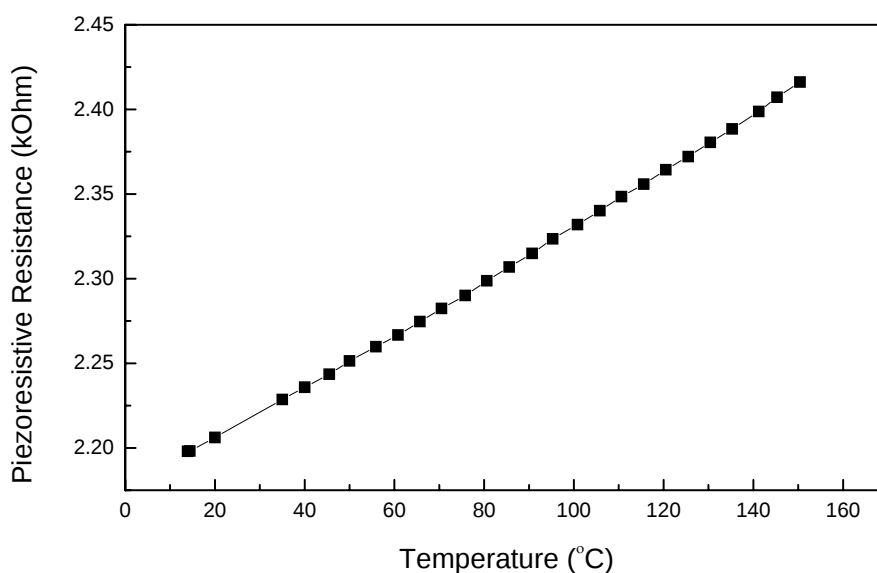


รูปที่ 5.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดัน-แรงดันไฟฟ้า

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

5.8.3 การทดลองศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเพียโซรีซีฟทิป กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบนอุปกรณ์ตรวจจับความดัน

ทำการนำอุปกรณ์ตรวจจับความดันมาวางบนแหล่งจ่ายอุณหภูมิ โดยทำการจ่ายอุณหภูมิ ตั้งแต่ 0-150 องศาเซลเซียส แล้วทำการวัดความต้านทานเพียโซรีซีฟทิป ซึ่งได้ผลการทดลองได้ดังรูปที่ 5.25



รูปที่ 5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเพียโซรีซีฟทิป กับอุณหภูมิ

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