

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 फिल्मโพลีซิลิคอน และฟิล์มอมอร์ฟัสซิลิคอน[4]

โครงสร้างของฟิล์มซิลิคอน มี 3 ชนิด คือ ผลึกซิลิคอน โพลีซิลิคอนและอมอร์ฟัสซิลิคอน แต่ในที่นี้เราจะกล่าวเฉพาะ ในส่วนของโพลีซิลิคอนและอมอร์ฟัสซิลิคอนเท่านั้น โดยมีรายละเอียดดังนี้

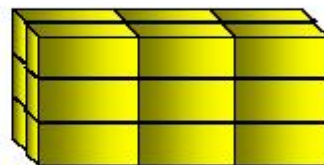
2.1.1 โครงสร้างฟิล์มโพลีซิลิคอน

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

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



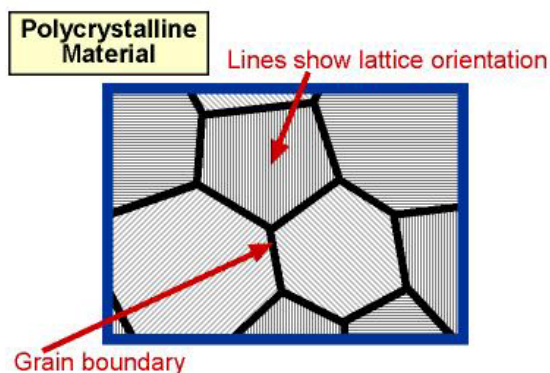
(ก)



(ข)

รูปที่ 2.1 (ก) โครงสร้างโพลีซิลิคอน และ (ข) โครงสร้างผลึกซิลิคอน

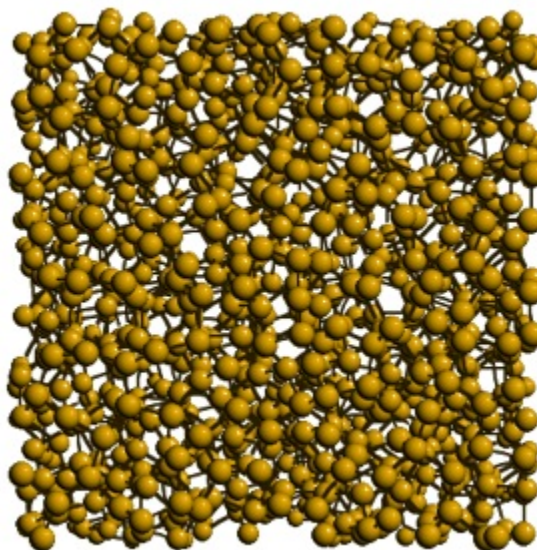
เมื่อทำการดูที่ผิวหน้าของโพลีซิลิคอนมีลักษณะดังรูปที่ 2.2 โดยภายในมีผลึกแต่ละก้อนที่แบ่งแยกด้วยขอบเขตเกรน (grain boundary) และผลึกในแต่ละก้อนนี้มี ระบายผลึก (lattice orientation) หลายระบายผลึกอยู่ในเนื้อฟิล์มเดียวกัน เช่น $[111]$ และ $[100]$ เป็นต้น



รูปที่ 2.2 ผิวหน้าของโครงสร้างโพลีซิลิคอน

2.1.2 ลักษณะโครงสร้างของฟิล์มอมอร์ฟัสซิลิคอน

อมอร์ฟัสซิลิคอน (amorphous silicon) เป็นซิลิคอนที่มีโครงสร้างแบบวัตถุด้านฐานซึ่งลักษณะโครงสร้างของสารของแข็ง ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของอะตอมเป็นไปอย่างไม่เป็นระเบียบและไม่เป็นรูปแบบที่แน่นอนไม่เป็นผลึกพิจารณาได้ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งมีลักษณะตรงกันข้ามกับผลึก ตัวอย่างของวัตถุด้านฐาน คือ อมอร์ฟัสซิลิคอน เป็นต้น



รูปที่ 2.3 วัตถุด้านฐานระดับอะตอม

2.1.3 คุณสมบัติฟิล์มโพลีซิลิคอน [1, 2, 3]

โพลีซิลิคอนมีคุณสมบัติพิเศษหลายอย่าง เช่น สร้างได้ง่ายและทำการควบคุมความหนาได้ง่ายดังในตารางที่ 2.1 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของฟิล์มโพลีซิลิคอนกับสารชนิดอื่นๆเนื่องจากสร้างจากเทคนิค LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่อยู่ทั่วไปในอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับอัตราการเกิดเนื้อฟิล์มโดยทั่วไปจะเท่ากับ 1,000 อังสตรอมต่อชั่วโมงที่เปอร์เซ็นต์ความสม่ำเสมอ (uniformity) เท่ากับ 0.5 แต่สำหรับเพอร์ใช้เครื่อง CVD สร้างใช้อุณหภูมิในการสร้างเพอร์อยู่ที่ 800-900 องศาเซลเซียส และเมื่อไปสร้างรวมกับกระบวนการอื่น กระบวนการสร้างฟิล์ม ซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งต้องใช้อุณหภูมิมากกว่า 1,000 องศาเซลเซียส ทำให้เพอร์มีการเปลี่ยนสภาพได้ สำหรับวัสดุผลึกซิลิคอน, แกลเลียมอาร์เซไนด์ ส่วนมากจะสร้างจากเทคนิค MBE (Molecular Beam Epitaxy) ซึ่งราคาเครื่องค่อนข้างสูง และอัตราการเกิดเนื้อฟิล์มค่อนข้างต่ำ

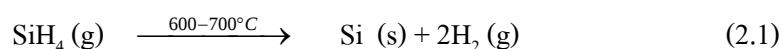
ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของฟิล์มโพลีซิลิคอนกับสารชนิดอื่นๆ

คุณสมบัติ	หน่วย	วัสดุ				
		โพลีซิลิคอน	ผลึกซิลิคอน	เยอรมันเนียม	เพอร์	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 x10 ⁻³	3 x10 ⁻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

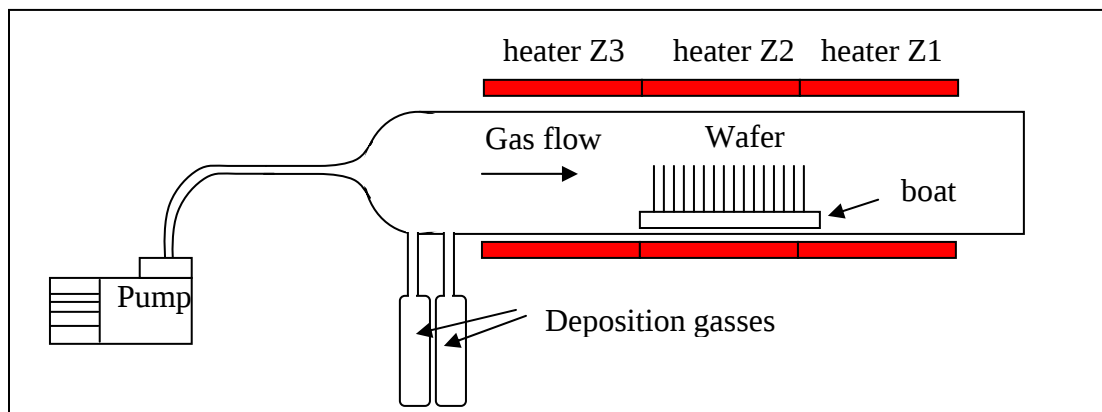
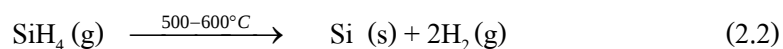
2.1.4 กระบวนการสร้างฟิล์มโพลีซิลิคอนและอมอร์ฟัสซิลิคอน [2, 3]

ในการสร้างฟิล์มโพลีซิลิคอนและอมอร์ฟัสซิลิคอน ในงานวิจัยนี้เราใช้เครื่อง LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) ซึ่งเป็นแบบเตาความร้อนในแนวนอน (horizontal hot wall furnace) มีลักษณะเป็นท่อควอทซ์ (quartz tube) ทรงกระบอกวางในแนวนอนซึ่งถูกล้อมรอบด้วยฮีตเตอร์ 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)

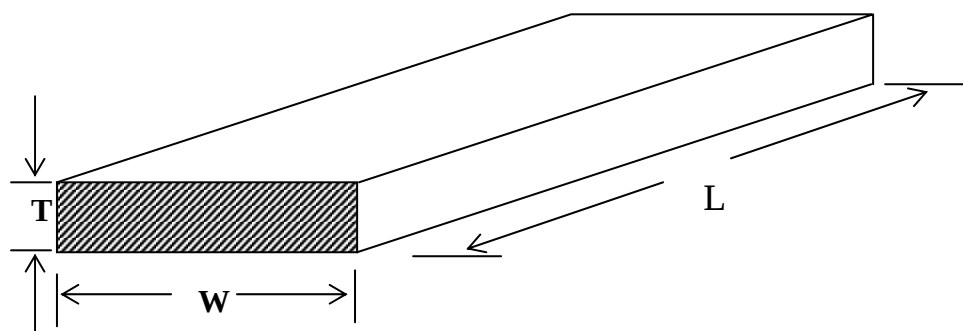
สำหรับรายละเอียดเครื่องมือวัดจะกล่าวในบทที่ 3

2.2 ตัวต้านทานที่สร้างในวงจรรวม และเซ็นเซอร์[5]

ตัวต้านทานในสารกึ่งตัวนำสามารถแบ่งออกเป็น 4 ชนิด คือ ตัวต้านทานชนิดแพร่สารเจือ (diffused resistor), ตัวต้านทานชนิดพินช์ (pinched resistor), ตัวต้านทานชนิดอีพิแทกซ์เชียล (epitaxial resistor) และ ตัวต้านทานชนิดยิงฝังประจุ (ion implanted resistor) ตัวต้านทานในสารกึ่งตัวนำส่วนใหญ่จะเป็นแบบโมนอลิธิค (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 $R_s (\Omega/\square)$ ซึ่งเรียกว่า ความต้านทานเชิงแผ่น ($\Omega/\square$) ซึ่งแสดงลงในสมการที่ 2.4 ดังนี้คือ

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

หน่วยของความต้านทานเชิงแผ่น คือ ohms ต่อ square ($\Omega/\square$) ซึ่งกำหนดให้ความต้านทานรวม เท่ากับความต้านทานเชิงแผ่นก็ต่อเมื่อค่า W เท่ากับ L ดังนั้นค่าความต้านทานรวมมีความสัมพันธ์กับ ความต้านเชิงแผ่นดังสมการ 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

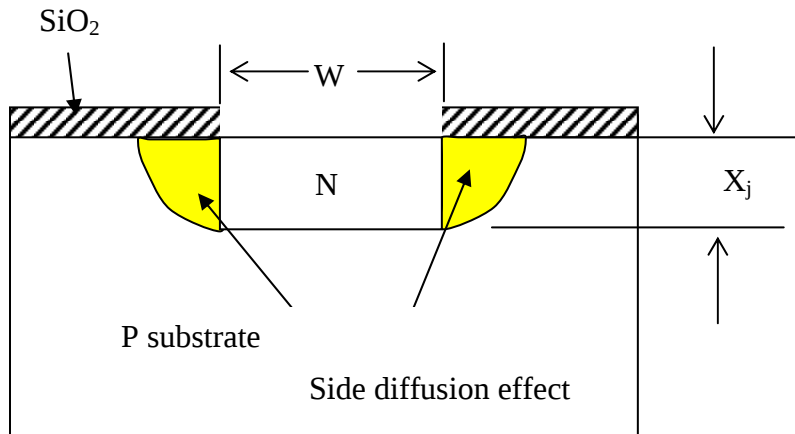
การคำนวณหาค่าความต้านทานคำนวณได้จากสมการ 2.6

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

โดย x_j คือ ความลึกที่ได้จากการแพร่สารของตัวต้านทานชนิดแพร่สารเจือ

$\bar{\rho}$ คือ ค่าเฉลี่ยของสภาพความต้านทานของตัวต้านทานชนิดแพร่สารเจือ

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



รูปที่ 2.7 การแพร่ออกด้านข้างของตัวต้านทานชนิดแพร่สารเจือ

2.2.2 ตัวต้านทานชนิดพินช์

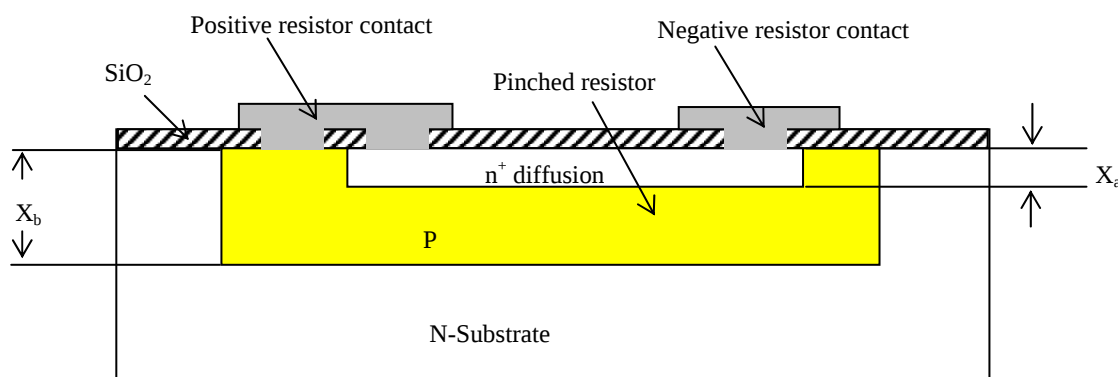
เราสามารถเพิ่มตัวต้านทานเชิงแผ่นภายในบริเวณสารกึ่งตัวนำ ด้วยการลดพื้นที่ภาคตัดขวาง (effective cross-sectional area) เทคนิคนี้เป็นเทคนิคการสร้างตัวต้านทานชนิดพินช์ (pinched resistor) ดังตัวอย่างดังรูปที่ 2.8 โดยเริ่มต้นทำการสร้างสารเจือชนิดพีที่มีความลึกเท่ากับ X_b หลังจากนั้นทำการแพร่สารเจือชนิดเอ็นที่เข้มข้นสูง (n^+) ที่ความลึกเท่ากับ X_a เพื่อปรับค่าความต้านทานตัวต้านทานที่ได้นี้ เราเรียกว่าตัวต้านทานชนิดพินช์

ค่าความต้านทานเชิงแผ่นของตัวต้านทานชนิดพินช์ สามารถหาได้จากสมการ 2.7

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

โดยที่ X_b คือ ความลึกสารเจือของตัวต้านทานชนิดพินช์ ก่อนปรับค่าความต้านทาน

X_a คือ ความลึกสารเจือของตัวต้านทานชนิดพินช์ หลังปรับค่าความต้านทาน

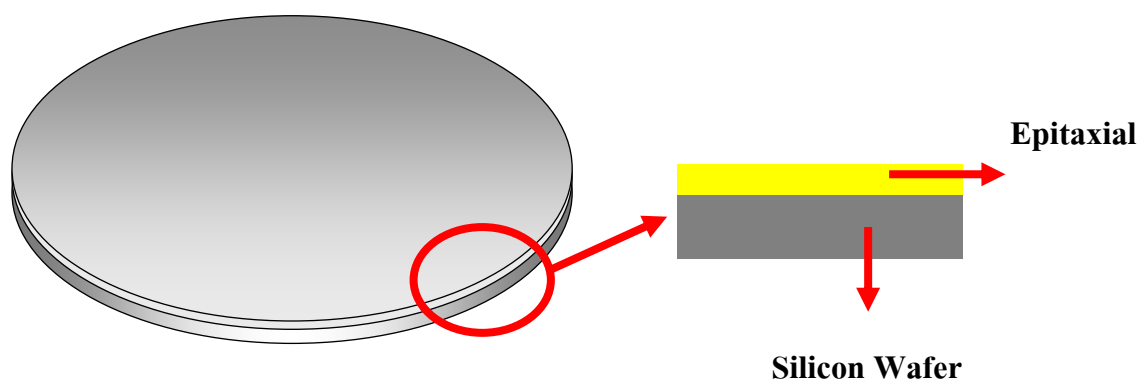


รูปที่ 2.8 โครงสร้างตัวต้านทานชนิดพินช์

2.2.3 ตัวต้านทานชนิดอีพิแทกซ์เซียล

ในบางกรณีเราต้องการสร้างแผ่นฟิล์มบนแผ่นเวเฟอร์โดยแผ่นฟิล์มนี้มีโครงสร้างผลึกซิลิคอนรูปเดียว เช่นเดียวกับผลึกของแผ่นเวเฟอร์และสามารถควบคุมความเข้มข้นของสารเจือปนอิสระจากฐานรองหรือแผ่นเวเฟอร์ เราเรียกฟิล์มชั้นนี้ว่า อีพิแทกซ์เซียล (epitaxial) ซึ่งมาจากภาษากรีกโดยคำว่า อีพิ (epi) มีความหมายว่า บน และ แทกซิส (taxis) มีความหมายว่า ลำดับ เมื่อนำมารวมกันจึงแปลว่าการจัดวางให้ซ้อนกัน

ชั้นอีพิแทกซ์เซียล (Epitaxial layer) มีโครงสร้างผลึกซิลิคอนรูปเดียวเหมือนกับฐานรอง และชนิดของสารเจือปนสามารถเป็นชนิดพีหรือชนิดเอ็นเป็นอิสระกับสารเจือปนของฐานรองหรือแผ่นซิลิคอนฐานรอง สำหรับรูปของอีพิแทกซ์เซียลของซิลิคอน แสดงดังในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ชั้นอีพิแทกซ์เซียลบนแผ่นซิลิคอนฐานรอง

ตัวต้านทานชนิดอีพิแทกซ์เชียล (epitaxial resistor) เป็นตัวต้านทานที่ได้จากการปรับค่าเจือสารลงชั้นอีพิแทกซ์เชียล โดยสามารถปรับค่าความต้านทานได้ง่ายโดยไม่ขึ้นกับฐานรอง ค่าความต้านทานเชิงแผ่นของตัวต้านทานชนิดอีพิแทกซ์เชียล สามารถหาได้จากสมการ 2.8

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

โดยที่ ρ_e คือ สภาพความต้านทานของชั้นอีพิแทกซ์เชียล

d คือ ความหนาของชั้นอีพิแทกซ์เชียล

ข้อดีของตัวต้านทานชนิดอีพิแทกซ์เชียล คือ สามารถหาค่าความต้านทานและสามารถกำหนดค่าความต้านทานได้ง่าย เพราะว่าเป็นชั้นฟิล์มที่สร้างขึ้นใหม่ไม่ขึ้นกับปริมาณสารเจือของแผ่นซิลิคอนฐานรอง

ข้อเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นสำหรับการสร้างชั้นอีพิแทกซ์เชียล

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]

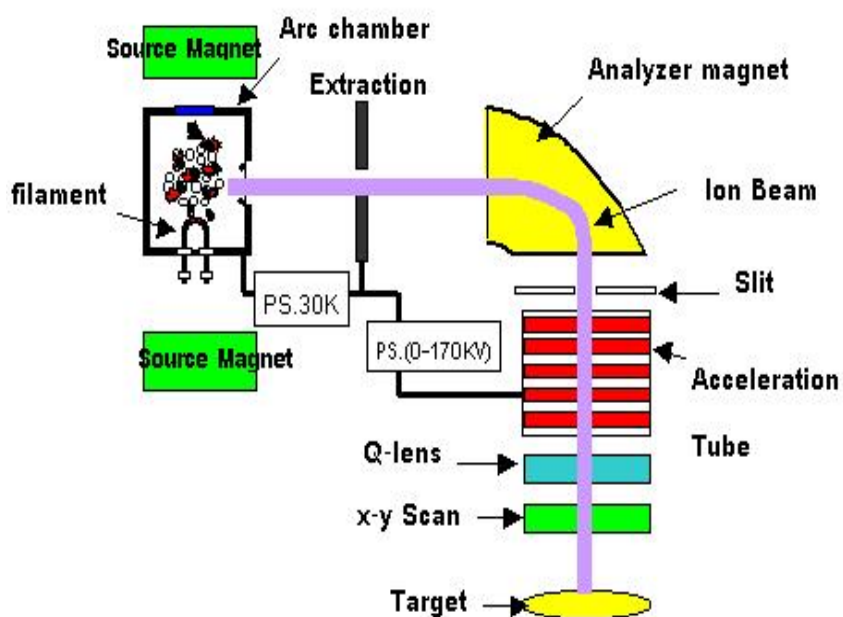
กระบวนการยิงฝังประจุ (ion implantation) คือ กระบวนการเติมสารเจือด้วยกระบวนการยิงฝังประจุลงในวัสดุเป้าหมายเพื่อเปลี่ยนคุณสมบัติของวัสดุเป้าหมาย เช่น การเปลี่ยนชนิดของสารกึ่งตัวนำซิลิคอนจากสารชนิดเอ็นเป็นชนิดพีเป็นต้น ในกระบวนการยิงฝังประจุจะมีกระบวนการด้วยกัน 2 กระบวนการคือ (1) การยิงฝังประจุ เป็นกระบวนการเติมสารเจือโดยยิงประจุลงในเนื้อสารของวัสดุเป้าหมายและ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

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

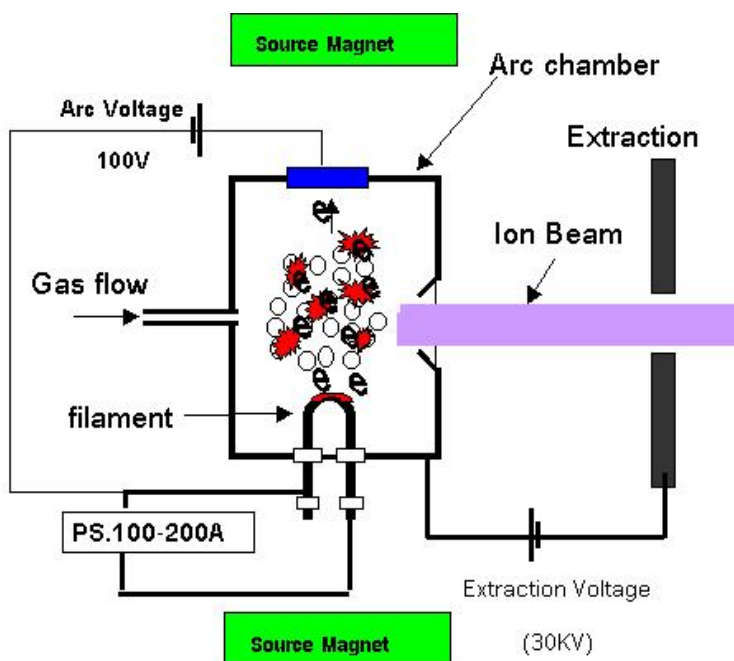
2.3.1 การยิงฝังประจุ

การยิงฝังประจุ คือ กระบวนการปรับโครงสร้างของเนื้อของวัสดุเป้าหมาย หลังการยิงฝังประจุ โดยทั่วไปเราจะนำเทคนิคไปใช้ในการสร้างสารเจือในอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำ เพื่อสร้างสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น หรือ ชนิดพี โดยสารเจือที่ใช้ในการสร้างสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น คือ สารเจือหมู่ 5 ของตารางธาตุเช่น ฟอสฟอรัส (phosphorus) และ อาร์เซนิก (arsenics) เป็นต้น สำหรับในการสร้างสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะใช้สารเจือในหมู่ 3 ของตารางธาตุเช่น โบรอน (boron) เป็นต้น ในการเติมสารเจือด้วยการยิงฝังประจุจะต้องใช้เครื่องจักรที่สำคัญ คือ เครื่องยิงฝังประจุ (ion implanter) สำหรับหลักการทำงานของเครื่องยิงฝังประจุ คือ ประจุจะถูกสร้างด้วยแหล่งกำเนิดประจุ (ion source) ชนิดเบอรันาสแล้วประจุบวกจะถูกดึงออกมาด้วยศักย์ไฟฟ้า แอ็กซ์แทรกชัน (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), ขดลวดทั้งสเดน (filament), แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก (source magnet) และ แหล่งจ่ายก๊าซ ดังรูปที่ 2.11 โดยมีการทำงานด้วยการจ่ายกระแสให้ขดลวดประมาณ 200 แอมแปร์ และมีการจ่ายค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างอาร์คแชมเบอร์ และขดลวด 100 โวลต์ อิเล็กตรอนจากขดลวดทั้งสเดนจะเคลื่อนไปยังอาร์คแชมเบอร์ จะไปชนกับกลุ่มก๊าซก่อให้เกิดการไอออไนเซชัน (ionization) ซึ่งอิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกเหนี่ยวนำด้วยแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กทำให้เกิดการหมุนตัว (spin) เพื่อเพิ่มอัตราการชนทำให้มีประจุมากขึ้น ส่วนประจุบวกจะถูกดูดไปยังแอคแทรกชันเพลท (extraction plate) ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ 30 กิโลโวลต์เมื่อเทียบกับอาร์คแชมเบอร์



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของเครื่องยิงฟิสิกส์ประจุ



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของแหล่งกำเนิดประจุชนิดเบอร์นาส

สิ่งที่ใช้ในการวัดผลของการจี้สาร โดยใช้เทคนิคการจี้สารด้วยเครื่องยิงฟองประจุ คือปริมาณสารจี้ (Dose) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 2.9

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

D คือ ปริมาณสารจี้ 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

จะเห็นว่าปริมาณสารจี้แปรผันโดยตรงกับกระแสไอออน และเวลา แต่การยิงสารจี้ใช้เวลามากเกินไปจะเป็นผลให้ชั้นโฟโตริซิสแข็งตัวทำให้กำจัดยากมาก นอกจากนี้ผลผลิตในการสร้างก็ลดลง เพราะต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้นดังนั้นการเพิ่มกระแสหรือลดปริมาณสารจี้จะทำให้สามารถลดเวลาในการผลิตได้

เครื่องยิงฟองประจุที่ใช้ในงานวิจัยนี้เราใช้เครื่องรุ่น NH-20SR เป็นชนิด Medium Current ซึ่งแสดงดังรูป 2.12

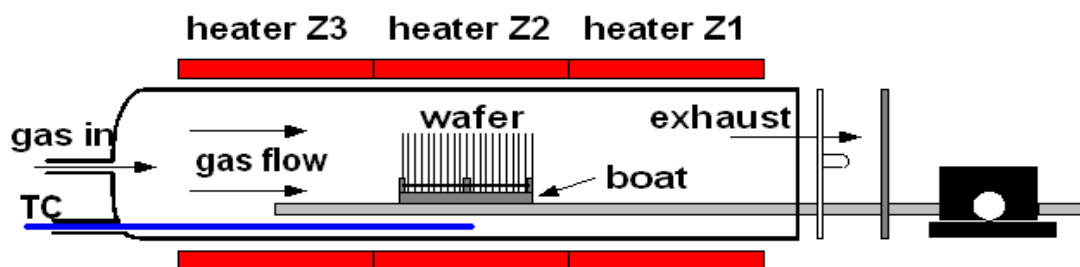


รูปที่ 2.12 เครื่องยิงฟองประจุรุ่น NH-20SR ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์

2.3.2 เทคนิคการแอนนัลหลังการยิงฝังประจุ[8,9]

หลังจากทำการยิงฝังประจุแล้วผิวของแผ่นซิลิคอนหรือวัสดุที่ได้รับการยิงฝังประจุจะมีลักษณะคล้าย อมอร์ฟัส ไอออนที่ถูกยิงเข้ามาในนั้นจะชนกับอะตอมในแผ่นซิลิคอนหรือวัสดุที่ได้รับการยิงฝังประจุ จนกลายเป็นอะตอมแบบอมอร์ฟัส นอกจากนี้อะตอมที่เกิดจากการยิงฝังประจุส่วนใหญ่ จะถูกตั้งอยู่ในลักษณะ อินเตอร์สตีเชียลลิ (interstitially) นั่นคือมันจะถูกตั้งอยู่ด้านนอกของโครงสร้างผลึกของซิลิคอน การแอนนัลทำให้อะตอมที่สารเจือเคลื่อนที่เข้ามาในพันธะซิลิคอนหรือวัสดุที่ได้รับการยิงฝังประจุ โดยเคลื่อนที่ไปในตำแหน่งบนแลตทิซ ไซต์ ซับสติทิวติง (lattice sites-substituting) ของซิลิคอน บนอะตอม ช่วงอุณหภูมิในการแอนนัลมีดังนี้ ที่อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส โครงสร้างผลึกที่ถูกทำลายจะทำให้กลับมาเป็นผลึกใหม่อีกครั้ง ที่อุณหภูมิ 750-800 องศาเซลเซียสใช้สำหรับทำให้เกิดจับพันธะระหว่างสารเจือกับวัสดุซึ่งวัสดุที่ได้รับการยิงฝังประจุจะสามารถนำไฟฟ้าได้ดีขึ้นและที่อุณหภูมิมากกว่า 900 องศาเซลเซียส[8]ที่ใช้ในการขับเคลื่อนสารเจือเข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำหรือวัสดุที่ได้รับการยิงฝังประจุซึ่งความลึกขึ้นกับปัจจัยของสัมประสิทธิ์ของการเคลื่อนที่ของอะตอม สารเจือในวัสดุเป้าหมายโดยจะแปรตามชนิดของสารเจือ ระบายผลึกของแผ่นเป้าหมายและอุณหภูมิ ดังนั้นการแอนนัลหลังการยิงฝังประจุจะทำให้ได้ผลประโยชน์ 3 ประการคือ (1) เพื่อทำการซ่อมแซมส่วนที่ไม่สมบูรณ์ของผลึกที่เกิดจากการยิงสารเจือหรือสร้างโครงสร้างผลึกขึ้นมาอีกครั้ง (2) เพื่อเป็นการรวมตัวพันธะระหว่างอะตอมสารเจือกับอะตอมซิลิคอนและ (3) การขับเคลื่อนสารเจือ

ในการแอนนัลเราใช้เตาแบบแนวนอน ซึ่งมีลักษณะเป็นท่อควอทซ์รูปร่างเป็นทรงกระบอกวางในแนวนอนล้อมรอบด้วยฮีตเตอร์ 3 โซน คือ โซน Z1, Z2 และ Z3 เราจะทำกาใส่แผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ไว้ที่ตำแหน่งโซน Z2 เพราะเป็นตำแหน่งที่อุณหภูมิมีค่าคงที่ พิจารณาลักษณะโครงสร้างเตาแบบแนวนอน ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของเตาแบบแนวนอน

เตาแบบแนวนอน ที่ใช้ในการวิจัยนี้ใช้ รุ่น SVG THERMCO TMX2604 Diffusion Furnace ซึ่ง
มีแสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 เตาแอนนิลแบบแนวนอน ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์

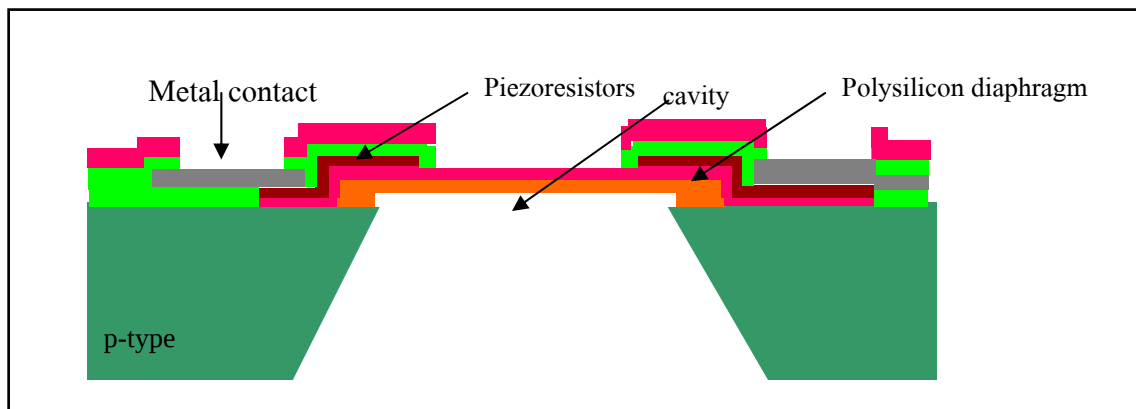
2.4 อุปกรณ์ตรวจจับความดันขนาดจุลภาค

อุปกรณ์ตรวจจับความดันขนาดจุลภาค (pressure microsensors) ในระดับไมโครเมตรได้ถูกนำมาใช้งานอย่างหลากหลาย เช่น ใช้ใน อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมทางการแพทย์ และอื่นๆ โดยมีการพัฒนาขนาดของอุปกรณ์ตรวจจับความดันให้มีขนาดเล็กลงเรื่อยมาตามวัตถุประสงค์การใช้งาน ในปัจจุบันความต้องการใช้งานอุปกรณ์ตรวจจับความดันไปตรวจจับความดันในบริเวณที่มีขนาดจุลภาคที่มีขนาดเล็กลงมีจำนวนเพิ่มขึ้น และอุปกรณ์ตรวจจับความดันขนาดจุลภาคชนิดเพียโซรีซีฟทิฟ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่สามารถพัฒนาให้มีขนาดเล็กลงในระดับไมครอน

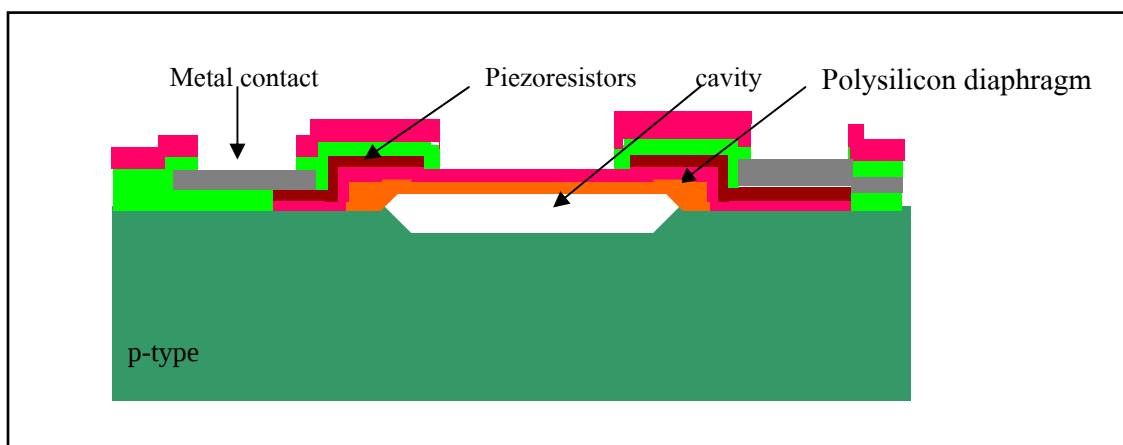
2.4.1 โครงสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดันขนาดจุลภาคแบบเพียโซรีซีฟทิฟ[1]

โดยทั่วไปอุปกรณ์ตรวจจับความดันขนาดจุลภาคที่ใช้มี 2 วิธีการ คือ หลักพื้นฐานของเพียโซรีซีฟทิฟ โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของตัวต้านทานขณะเกิดการยุบตัวของไดอะแฟรม เมื่อให้ความดัน และ หลักพื้นฐานของคาปาซิทิฟ (capacitive) โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของตัวเก็บประจุขณะเกิดการยุบตัวของไดอะแฟรม เมื่อให้ความดัน แต่ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะในส่วน of อุปกรณ์ตรวจจับความดัน

ขนาดจุลภาคที่ใช้หลักพื้นฐานของเพียโซรีซีฟทีปเพราะจะนำเทคนิคนี้ไปทำการวิจัยต่อไป และเทคนิคการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดันขนาดจุลภาคที่สร้างจะประกอบด้วย 2 แบบ คือ บัลก์ (bulk) และ เชิงผิว (surface) ดังในรูปที่ 2.15 (ก) และ (ข) ตามลำดับ แสดงหลักพื้นฐานของอุปกรณ์ตรวจจับ เพียโซรีซีฟทีป



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.15 (ก) อุปกรณ์ตรวจจับความดันชนิดเพียโซรีซีฟทีปขนาดจุลภาคแบบบัลก์

(ข) อุปกรณ์ตรวจจับความดันชนิดเพียโซรีซีฟทีปขนาดจุลภาคแบบเชิงผิว

เทคนิคการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดันชนิดเพียโซรีซีฟทีป ขนาดจุลภาคแบบบัลก์ จะอาศัยการกัดเปิดช่องว่าง (cavity) ด้านหลังแผ่นด้วยวิธีการกัดด้วยสารเคมี (wet etching) ได้แก่ KOH,

TMAH เป็นต้น สำหรับเทคนิคการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับความดันชนิดเพียโซรีซีฟทิฟ ขนาดจุลภาคแบบเชิงผิวจะอาศัยการกัดเปิดช่องที่ด้านหน้าแผ่น โดยอาศัยการเปิดรูแล้วทำการกัดด้วยวิธีการใช้สารเคมี

การเปลี่ยนแปลงความดันสามารถวัดได้ด้วยการวัดตัวต้านทานหรือเพียโซรีซีฟทิฟ สเตรนเกจ (strain gauges) ที่วางบนตำแหน่งด้านบนแผ่นไดอะแฟรม โดยที่ตัวต้านทานนี้ทำจากโพลีซิลิคอนที่ได้รับการเจือสารและได้รับการออกแบบเป็นคู่ของวงจร เช่น วิสโตเนบริดจ์ มีการเปลี่ยนแปลงความเค้นของเพียโซรีซีฟทิฟ สเตรนเกจ สัมพันธ์กับแรงดัน ($P-P_0$) ค่าความเที่ยงตรงจะแปรผันขึ้นตรงกับสัมประสิทธิ์เพียโซรีซีฟทิฟ (piezoresistive coefficient : π) ของวัสดุของแผ่นไดอะแฟรม [1] โดยมีความสัมพันธ์ตามสมการ 2.10

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

2.4.2 สัมประสิทธิ์เพียโซรีซีฟทิฟตามยาวและสัมประสิทธิ์เพียโซรีซีฟทิฟตามขวาง[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 สัมประสิทธิ์เพียโซรีซีฟทิฟเทนเซอร์

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

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

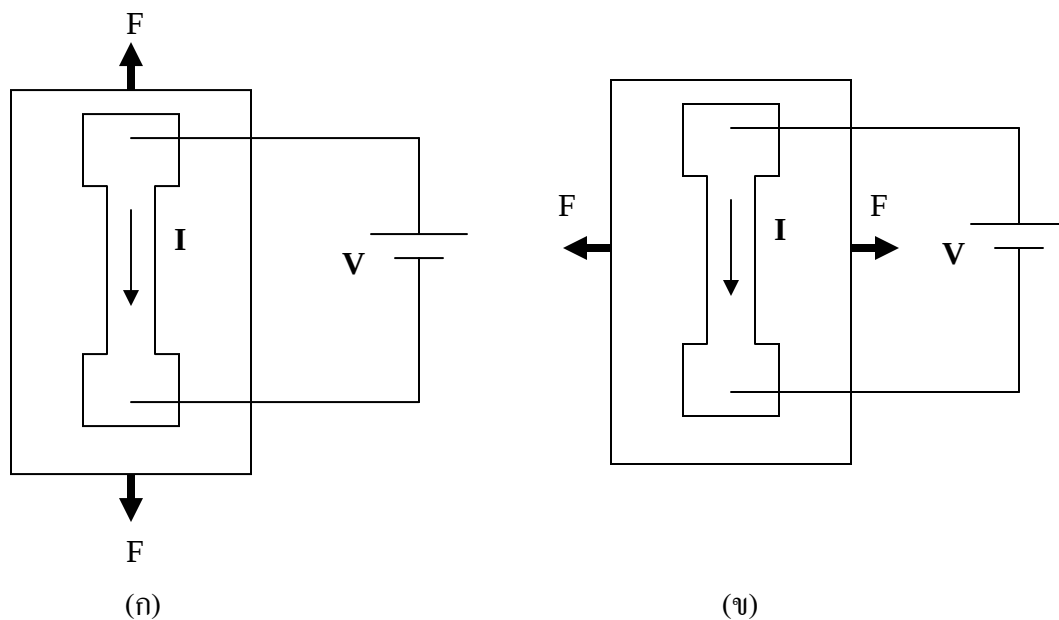
$$\frac{\rho_1 - \rho_0}{\rho_0} = \pi_l \sigma_1 \quad (2.16)$$

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

ในทำนองเดียวกันเมื่อกำหนดให้ 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 เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำกับวัสดุแล้วทำให้เกิดความเค้นขึ้นโดยสัมพันธ์กับอัตราเปลี่ยนแปลงของสภาพต้านทานในวัสดุ 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)

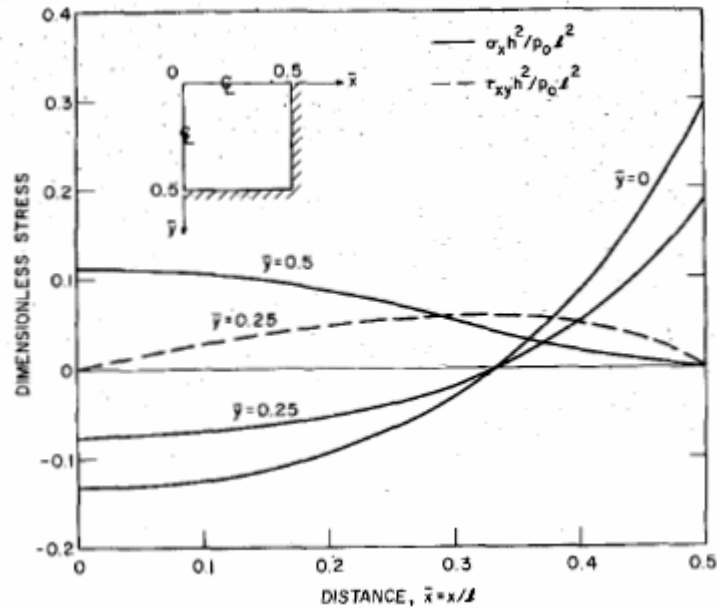
l คือ ความกว้างของไดอะแฟรม

h คือ ความหนาของไดอะแฟรม

p คือ ความดันที่ให้กับไดอะแฟรม

จากสมการที่ 2.19 จะเห็นว่า ความเค้นที่เกิดขึ้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับขนาดความกว้างของไดอะแฟรม ความหนาของไดอะแฟรม และความดันที่ป้อนให้กับไดอะแฟรมแล้วยังขึ้นอยู่กับความ

เส้นไคเมนชันเลสเป็นส่วนสำคัญอีกด้วยซึ่งค่าของความเค้นไคเมนชันเลสนี้จะมีค่าแตกต่างกันไปตามตำแหน่งการวางตัวด้านทานไคอะแฟรมดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.17 การกระจายค่าความเค้นไคเมนชันเลสใน 1 ควอเทรนต์ที่บริเวณต่างๆ กับบนไคอะแฟรมรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

จากรูปที่ 2.17 เป็นกราฟแสดงการกระจายค่าความเค้นไคเมนชันเลสใน 1 ควอเทรนต์ที่บริเวณต่างๆ กันบนไคอะแฟรมรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ความเค้นไคเมนชันจะมีค่ามากที่สุดที่บริเวณขอบของไคอะแฟรมทั้ง 2 ด้าน ดังนั้นเมื่อป้อนความดันให้กับไคอะแฟรมจะทำให้ความเค้นตามความยาวและความเค้นตามขวางเกิดการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด โดยที่ความเค้นตามความยาวจะเกิดการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดที่ตำแหน่ง $\bar{x} = 0, \bar{y} = 0.5$ บนไคอะแฟรมและความเค้นตามขวางอยู่ที่ตำแหน่ง $\bar{x} = 0.5, \bar{y} = 0$ บนไคอะแฟรม และเมื่อแทนค่าความเค้นไคเมนชันเลสที่ตำแหน่งดังกล่าวลงในสมการที่ 2.19 จะทำให้สามารถคำนวณหาความเค้นตามยาวและความเค้นตามขวางได้ดังสมการที่ 2.20 และ 2.21 ดังนี้

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

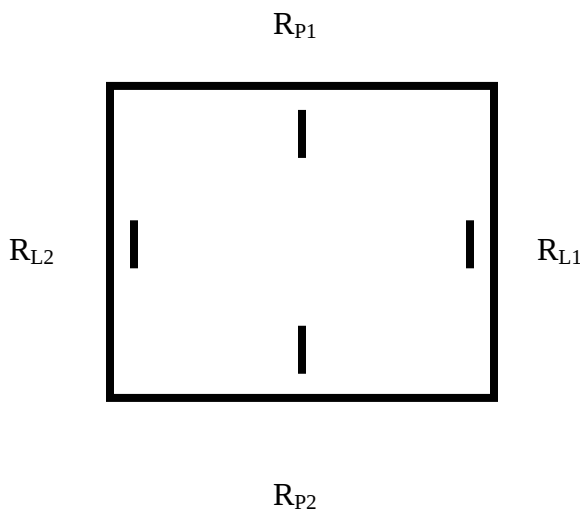
$$\sigma_t = \sigma(0.5, 0)$$

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

เมื่อให้ความดันกับไดอะแฟรม ไดอะแฟรมจะเกิดการแอ่นตัว ทำให้มีความเค้นขึ้นซึ่งที่บริเวณตำแหน่งขอบของไดอะแฟรมจะมีความเค้นเกิดขึ้นมากที่สุดดังสมการที่ 2.20 และ 2.21 ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการออกแบบการวางตำแหน่งของตัวต้านทานบนไดอะแฟรมจึงควรออกแบบให้ตัวต้านทานอยู่ชิดขอบไดอะแฟรม เพื่อให้เกิดความเค้นในตัวต้านทานมากที่สุด ใน 1 ควอตเรน ดังนั้นเมื่อพิจารณาครบทั้ง 4 ควอตเรน บริเวณที่เกิดความเค้นในตัวต้านทานมากที่สุด คือ บริเวณตรงกลางของขอบ

2.4.4 ความเค้นและสัมประสิทธิ์เพียโซรีซีฟทิฟในตัวต้านทาน[13, 14]

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



รูปที่ 2.18 ตัวต้านทาน 4 ตัวบนไดอะแฟรม

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

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

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

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

π_l คือ สัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีฟที่ไปตามยาว (longitudinal piezoresistive coefficient)

π_t คือ สัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีฟที่ไปตามขวาง (transverse piezoresistive coefficient)

σ_l คือ ความเค้นตามยาว (longitudinal stress)

σ_t คือ ความเค้นตามขวาง (transverse stress)

โพลีซิลิคอนที่สร้างบนฐานรองซิลิคอนด้วยวิธี LPCVD จะมีลักษณะไม่เป็นผลึกเดี่ยว แต่จะเป็นผลึกแบบหลายรูป ซึ่งมีทั้งระนาบ (100) และระนาบ (111) ดังนั้นตัวต้านทานโพลีซิลิคอน ที่สร้างขึ้นจึงมีค่าสัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีฟที่ไปตามยาวและสัมประสิทธิ์ตามขวางเป็นค่าเฉลี่ย 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 ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีฟที่ไปตามยาว

$\langle \pi_t \rangle$ คือ ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีฟที่ไปตามขวาง

$\langle Y \rangle$ คือ ยังโมดูลัสเฉลี่ยของฟิล์มโพลีซิลิคอน

GF_l คือ เกจแฟคเตอร์ตามยาว (longitudinal gage factor)

GF_t คือ เกจแฟคเตอร์ตามขวาง (transverse gage factor)

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

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

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

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

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

เมื่อ ε_l คือ ความเครียด (strain) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมต่อความยาวเดิมก่อนถูกแรงกระทำดังสมการที่ 2.29

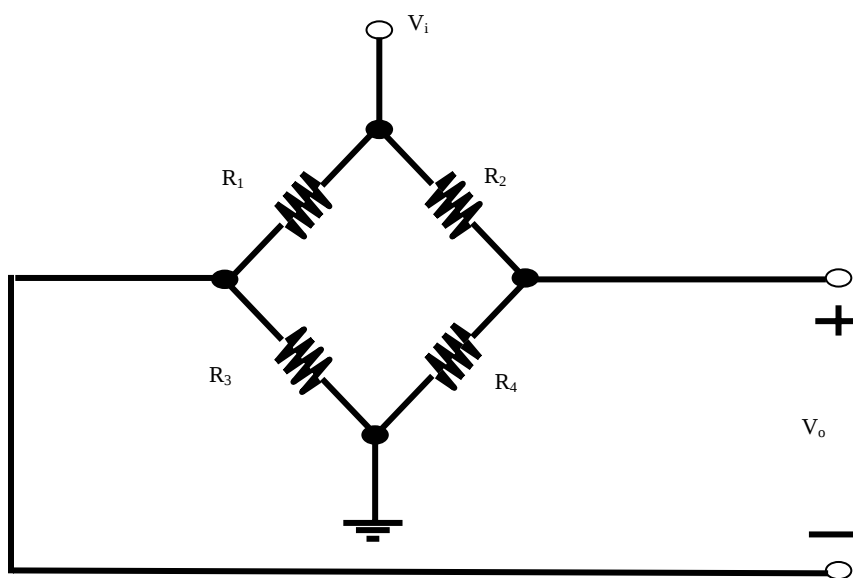
$$\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l} \quad (2.29)$$

ค่าเกจแฟคเตอร์นี้ในแต่ละวัสดุมีค่าไม่เท่ากันซึ่งค่าของเกจแฟคเตอร์นี้จะเป็นตัวแปรที่จะบอกถึงความไวของเกจ เช่น ถ้าเกจแฟคเตอร์มีค่าสูงหมายถึง เกจนั้นมีความไวในการเปลี่ยนแปลงสูงเป็นต้น

2.5 วงจรวิทสโตนบริดจ์[15]

วงจรวิทสโตนบริดจ์ (Wheatstone Bridge circuit) จะถูกนำมาใช้กับทรานสดิวเซอร์ความดันเพื่อใช้ในการแปรค่าจากความดันไปสู่สัญญาณแรงดันไฟฟ้าซึ่งจะทำให้สามารถทราบถึง ปริมาณความดันที่เปลี่ยนแปลงไปโดยพิจารณาได้จากปริมาณแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น วงจรวิทสโตนบริดจ์ชนิดพาสซีฟเป็นวงจรที่ประกอบด้วยตัวต้านทาน 4 ตัวต่อกันเป็นรูปดังรูปที่ 2.19 ซึ่งเมื่อวงจรบริดจ์อยู่ในสภาวะสมดุลแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต V_o จะมีค่าเท่ากับ 0 โวลต์ และจะทำให้อัตราส่วนค่าความต้านทานดังสมการที่ 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) ซึ่งเซนเซอร์ที่ดีนั้นควรจะต้องมีความไวสูงและคงที่นั่นหมายความว่าเซนเซอร์นั้นจะมีการตอบสนองต่ออินพุตที่ทำการกระทำ ความไวในการตอบสนองจะเป็นอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงสัญญาณเอาต์พุตที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสัญญาณทางอินพุต เมื่อให้ y เป็นเอาต์พุตที่มีความสัมพันธ์กับ x ซึ่งเป็นเอาต์พุตโดยเป็นไปตามฟังก์ชัน $y = f(x)$ ดังนั้นสมการความไว S ที่จุด x_a ใดๆจะสามารถเขียนได้ ดังนี้

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

สำหรับทรานสดิวเซอร์ความดันนั้น ความไวในการตอบสนองต่อความดันสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.33 ซึ่งเป็นอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุตต่อการเปลี่ยนแปลงความดันที่มีต่อแรงดันคงที่ของวงจรวิสโตนบริดจ์

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

S คือ ความไวของอุปกรณ์ตรวจจับความดัน

ΔV คือ การเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตของวงจรวิสโตนบริดจ์

ΔP คือ การเปลี่ยนแปลงความดัน

V_i คือ แหล่งจ่ายแรงดันคงที่ ของวงจรวิสโตนบริดจ์

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

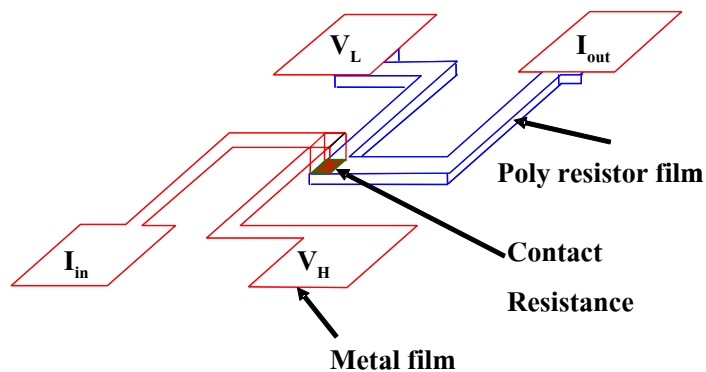
$$R_c = \frac{V_H - V_L}{I_{in}} \quad (2.34)$$

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 ค่าคงที่ของโบลทซ์มันน์

จะเห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิ ค่าความต้านทานลดลงเป็นเอ็กซ์โพเนนเชียล ซึ่งในกรณีการนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจจับความดันจะควบคุมอุณหภูมิได้ยาก

แต่ในกรณีของโลหะหรือสารกึ่งตัวนำที่มีการเจือสารที่สูงมากมีความสัมพันธ์ดังสมการ 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 $3.9 \times 10^{-4} / \text{K}$ และมีค่า β_T เท่ากับ $-5.9 \times 10^{-7} / \text{K}^2$ ดังนั้นจะเห็นว่าในกรณีของโลหะจะมีค่าความต้านทานที่สูงขึ้น เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิ และมีค่าความสัมพัทธ์ในลักษณะเชิงเส้น

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