

บทที่ 2

ทฤษฎี

ในบทนี้จะกล่าวถึงวัสดุซิลิคอน ชนิดของผลึกซิลิคอน ได้แก่ ซิลิคอนบริสุทธิ์ ซิลิคอนเจือปน การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น 3 แบบ ได้แก่ การนำความร้อน การพาความร้อน การแผ่รังสี ระบบกลไฟฟ้าจุลภาคนั้นเป็นการรวมคุณสมบัติทางกลกับทางไฟฟ้าเข้าด้วยกันแล้วทำให้มีขนาดเล็ก การกัตซิลิคอนในสารละลายแบบแอนไอโซทรอปิก เพื่อให้ได้ไดอะแฟรมของซิลิคอน

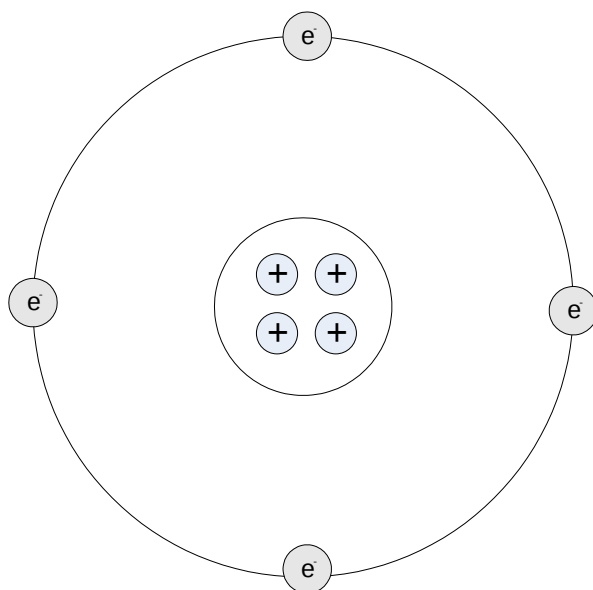
2.1 วัสดุซิลิคอน

2.1.1 โครงสร้างของผลึกซิลิคอน[1]

ซิลิคอนเป็นสารกึ่งตัวนำที่ประกอบขึ้นจากอะตอมของธาตุซิลิคอนหลายๆ เมื่อพิจารณาอะตอมซิลิคอน มีโครงสร้างภายในประกอบด้วยส่วนที่เป็น นิวเคลียส และมีอิเล็กตรอนวงโคจรรอบๆ ที่นิวเคลียสประกอบด้วยโปรตรอน 14 ตัว แต่ละตัวมีประจุไฟฟ้าบวก อิเล็กตรอนทั้งหมด 14 ตัว มีประจุเป็นลบ ดังนั้นภายในอะตอมซิลิคอนจึงอยู่ในสภาวะเป็นกลางทางไฟฟ้า คือ ไม่แสดงสมบัติทางไฟฟ้า โดยอิเล็กตรอนซึ่งโคจรรอบนิวเคลียสนอกสุดนี้ เรียกว่า วาเลนซ์อิเล็กตรอน สำหรับซิลิคอนมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 4 ตัว และวงโคจรชั้นนอกสุด เรียกว่า วาเลนซ์ ซึ่งวงโคจรอยู่ในวงจรรชั้นใน ซึ่งอยู่ใกล้กับนิวเคลียสจะถูกนิวเคลียสดึงดูดเอาไว้จนไม่สามารถแสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้า และเนื่องจากวาเลนซ์อิเล็กตรอนโคจรรอบนอกสุดจึงถูกนิวเคลียสดึงดูดไว้ ซึ่งไม่มากนัก มีโอกาสที่จะหลุดออกไปจากอะตอมและเป็นอิสระได้ ถ้าหากได้รับแรงหรือพลังงานจากภายนอกและเมื่อไรก็ตามที่อะตอมสูญเสียวาเลนซ์อิเล็กตรอนไปจะทำให้ โปรตรอน และอิเล็กตรอนในอะตอมไม่เท่ากัน มีผลทำให้อะตอมเริ่มมีสมบัติทางไฟฟ้า ซึ่งขาดอิเล็กตรอนไป เรียกว่าอะตอมถูกไอออนไนซ์ และอะตอมนี้ถูกเรียกว่า เป็น ไอออนบวก ส่วนอะตอมใดได้รับอิเล็กตรอนมาเพิ่ม เรียกว่าอะตอมนั้นถูกไอออนไนซ์ แต่ละอะตอมจะเรียกว่า ไอออนลบ

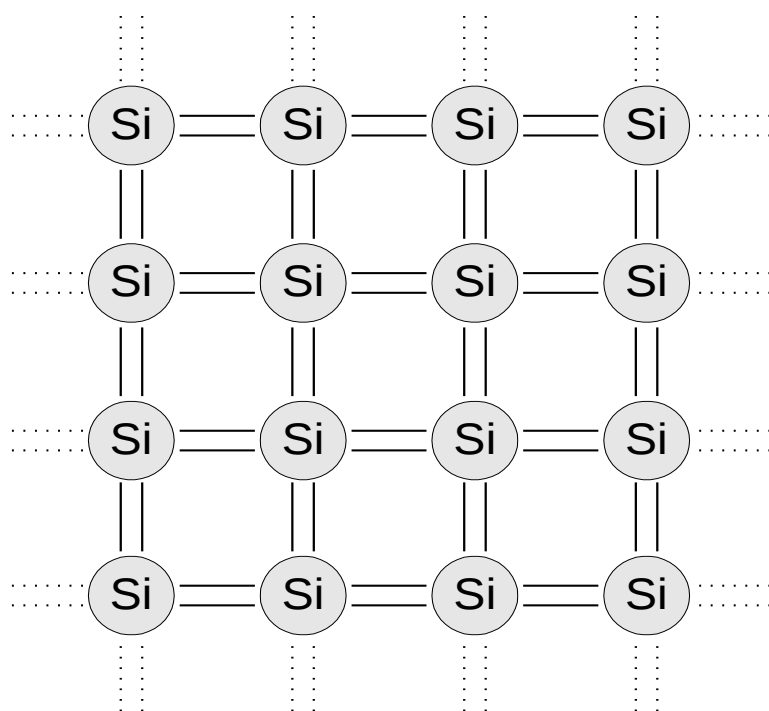
เมื่ออะตอมดังกล่าวจะมีการยึดเกาะเกี่ยวซึ่งกันและกันเพื่อความมั่นคงของอะตอม การเกาะเกี่ยวกันระหว่างอะตอมซิลิคอนเหล่านี้เรียกว่า พันธะ (bond) กลไกในการเกาะเกี่ยวหรือการเกิดพันธะนี้มีอยู่หลายชนิดด้วยกัน แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะพันธะที่เกิดขึ้นในผลึกซิลิคอนเท่านั้น

ในผลึกซิลิคอนเมื่ออะตอมของซิลิคอนเข้ามาอยู่ใกล้ชิดกันจะทำให้วงโคจรชั้นนอกสุดของแต่ละอะตอมซิลิคอนซึ่งประกอบด้วยอิเล็กตรอนวงนอกสุด (valence electron) อยู่ถึง 4 ตัว ดังแสดงในภาพที่ 2.1



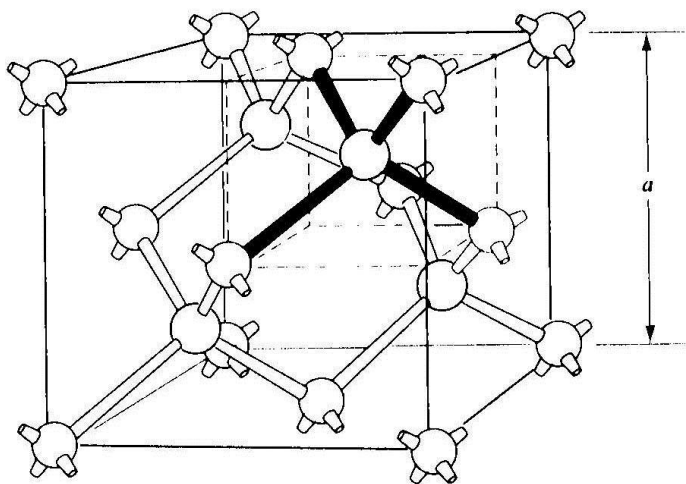
ภาพที่ 2.1 แสดงโครงสร้างเหมือนอะตอมซิลิคอน

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



ภาพที่ 2.2 แสดงแบบจำลองพันธะโควาเลนต์ระหว่างอะตอมซิลิคอน

จากภาพข้างต้นจะเป็นโครงสร้างของผลึกซิลิคอนบริสุทธิ์ในสองมิติ โดยอะตอมจะมีการใช้อิเล็กตรอนวงนอกสุดทั้ง 4 ร่วมกันกับอิเล็กตรอนนี้เองทำให้อะตอมข้างเคียง 4 อะตอม เกิดพันธะโควาเลนต์ขึ้น 4 พันธะด้วยกัน การใช้อิเล็กตรอนร่วมกันนี้เองทำให้อะตอมของซิลิคอนต่างๆ มีความมั่นคง และสามารถประกอบรวมกันเป็นโครงสร้างของผลึกซิลิคอน ดังแสดงในภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 แสดงโครงสร้างของผลึกซิลิคอน

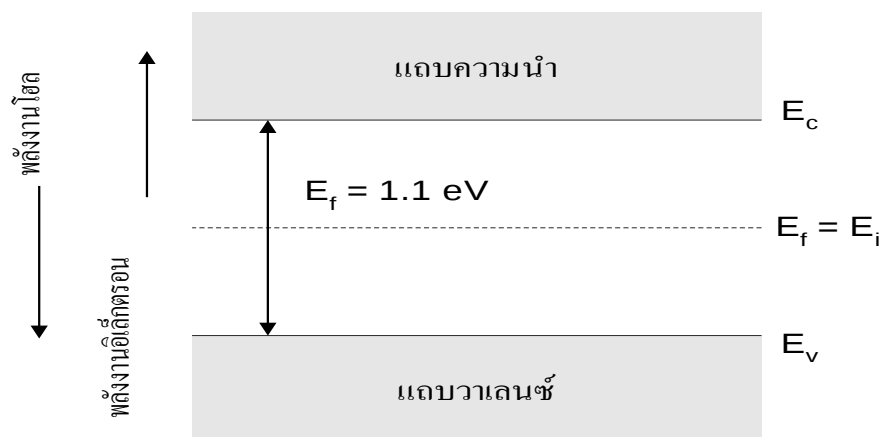
2.1.1 ชนิดของผลึกซิลิคอน

ผลึกสารกึ่งตัวนำซิลิคอนนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็นสองชนิดใหญ่ๆ ได้คือ ซิลิคอนบริสุทธิ์ และซิลิคอนเจือปน

2.1.1.1 ซิลิคอนบริสุทธิ์ (Intrinsic Silicon)

ผลึกซิลิคอนซึ่งไม่ได้ถูกเติมหรือเจือปนด้วยอะตอมสารเจือของธาตุอื่น จะมีลักษณะแถบพลังงานดังแสดงในภาพที่ 2.4

จากภาพเป็นลักษณะโครงสร้างพลังงานของซิลิคอนบริสุทธิ์ ซึ่งประกอบไปด้วยแถบวาเลนซ์ แถบความนำและแถบพลังงานต้องห้ามโดยระดับพลังงานซึ่งแสดงเป็นเส้นประที่อยูระหว่างกึ่งกลางแถบวาเลนซ์และแถบความนำ คือระดับพลังงานเฟอร์มิ สำหรับสารกึ่งตัวนำซิลิคอนบริสุทธิ์



ภาพที่ 2.4 แสดงลักษณะโครงสร้างพลังงานของผลึกซิลิคอนบริสุทธ์

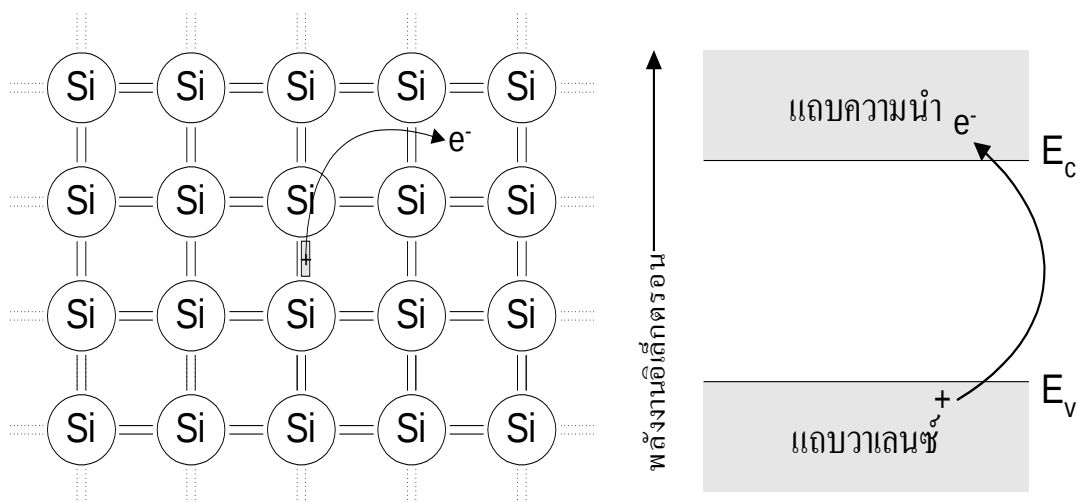
ระดับพลังงานนี้จะถูกเรียกว่าเป็นระดับพลังงานอินทรินซิก และเมื่อทำการพิจารณาแถบพลังงานของซิลิคอนบริสุทธ์ การที่พันธะโควาเลนซ์ถูกแตกออกเนื่องจากการกระตุ้นด้วยพลังงานภายนอก นั่นก็คือการที่อิเล็กตรอนภายในแถบวาเลนซ์ ได้รับพลังงานจากภายนอกเพิ่มขึ้นมากพอที่จะเปลี่ยนแปลงไปอยู่ที่ในระดับพลังงานในแถบความนำ และจะทำให้เกิดที่ว่าง (โฮล) ขึ้นที่แถบวาเลนซ์ ดังแสดงในภาพที่ 2.5 โดยสภาพความนำไฟฟ้าของซิลิคอนบริสุทธ์จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับจำนวนของอิเล็กตรอนในแถบความนำและโฮลในแถบวาเลนซ์นี้ ซึ่งการเกิดประจุพาหะในซิลิคอนบริสุทธ์จะเกิดได้เฉพาะในกรณีนี้เท่านั้น และจำนวนอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดขึ้นในแถบความนำ จะมีจำนวนเท่ากับจำนวนของโฮลที่เกิดขึ้นในแถบวาเลนซ์สามารถเขียนสมการได้เป็น

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

โดยที่ n = ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ

p = ความหนาแน่นของโฮล

n_i = ความหนาแน่นอินทรินซิก



ภาพที่ 2.5 แสดงการเกิดอิเล็กตรอนอิสระและโฮลภายในโครงสร้างแถบพลังงาน

2.1.1.2 ซิลิคอนเจือปน (Extrinsic Silicon)

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

สำหรับอะตอมของธาตุที่นำมาใช้เป็นสารเจือปน (impurity) เติมลงไปในผลึกซิลิคอนบริสุทธิ์นั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. อะตอมธาตุเจือปนชนิดเอ็น (n-type impurity atom)

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

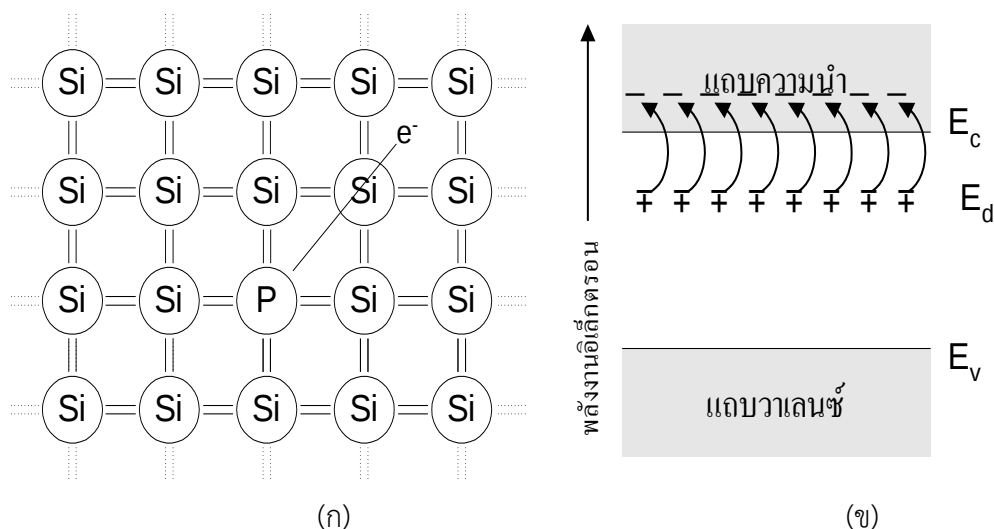
2. อะตอมธาตุเจือชนิดพี (p-type impurity atom)

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

ส่วนซิลิคอนเจือปนที่ได้หลังจากการเติมอะตอมสารเจือแล้วสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. ผลิตซิลิคอนชนิดเอ็น (n-type silicon)

ได้แก่ผลิตซิลิคอนที่ถูกเติมด้วยอะตอมสารเจือชนิดเอ็น หรืออะตอมผู้ให้ เช่น อะตอมของ ฟอสฟอรัสซึ่งเป็นธาตุในหมู่ที่ 5 ดังนั้นจึงมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัวเมื่ออะตอมถูกเติมเข้าไปในผลึกซิลิคอนก็จะไปเกาะเกี่ยวกับอะตอมข้างเคียงอีก 4 อะตอม ซึ่งอยู่รอบๆ เกิดเป็นพันธะโควาเลนซ์ขึ้น 4 พันธะ ดังนั้นจึงเหลือวาเลนซ์อิเล็กตรอนอีก 1 ตัว ซึ่งไม่มีพันธะจับอยู่ อิเล็กตรอนดังกล่าวนี้จะอยู่ในอิทธิพลของนิวเคลียสด้วยแรงยึดเหนี่ยวเพียงเล็กน้อยเกือบจะเป็นอิสระ ดังนั้นที่อุณหภูมิห้องปกติพลังงานจากความร้อนก็สามารถทำให้อิเล็กตรอนดังกล่าวได้รับพลังงานและหลุดออกมาเป็นอิสระได้ เคลื่อนที่ไปมาได้อย่างเสรีกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระอยู่ในแถบความนำ และสามารถนำไฟฟ้าได้ ในสภาพเช่นนี้ปรากฏการณ์พันธะแตกเนื่องจากพลังงานความร้อนก็จะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในพันธะโควาเลนซ์หลุดมาเป็นอิสระได้เช่นกัน และทิ้งให้เกิดโฮล ซึ่งเป็นประจุไฟฟ้าชนิดบวกเกิดขึ้นในแถบวาเลนซ์ แต่ปริมาณโฮล และอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นเนื่องจากพันธะแตกนี้จะมีจำนวนน้อย ดังนั้นในผลึกซิลิคอนชนิดนี้จึงมีปริมาณของประจุพาหะอิเล็กตรอนที่มากกว่าโฮล ทำให้ผลึกซิลิคอนชนิดนี้จึงนำไฟฟ้าได้ด้วยประจุพาหะชนิดลบ (Negative charge) ดังนั้นเราจึงเรียกผลึกซิลิคอนชนิดนี้ว่าผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น (n : ย่อมาจาก negative) การเกิดอิเล็กตรอนอิสระเนื่องจากอะตอมสารเจือผู้ให้ และลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น แสดงได้ดังในภาพที่ 2.6 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

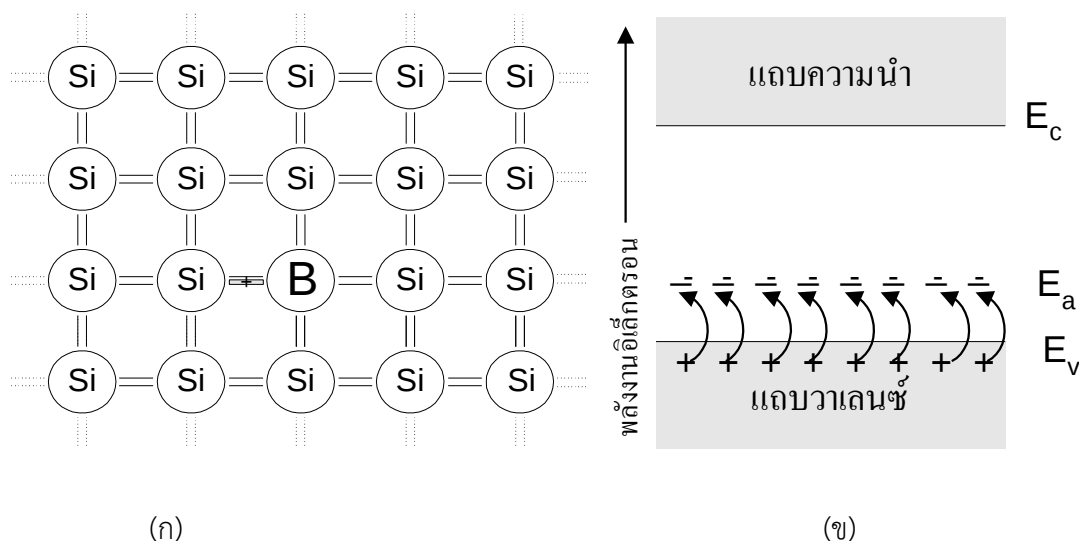


ภาพที่ 2.6 แสดงการเกิดอิเล็กตรอนอิสระและโฮลภายในโครงสร้างแถบพลังงานชนิดเอ็น

2. ผลิตซิลิคอนชนิดพี (p-type silicon)

ได้แก่ผลิตซิลิคอนที่ถูกเติมด้วยอะตอมสารเจือชนิดพี หรือที่เรียกว่า อะตอมผู้รับ เช่น อะตอมของโบรอน ซึ่งเป็นธาตุในหมู่ที่ 3 ดังนั้นจึงมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเพียง 3 ตัว เมื่ออะตอมสารเจือผู้รับถูกเติมเข้าไปในผลึกซิลิคอนก็จะไปเกาะเกี่ยวกับอะตอมของผลึกซิลิคอนที่อยู่ข้างเคียงอีก 4 อะตอม แต่อะตอมสารเจือชนิดนี้จะมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว ดังนั้นจึงสามารถเกาะเกี่ยวและเกิดเป็นพันธะโควาเลนซ์ได้เพียง 3 ตัวพันธะเท่านั้น ส่วนอีกหนึ่งพันธะไม่มีความสมบูรณ์เนื่องจากขาด

อิเล็กตรอน ดังนั้นจึงทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในพันธะโควาเลนต์ซี่ใกล้ๆ มีโอกาสที่จะเข้าไปอยู่ในที่ดังกล่าวเพื่อทำให้เป็นพันธะที่สมบูรณ์ เมื่ออิเล็กตรอนหลุดออกไปจากพันธะโควาเลนต์ก็จะทิ้งให้เกิดโฮลขึ้นมา โฮลซึ่งเป็นประจุพาหะชนิดบวกสามารถนำไฟฟ้าได้ อะตอมของสารเจือชนิดนี้ เมื่อได้อิเล็กตรอนเพิ่มเข้ามาก็จะเปลี่ยนสภาพไปเป็นไอออนลบ และขณะเดียวกันอิเล็กตรอนและโฮลจำนวนเล็กน้อยที่สามารถเกิดขึ้นได้เช่นกัน เนื่องจากพลังงานจากความร้อนซึ่งทำให้พันธะแตกออก ดังนั้นในผลึกซิลิคอนชนิดพีจึงมีปริมาณของประจุพาหะโฮลมากกว่าจำนวนของอิเล็กตรอน และสามารถนำไฟฟ้าได้ด้วยประจุพาหะชนิดบวก (positive charge) เราจึงเรียกผลึกซิลิคอนชนิดนี้ว่า ผลึกซิลิคอนชนิดพี (p : ย่อมาจาก positive) การเกิดโฮลเนื่องจากอะตอมสารเจือผู้รับและลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิคอนชนิดพีแสดงได้ดังในภาพที่ 2.7 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



ภาพที่ 2.7 แสดงการเกิดอิเล็กตรอนอิสระและโฮลภายในโครงสร้างแถบพลังงานชนิดพี

2.2 การถ่ายเทความร้อน(Heat transfer)[2]

ในทางเทอร์โมไดนามิกส์(thermodynamic) ลักษณะของพลังงานนั้นจะระบุสถานะของระบบ โดยเป็นที่ทราบกันดีว่าพลังงานจะสร้างขึ้นใหม่หรือทำลายไม่ได้ เพียงแต่มีความสามารถเปลี่ยนจากภาพหนึ่งไปเป็นอีกภาพหนึ่งได้ ดังนั้นความรู้ทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่เกี่ยวข้องสัมพันธ์ระหว่างความร้อนและภาพอื่นๆ ของพลังงาน แต่ความรู้เกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์หาอัตราการถ่ายความร้อนที่เกิดขึ้นในระบบ การถ่ายเทพลังงานในแง่ของความร้อนนั้นไม่สามารถที่จะวัดได้โดยตรง แต่สามารถพิจารณาได้จากวิธีการทางฟิสิกส์เพราะว่าความร้อนเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สามารถวัดได้โดยการสังเกต พบว่าเมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิขึ้นในระบบแล้วจะมีการไหลของความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า เนื่องจากการไหลของ

ความร้อนจากบริเวณเกิดขึ้นได้เมื่อใดก็ตามที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิในระบบ ดังนั้นความรู้เกี่ยวกับการกระจายของอุณหภูมิในระบบจึงจำเป็นมาก ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและถ้าทราบการกระจายตัวของอุณหภูมิ ทำให้สามารถหาฟลักซ์ความร้อน(heat flux) ซึ่งเป็นค่าของปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อหนึ่งหน่วยเวลาได้จากกฎหรือสมการซึ่งเกี่ยวข้องระหว่างฟลักซ์ความร้อนกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

ปัญหาในการหาค่าการกระจายของอุณหภูมิและการไหลของความร้อนเป็นสิ่งที่น่าสนใจในสาขาต่างๆ ทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เช่น หม้อน้ำ (boilers) คอนเดนเซอร์ (condensor) และโดยเฉพาะอย่างยิ่งในทางด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเมื่อชิปทำงานจะทำให้เกิดความร้อนทำให้ต้องออกแบบชิปให้สามารถระบายความร้อนได้ดี ในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนจึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับกำหนดขนาดของอุปกรณ์นั้นๆ

การถ่ายเทความร้อนคือ การเคลื่อนที่ของความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า สามารถแยกพิจารณาได้เป็น 3 แบบ

- การนำ (conduction)
- การพา (convection)
- การแผ่รังสี (radiation)

การกระจายของอุณหภูมิในตัวกลางหนึ่งจะถูกควบคุมโดยอิทธิพลรวมของการถ่ายเทความร้อนทั้งสามแบบตามที่กล่าวมาแต่ตามความเป็นจริงนั้นไม่สามารถจะแยกแบบหนึ่งแบบใดได้โดยสิ้นเชิงจาก 3 แบบ อย่างไรก็ตามเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์จะแยกพิจารณาเป็นแบบใดแบบหนึ่งได้

2.2.1 การนำความร้อน (conduction)

การนำความร้อน เป็นภาพหนึ่งของการถ่ายความร้อน ในลักษณะของการแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังมีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยเคลื่อนที่แบบจลน์ (kinetic motion) หรือเป็นการชนกันโดยตรงของโมเลกุลซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นในการไหลที่หยุดนิ่ง ส่วนในกรณีของโลหะนั้นจะมีการไหลของกระแสอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นมา สำหรับของแข็งที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีจะมีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระมากมายเคลื่อนไหวอยู่ภายในโครงสร้างของโมเลกุล (Lattice) ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าวัตถุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีจะเป็นตัวนำความร้อนที่ดีตามไปด้วย ยกตัวอย่างเช่น ทองแดง เงิน เหล็ก เป็นต้น อันเป็นผลจากการนำหรือถ่ายเทพลังงานความร้อนโดยอิเล็กตรอนเหล่านี้

จากกฎสหสัมพันธ์ของการนำความร้อนโดยถือเกณฑ์จากการสังเกตจากผลการทดลอง โดยกำเนิดจากบิโธต์ (Biot) แต่ต่อมานักฟิสิกส์-คณิตศาสตร์ชาวฝรั่งเศส ชื่อ โจเซฟ ฟูริเยร์ (Joseph Fourier) นำหลักการนี้มาใช้วิเคราะห์เป็นทฤษฎีความร้อน กฎนี้กล่าวว่า อัตราการไหลของความร้อนและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในทิศทางนั้น สำหรับการไหลของความร้อนในทิศทาง x กฎของฟูริเยร์กำหนดเป็น

$$Q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.2)$$

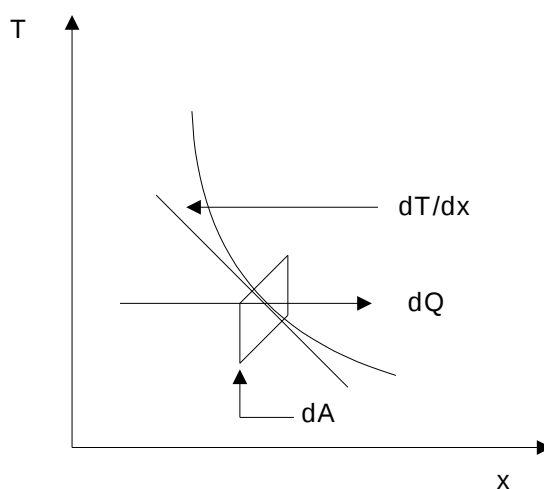
Q_x คือ อัตราการนำความร้อนผ่านพื้นที่ A ในทิศทางบวก x

k คือ ค่าสภาพการนำความร้อนของวัตถุ (thermal conductivity of material)

A คือ พื้นที่ที่ความร้อนเคลื่อนผ่านและตั้งฉากกับทิศทางของ x

dT/dx คือ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับระยะทาง

จากสมการที่ (2.2) เครื่องหมายลบแสดงว่าแสดงว่าความร้อนที่ไปในทิศทางที่อุณหภูมิที่ลดลงแสดงดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 แสดงการนำความร้อนผ่านของแข็งที่มีพื้นที่ A

สมการของฟูริเยร์อาจเขียนอยู่ในภาพของอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

$$q_x = \frac{Q_x}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.3)$$

สมการ $Q_x = -k(dT/dx)$ แสดงว่า ความร้อนเคลื่อนที่ในทิศทางของ x โดยที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงในทิศทางของ x เท่านั้น โดยทั่วไปแล้ว อุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงทั้งสามทิศทางคือ เปลี่ยนแปลงในทิศทาง x , y และ z ตามลำดับ ดังนั้นการเคลื่อนที่ของความร้อนจึงเกิดขึ้นทั้งสามทิศ โดยการสมมติว่าตัวกลางที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน มีค่านำความร้อน (k) คงที่ อัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งสามทิศทางสามารถหาได้จากสมการของฟูริเยร์ดังนี้

$$q_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.4)$$

$$q_y = -k \frac{dT}{dy} \quad (2.5)$$

$$q_z = -k \frac{dT}{dz} \quad (2.6)$$

หรือสามารถเขียนให้อยู่ในภาพทั่วๆ ไป

$$q = -k \nabla T \quad (2.7)$$

∇ คือ 3-d grad operator

ในการวิเคราะห์การนำความร้อนก็เพื่อที่จะหาสนามของอุณหภูมิ (temperature field) ในตัวกลางหนึ่งซึ่งเป็นผลจากเงื่อนไขซึ่งสอดคล้องกับขอบเขตสนามของอุณหภูมินั้นคือต้องทราบการกระจายของอุณหภูมิ (temperature distribution) เมื่อทราบค่านี้ก็จะสามารถหาฟลักซ์ความร้อนที่จุดใดๆ ในตัวกลางนั้นได้ จากกฎของฟูริเยร์ (Fourier's law) การหาค่านี้ทำโดยการใช้กฎพลังงาน (energy conservation) กับปริมาตรควบคุมดิฟเฟอเรนเชียล (differential) ซึ่งระบุกระบวนการถ่ายเทพลังงาน และใช้สมการอัตราที่เหมาะสม ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นสมการดิฟเฟอเรนเชียลซึ่งคำตอบของมันจะให้การกระจายอุณหภูมิในตัวกลางหรือวัตถุนั้น ส่วนการพิจารณาตัวกลางเนื้อเดียวกันซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและการกระจายตัวของอุณหภูมิ $T(x,y,z)$ กำหนดในพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinates) โดยกำหนดปริมาตรควบคุมเล็กๆ มากๆ $dx dy dz$ ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแล้วการนำความร้อนก็จะเกิดขึ้นข้ามแต่ละอันของผิวควบคุม อัตราการนำความร้อนนี้จะตั้งฉากกับผิวควบคุมแต่ละอันที่ตำแหน่งโคออร์ดิเนต x, y, z จากกฎทรงพลังงาน อัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานของปริมาตร เท่ากับผลรวมของอัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงาน

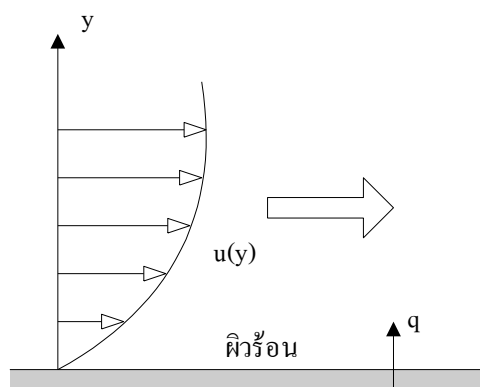
$$\left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \frac{q_g}{k} = c_p \rho \left[\frac{\partial T}{\partial t} \right] \quad (2.8)$$

สมการนี้เรียกว่า ฟูริเยร์ฟิลด์อีควเอชัน (Fourier field equation) และ q_g คือ อัตราการเกิดความร้อนภายใน

2.2.2 การพาความร้อน (Convection)

เมื่อของไหลไหลผ่านวัตถุที่เป็นของแข็งหรือไหลผ่านภายในช่องทางการไหล โดยที่อุณหภูมิของของไหลและผิวของของแข็งมีค่าแตกต่างกัน การถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลและผิวของของแข็งจะเกิดขึ้นเมื่อของไหลเคลื่อนที่สัมผัสกับผิวของของแข็ง กลไกของการถ่ายเทความร้อน

แบบนี้เรียกว่า “การพาความร้อน” ถ้าการเคลื่อนที่ของของไหลเกิดขึ้นโดยการทำขึ้นเองโดยใช้ปัมหรือพัดลมทำให้เกิดแรง (forced convection) ถ้าการเคลื่อนที่ของของไหลมีผลกระทบ ซึ่งมีผลจากความแตกต่างของความหนาแน่นที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิภายในของไหล การถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า การพาความร้อนแบบอิสระ หรือการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (free or natural convection) เช่น ปล่อยแผ่นวัตถุร้อนที่วางอยู่ในแนวดิ่งไว้ในอากาศเย็นที่หยุดนิ่ง ชั้นของอากาศที่ติดกับพื้นผิวของวัตถุจะมีการเคลื่อนที่เพราะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในอากาศเป็นผลทำให้การเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้อากาศเกิดการเคลื่อนที่ โดยการเคลื่อนที่ของของไหลมีผลกระทบต่อสนามของอุณหภูมิภายในของไหล การคำนวณหาการกระจายของอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนแบบการพาในทางปฏิบัติเป็นเรื่องที่สลับซับซ้อนมากในทางวิศวกรรมศาสตร์ เพื่อให้การคำนวณหาการถ่ายเทความร้อนง่ายขึ้นระหว่างผิวที่ร้อน T_w และอุณหภูมิของของไหลเย็นที่ไหลผ่านบนผิวที่อุณหภูมิ T_f ตามที่แสดงในภาพ 2.9 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) จากกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of Cooling) ถูกกำหนดเป็น



ภาพที่ 2.9 แสดงการพาความร้อนจากผิววัสดุ

$$q = h[T_w - T_f] \quad (2.9)$$

โดยที่ q เป็นฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทจากผนังร้อนไปยังของไหลที่เย็นกว่า (W/m^2) ถ้าการถ่ายเทความร้อนเกิดของไหลที่ร้อนไปยังผนังที่เย็น จะได้ว่า

$$q = h[T_f - T_w] \quad (2.10)$$

โดยที่ q เป็นฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทจากของไหลที่ร้อนไปที่เย็น

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h (Convective heat transfer coefficient) จะมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามชนิดของการไหล ภาพทรงของวัตถุ พื้นที่ของการไหลผ่าน คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของของไหล

อุณหภูมิเฉลี่ย และตำแหน่งต่างๆ ตามพื้นผิวของวัตถุ นอกจากนี้ยังขึ้นกับกลไกของการถ่ายเทความร้อนว่าเป็นพาความร้อนแบบบังคับหรือการพาความร้อนแบบธรรมชาติ

2.2.3 การแผ่รังสี(radiation)

การแผ่รังสีความร้อน คือพลังงานที่ถูกส่งออกไปโดยสารซึ่งอยู่ที่อุณหภูมิจำกัดแน่นอน ถึงแม้ว่าจะเน้นการแผ่รังสีจากผิวของวัตถุซึ่งก็ตาม การส่งออกของรังสีอาจเกิดขึ้นได้จากของเหลวและก๊าซ ดังนั้นโดยไม่คำนึงถึงภาพแบบของสาร การแผ่รังสีออกของรังสีเชื่อว่าเป็นการเปลี่ยนการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนขององค์ประกอบของอะตอมหรือโมเลกุล พลังงานของสนามการแผ่รังสีนั้นจะถูกนำออกไปโดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือเรียกว่าโฟตอน ในขณะที่การถ่ายเทพลังงานโดยการนำหรือการพาต้องการวัตถุตัวกลาง แต่การแผ่รังสีไม่ต้องการตัวกลาง ในความเป็นจริง การถ่ายโดยการแผ่รังสีเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดในสุญญากาศ

ค่าฟลักซ์ความร้อนสูงสุดที่ซึ่งการแผ่รังสีถูกส่งออกไปได้จากพื้นผิวหนึ่งกำหนดโดยกฎของสตีเฟน-โบลซ์แมน (Stefan-Boltzmann Law)

$$q = \sigma T_s^4 \quad (2.11)$$

โดยที่ T_s คือ ค่าอุณหภูมิสัมพัทธ์ (K) ของผิว

σ คือ ค่าคงที่ของสตีเฟน-โบลซ์แมน $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}$

โดยที่ผิวนั้นจะเรียกว่า ตัวแผ่รังสีอุดมคติหรือวัตถุดำ (blackbody) ฟลักซ์ความร้อนซึ่งถูกส่งออกไปโดยผิวจริงจะน้อยกว่าที่ส่งออกจากตัวแผ่รังสีอุดมคติ (ideal radiator) ได้เป็น

$$q = \epsilon \sigma T_s^4 \quad (2.12)$$

โดยที่ ϵ เป็นคุณสมบัติการแผ่รังสีของผิว เรียกว่า สัมประสิทธิ์การแผ่รังสี(Emissivity)

2.3 ระบบกลไฟฟ้าจุลภาค

เทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (MicroElectroMechanical Systems : MEMS) ซึ่งเป็นชื่อเรียกในแถบอเมริกาเหนือ โดยเฉพาะในประเทศสหรัฐอเมริกา แต่ในส่วนอื่นๆ ของโลกก็มีการเรียกชื่อที่แตกต่างกันไป เช่นในประเทศแถบยุโรปจะเรียกว่า เทคโนโลยีระบบจุลภาค (Microsystem Technology : MST) หรือในประเทศญี่ปุ่นจะเรียกว่า กลไกจุลภาค (Micromachines) แต่ทั้งหมดก็มีความหมายถึงสิ่งเดียวกัน คือ เป็นอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กและสร้างเทคนิคของการสร้างขนาดเล็ก (Microfabrication) เพราะว่าเทคโนโลยีการผลิตมีลักษณะคล้ายกับการผลิตวงจรรวม ทำให้ผลิตได้ปริมาณมาก และราคาถูก[3.4]

MEMS ย่อมาจาก Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) กล่าวคือการรวมคุณสมบัติทางกลกับทางไฟฟ้าเข้าด้วยกันแล้วทำให้มีขนาดเล็ก ดังนั้นความหมายที่ได้ “MEMS” คือ ประดิษฐ์กรรมขนาดไมโครมิเตอร์ซึ่งรวมส่วนประกอบของระบบไฟฟ้าและเครื่องกลเข้าด้วยกัน ระบบกลไฟฟ้าจุลภาคสร้างโดยอาศัยเทคโนโลยีการผลิตวงจรทรานซิสเตอร์ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ไมโครมิเตอร์ถึงมิลลิเมตร ระบบดังกล่าวนี้สามารถตรวจวัด, ควบคุมและกระตุ้นในระดับต่ำและสามารถทำงานทั้งในแบบอิสระหรือแบบขบวนเพื่อให้มีผลในระดับสูงขึ้น นอกนี้กล่าวถึงภาพรวมของเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาคและการนำไปใช้ประโยชน์โดยเน้นการใช้ประโยชน์ทางด้านแสงการใช้ประโยชน์ของระบบนี้สามารถใช้ได้ในหลายสาขา อาทิ เทคโนโลยียนตรกรรม เทคโนโลยีการแพทย์ชีวภาพเทคโนโลยีระบบสื่อสาร ระบบหุ่นยนต์ ระบบอากาศยาน เป็นต้น

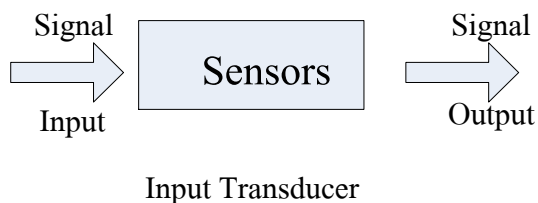
ความแตกต่างระหว่างระบบกลไฟฟ้าจุลภาค(MEMS) และวงจรรวม(IC) โดยที่เทคโนโลยีทั้งสองแบบสามารถใช้วิธีการประดิษฐ์โดยทั่วไปร่วมกันได้ แต่ก็มี ความแตกต่างกันในเรื่องของการออกแบบ(design) และการบรรจุ(packaging) หลายประการดังต่อไปนี้

1. วงจรรวมจะใช้เพียงผลึกสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิคอน หรือสารประกอบกึ่งตัวนำ แต่ MEMS นั้นนอกจากจะใช้ซิลิคอนเป็นฐานรองแล้วยังสามารถใช้วัสดุชนิดอื่น เช่น โพลีเมอร์ วัสดุโลหะ
2. MEMS จะถูกออกแบบให้ทำหน้าที่ต่างๆ มากกว่าวงจรรวม ซึ่งจะถูกรออกแบบมาให้ทำหน้าที่เกี่ยวกับวงจรไฟฟ้าเท่านั้น
3. MEMS ประกอบด้วยชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ เช่น ไมโครวาล์ว(microvalves) ไมโครปั๊ม เป็นต้น แต่สำหรับวงจรรวมนั้นจะไม่ส่วนที่มีการเคลื่อนที่
4. วงจรรวมจะถูกร่างอยู่บนพื้นผิวของซิลิคอนที่ใช้เป็นฐานรอง ในขณะที่ MEMS มีโครงสร้าง 3 มิติ ที่ซับซ้อน ต้องใช้ความรู้ทางด้านวิศวกรรมเชิงกล
5. ในการบรรจุ นั้นวงจรรวมจะแยกออกตัวออกจากสิ่งแวดล้อม แต่ส่วนของ MEMS บางส่วนจะต้องสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมเพื่อเป็นตัวกลางในการทำงาน ดังนั้นการบรรจุจึงซับซ้อนกว่าการบรรจุของวงจรรวม

เทคโนโลยี MEMS แบ่งได้เป็น 2 ประเภท

1. เซนเซอร์ขนาดจุลภาค หรือ ไมโครเซนเซอร์ (Microsensors)
2. ตัวกระตุ้นขนาดจุลภาค (Microactuators)

ไมโครเซนเซอร์ (Microsensors)



ภาพที่ 2.10 แสดงหลักการทำงานของเซนเซอร์

ไมโครเซนเซอร์จะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานอื่นๆ ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยทั่วไปแล้ว ไมโครเซนเซอร์จะถูกสร้างเพื่อตรวจจับปริมาณพลังงานอื่นๆ ที่ไม่ใช่พลังงานไฟฟ้า เช่น ไมโครไบโอเซนเซอร์ (microbio sensors), ไมโครเซนเซอร์ทางเคมี (microchemacl sensors), ไมโครเซนเซอร์ทางความร้อน (microthermal sensor), ไมโครเซนเซอร์แรงดันแรงดัน (micropressure sensor) เป็นต้น

ตัวกระตุ้นขนาดจุลภาค (Microactuators)

เป็นการทำงานของ MEMS อีกภาพแบบหนึ่งที่มีหลักการทำงานตรงกันข้ามกับไมโครเซนเซอร์ โดยทั่วไปแล้วจะทำงานควบคู่กับไมโครเซนเซอร์ เช่น วัสดุที่มีคุณสมบัติเป็น ไมโครแอคทูเอเตอร์ได้แก่ โลหะผสมจำภาพ (shape memeory alloy) ที่สามารถเปลี่ยนแปลงลักษณะภาพร่างตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ผลึกเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric crystal) ที่สามารถปรับเปลี่ยนไปมาระหว่างแรงทางไฟฟ้ากับแรงเชิงกล

2.4 การกัตซิลิคอนในสารละลายแบบแอนไอโซทรอปิก[5]

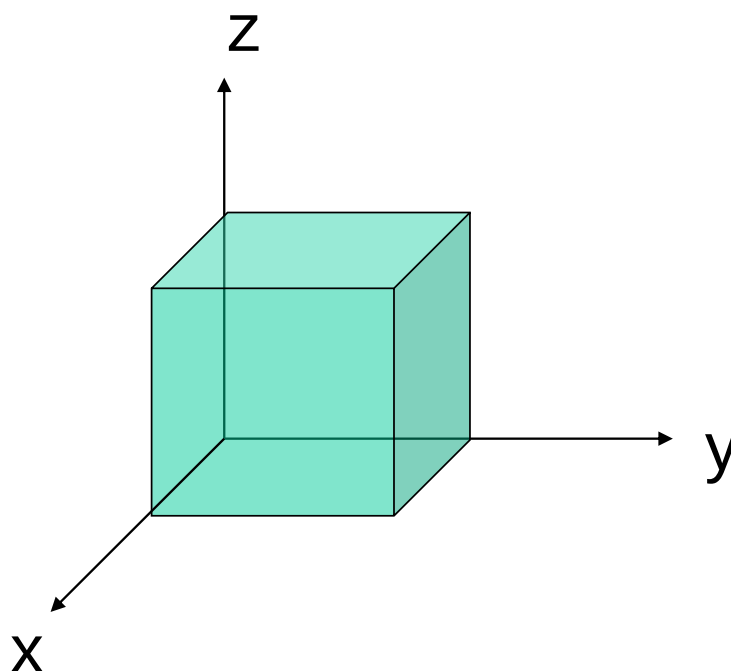
2.4.1 โครงสร้างซิลิคอน

ระบบผลึกในซิลิคอน หรือ โอเรียนเตชันของผลึกซิลิคอน

โครงสร้างผลึกมีอยู่หลายแบบ สามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มตามภาพร่างของหน่วยเซลล์ โดยให้จุดกำเนิดของแกน xyz อยู่ที่ย่อมุมหนึ่งของหน่วยเซลล์ แกน x y และ z ระนาบของผลึกซิลิคอนเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมาก สำหรับงานการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโดยเฉพาะผลึกซิลิคอนระนาบ (100) ซึ่งวิธีการแสดงระนาบของผลึก คือ โดยการแสดงด้วยค่า “ดัชนีมิลเลอร์” (Miller Indices) ซึ่ง ดัชนีมิลเลอร์ ของระนาบของซิลิคอนจะถูกกำหนดโดยตำแหน่งจุดที่ระนาบนั้นตัดแกน x, y และ z

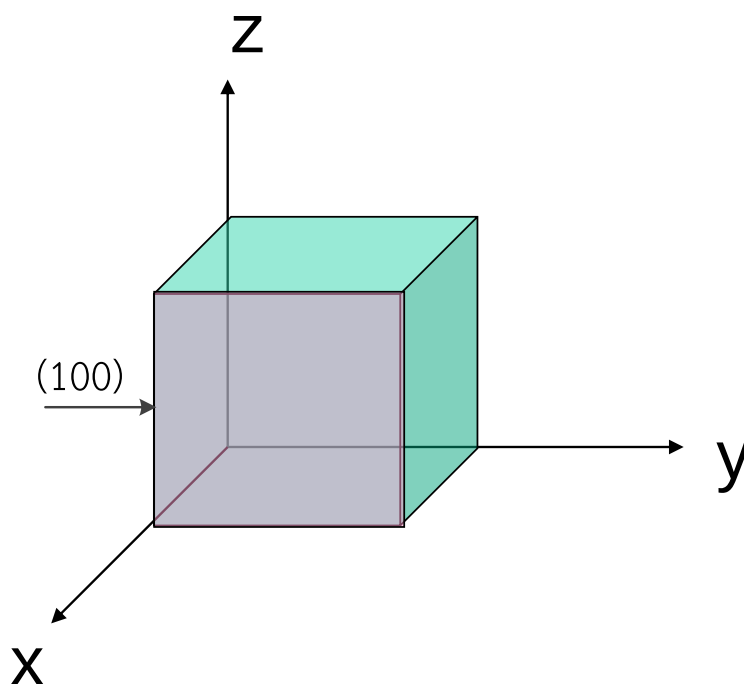
วิธีการหาตรรกนิมิลเลอร์ สำหรับระนาบผลึกที่เปลี่ยนลูกบาศก์

1. เลือกระนาบที่ไม่ผ่านจุด $(0,0,0)$
2. หาจุดตัดแกน x, y, z
3. ทำจุดตัดให้เป็นส่วนกลับ $(1/x \ 1/y \ 1/z)$
4. ทำให้ผลหารเป็นเลขจำนวนเต็มทีลงตัวน้อยๆ
5. ใส่ใน $()$ โดยไม่มีจุลภาค $(,)$ กั้น
6. ถ้าติดลบให้ใส่ขีดเส้นไว้เหนือตัวเลขนั้น



ภาพที่ 2.11 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบ $x y z$

ดังนั้นดัชนีมิลเลอร์ของระนาบซึ่งตัดแกน $x = 1$, $y = \infty$, $z = \infty$ เขียนได้ (100) หรือเรียกว่า ระนาบ (100) แสดงดังภาพ

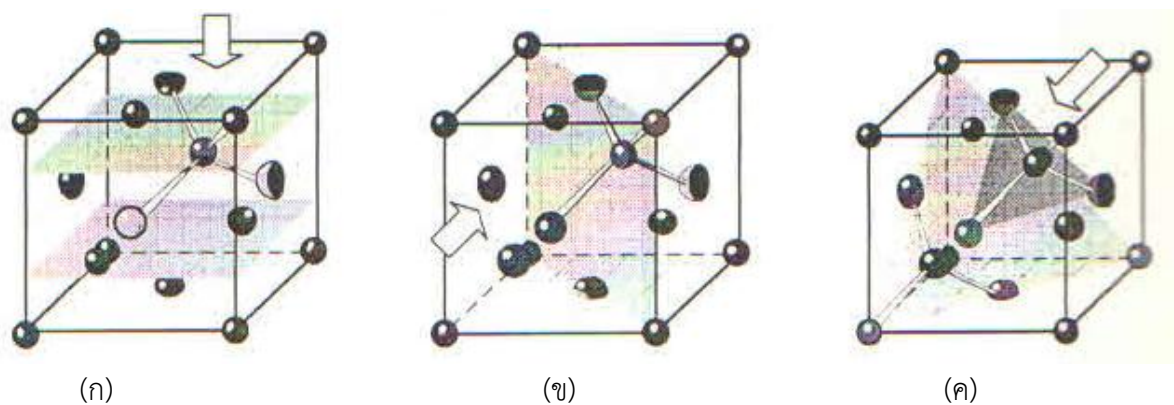


ภาพที่ 2.12 แสดงหน่วยเซลล์ระนาบ (100)

ในโครงสร้างอะตอมซิลิคอนจะมีระนาบต่างๆ กัน เช่น ระนาบ(100) ระนาบ(111) ระนาบ (110) จะมีจำนวนพันธะที่ถูกกัดออกไปก่อน และจำนวนพันธะที่จะถูกดึงออกสู่สารละลาย ไม่เท่ากัน ดังจะกล่าวต่อไปนี้

1. ระนาบ(100) อะตอมที่ถูกกัดออกจะมี 2 อะตอมที่อยู่ใต้ผิวระนาบและมี 2 อะตอมที่ถูกกัดออกก่อน ดังนั้นการที่จะดึงอะตอมจากผิวหน้าต้องมีการทำลายพันธะถึง 2 พันธะ
2. ระนาบ(111) จะมี 3 อะตอมที่อยู่ใต้ผิวหน้า และมี 1 อะตอม ที่ถูกกัดออกไปก่อนหน้านี้จึงเป็นระนาบที่แข็งแรงที่สุด
3. ระนาบ(110) จะมี 3 อะตอมอยู่ที่ผิวหน้า 1 อะตอมอยู่ใต้ผิวหน้า และ 1 อะตอมที่ถูกกัดไปก่อนหน้านี้ แม้ว่าจะมี 2 อะตอมที่มีพันธะร่วมกับอะตอมตรงกลางที่บนผิวหน้า แต่ก็ล้วนเป็นอะตอมที่ผิวหน้าด้วยกันจึงจะถูกกัดไปพร้อมกันกับ ระนาบ(100) จึงเป็นระนาบที่แข็งแรงน้อยกว่าระนาบ(100) และระนาบ(111)

ภาพที่ 2.13 แสดงจำนวนพันธะในแต่ละระนาบของซิลิคอน ซึ่งแบ่งความใกล้เคียง จากสารละลายเป็น 3 ระดับ คือ อะตอมที่ถูกกัดไปก่อน อะตอมที่กำลังถูกกัด อะตอมที่จะถูกกัดเป็นอันดับต่อไป



ภาพที่ 2.13 แสดงพันธะในอะตอมซิลิคอนระนาบต่าง ๆ (ก) ระนาบ(100) (ข) ระนาบ(110)
 (ค) ระนาบ(111) (ลูกศรแสดงทิศทางการเข้าไปกีดของสารละลายไอโซทรอปิก)
 ที่มา : วิทยานิพนธ์, ศรีเมฆ รัตนชัย, 2542

เนื่องจากการจัดแบบแอนไอโซทรอปิกนั้นเป็นการเลือกจัดแต่ละระนาบไม่เท่ากัน ดังนั้น ร่องรอยที่เหลือจากการกัดจึงเป็นภาพทรงเรขาคณิตที่แน่นอนในตารางที่ 2.1 เป็นความสัมพันธ์ของมุมระหว่างระนาบ $\{HKL\}$ และ $\{hkl\}$ ซึ่งเป็นตารางที่ใช้ตรวจสอบว่า ระนาบที่เหลือจากการกัดควรเป็นระนาบใดบ้าง

ตารางที่ 2.1 มุมระหว่างระนาบ {HKL} และ {hkl} และความอัดแน่นของอะตอมของแต่ละระนาบต่างๆ [6,7]

{HKL}	{hkl}	มุมระหว่างระนาบ {HKL} และ {hkl}			
100	100	0.00	90.00		
	110	45.00	90.00		
	111	54.74			
	210	26.56	63.43	90.00	
	211	35.26	65.90		
	221	48.19	70.53		
	310	18.43	71.56	90.00	
	311	25.24	72.45		
110	110	0.00	60.00	90.00	
	111	35.26	90.00		
	210	18.43	50.77	71.56	
	211	30.00	54.74	73.22	90.00
	221	19.47	45.00	76.37	90.00
	310	26.56	47.87	63.43	77.08
	311	31.48	64.76	90.00	
	411	10.00			
	113	64.7			
	115	74.2			
	117	78.6			

2.4.2 ปฏิบัติการกัดซิลิคอน

การกัดซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิกได้กลายมาเป็นเทคโนโลยีส่วนสำคัญในกระบวนการผลิตสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำจากซิลิคอน กระบวนการกัดซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิก คือ กระบวนการที่สารละลาย(Etchant) กัดเนื้อสารซิลิคอนในแต่ละระนาบของซิลิคอนไม่เท่ากัน หรือกล่าวได้ว่าอัตราการกัดของสารละลายแปรตามระนาบของซิลิคอน

สารเคมีที่ใช้กัดซิลิคอนได้นั้นส่วนใหญ่จะประกอบด้วยผสมกับน้ำ เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เอธิลีนไดเอมีน(Ethylenediamine) ไฮดราซีน(Hydrazine) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นต้น ตัวกัดเหล่านี้มีทั้งที่มีคุณสมบัติไอโซทรอปิก(Isotropic etching) หรือ แอนไอโซทรอปิก(anisotropic etching) ซึ่งอัตราการกัดอาจจะขึ้นกับความเข้มข้นหรืออุณหภูมิสารละลาย

ตัวกัดเหล่านี้จะกัดวัสดุต่างๆกันได้ไม่เท่ากัน ดังนั้นการเลือกหน้ากากป้องกันการกัดที่เหมาะสม แสดงในตาราง 2.2

สารละลายกัดที่สำคัญที่มีการรายงานกันส่วนมากก็คือ สารละลาย Ethylenediamine ผสม Pyrocatechol ในน้ำ DI หรือ ใช้ชื่อย่อว่า EPD นั้นมีข้อดีหลายประการคือ

1. เป็นตัวกัดประแอ่นไอโซทรอปิก
2. เป็นตัวกัดที่มีการเลือกกัดได้เด่นชัดที่สุด สามารถใช้หน้ากากป้องกันการกัดได้หลายชนิด
3. ขึ้นกับความเข้มข้น ซึ่งอัตราการกัดน้อยมากถ้าความเข้มข้นสารเจือปนสูง

สารละลาย KOH ที่อาจผสม Isotropy alcohol ก็ได้ ซึ่งเป็นตัวกัดที่ขึ้นกับทิศทางระนาบ และมีอัตราของการกัดระนาบ (100) ต่อ ระนาบ (111) สูงที่สุด และเกิด undercutting ได้ชั้นออกไซด์ต่ำที่สุด แต่มีจุดด้อยเนื่องจาก KOH นั้นกัดซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยอัตราที่สูงจึงทำให้การกัดด้วย KOH ต้องอาศัยหน้ากากหรือการป้องกันแบบอื่น

สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก(Hydrofluoric acid) + กรดไนตริก(Nitric acid) + กรดอะซิติก(Acetic acid) หรือเรียกว่า HNA นั้นเป็นสารละลายประเภท ไอโซทรอปิก ซึ่งอัตราการกัดแปรผันอย่างมากและยังขึ้นกับความเข้มข้นของสารเจือ อัตราส่วนผสมที่ต่างกันจะให้อัตราการกัดที่เปลี่ยนแปลงมาก หน้ากากสำหรับกรด HNA นั้น ทั้ง SiO_2 หรือ Si_3N_4 นั้นไม่สามารถป้องกันการกัดระยะยาวได้

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างสารละลายกัดสำหรับซิลิคอน และหน้ากากป้องกันที่เหมาะสม[8]

สารละลายกัด	ส่วนผสม	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	อัตราการกัด ($\mu\text{m}/\text{min}$)	อัตราการใช้ แอ่นไซ หรือปิก (100)/(111)	ความอิสระ ต่อความ เข้มข้นของ สารเจือ	หน้ากากกัน
HF HNO ₃ (water+ CH ₃ COOH)	10 ml 30 ml 80 ml 25 ml 50 ml 25 ml 25 ml 50 ml 25 ml	22 22 22	0.7-3.0 40 7.0	1:1 1:1 1:1	$\leq 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ หรือ p จะลด อัตราการกัดลง 150 เท่าไม่ ขึ้นกับความ เข้มข้นสารเจือ ----	SiO ₂ (300Å/min) Si ₃ N ₄ SiO ₂ (700Å/min)
Ethylene diamine Purocatechol (น้ำ)	750 ml 120 ml 100 ml 750 ml 120 ml 240 ml	115 115	0.75 1.25	35:1 35:1	boron $\geq 7 \times 10^9$ cm ⁻³ จะลด อัตราการกัดลง ประมาณ 50 เท่า	SiO ₂ (2Å/min) Si ₃ N ₄ (1Å/min) Au,Cr,Ag, Cu,Ta
KOH (น้ำหรือ isopropanol)	44 gr 100 ml 50 gr 100 ml	85 85	1.4 1.0	400:1 400:1	boron $\geq$ $7 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ จะลดอัตราการ กัดลงประมาณ 20 เท่า	Si ₃ N ₄ SiO ₂ (14Å/min)
H ₂ N ₄ (น้ำหรือ isopropanol)	100 gr 100 ml	100	2.0	---	ไม่ขึ้นกับความ เข้มข้นสารเจือ	SiO ₂ Al
NaOH	10 gr 100 ml	65	0.250-1.0	---	boron $\geq$ $7 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ จะลดอัตราการ กัดลงประมาณ 10 เท่า	Si ₃ N ₄ SiO ₂ (7Å/min)

กลไกการกัดซิลิคอนนั้นมี 4 ขั้นตอน

1. การฉีกไฮดรอกซิลจากสารละลายเข้าสู่ซิลิคอน เพื่อยกระดับสถานะออกซิเดชัน(oxidation state) ของซิลิคอนเป็น Si^+
2. การรวมตัวของอนุมูล OH^- และ Si^+ เป็นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ละลายน้ำได้
3. การรวมตัวของซิลิคอนและองค์ประกอบในสารละลายกลายเป็น complex agent
4. การดึงซิลิคอนที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายออกสู่น้ำ ทำให้ซิลิคอนถูกกัดออกไปจากชั้นตอนทั้งสี่ สารเคมีที่จะกัดซิลิคอนได้ต้องแตกตัวเป็นไฮดรอกซิลกับซิลิคอนและตัวมันเองต้องมีอนุมูลไฮดรอกซิลเกิดขึ้น รวมทั้ง complex agent นั้นต้องสามารถละลายได้ด้วยน้ำ ใน HNA นั้นกรดไนตริกจะเป็นผู้จ่ายไฮดรอกซิลและอนุมูลไฮดรอกซิลออกมาอย่างรุนแรงมากในขณะที่ฟลูออรีนใน HF จะรวมตัวกลายเป็น H_2SiF_6 ที่ละลายน้ำได้

สำหรับสารละลาย EPD นั้นเป็น Ethylene diamine จะรวมกับน้ำและให้ไฮดรอกซิลกับซิลิคอน Pyrocatechol จะรวมกับซิลิคอนกลายเป็น $\text{Si}(\text{C}_6\text{H}_4\text{O}_2)_3$ ที่ละลายน้ำได้ ดังนั้นถ้าไม่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ EPD จะไม่สามารถกัดซิลิคอนได้

สำหรับ KOH การกัดแบบแอนไอโซทรอปิก นั้นไม่ทราบกลไกที่แท้จริง แต่คาดว่ามีการกัดดังต่อไปนี้

1. อนุมูลไฮดรอกซิลจะเข้าจับกับกับแขนว่างของซิลิคอน สำหรับแขนยื่นของซิลิคอนในระนาบ (100) มีสองแขน ในขณะที่มีเพียงแขนเดียวในซิลิคอนระนาบ(111) ขั้นตอนนี้ใช้พลังงานไอออนเซชัน 0.35 อิเล็กตรอนโวลต์
2. พันธะซิลิคอนหลัก(back bond) ที่ยังไม่ถูกกัดออกไป(เท่ากับ 2 สำหรับระนาบ(100) และเท่ากับ 3 สำหรับ ระนาบ(111)) จะถูกดึงออกเพื่อรวมตัวกลายเป็น $\text{Si}(\text{OH})_2^+$ หรือ SiOH^{3-} (เรียกอนุมูลซิลิคอนไฮดรอกไซด์)
3. ซิลิคอนไฮดรอกไซด์ดังกล่าวจะทำปฏิกิริยากับอนุมูลไฮดรอกซิลกลายเป็นกรด Orthosilic acid ซึ่งจะเกิดที่ผิวหน้าและถูกดึงออกสู่สารละลาย
4. กรด Orthosilic acid แตกตัวเพื่อรวมกับน้ำเกิดเป็นก๊าซไฮโดรเจน

2.4.3 การกัดซิลิคอนด้วยสารเคมี EPD[5]

เออีลีนไดอะมิน(E) ผสมไพโรแคตคอล(P) น้ำบริสุทธิ์(D)

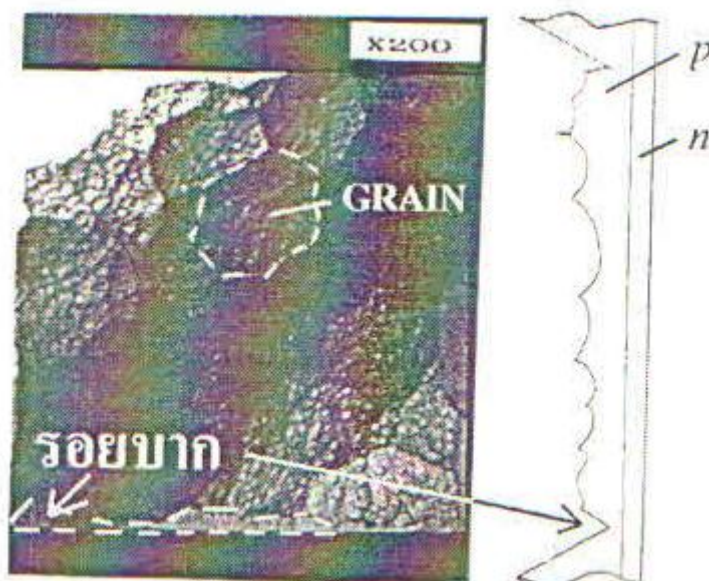
เออีลีนไดอะมินเป็นสารเคมีที่มีคุณสมบัติเป็นด่าง และมีลักษณะเป็นของเหลวใสไม่มีสี มีจุดเดือดประมาณ 120°C เมื่อทิ้งไว้ในอากาศจะเกิดการออกซิไดซ์กับอากาศแล้วสีของสารเคมีจะคล้ำขึ้น โดยจะมีการเสื่อมสภาพได้เร็วขึ้นถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนไพโรแคตคอลเป็นเกล็ดของแข็ง มีสีเทาควันบุหรี ซึ่งสามารถดูดความชื้นได้ดี เมื่อผสมกับ เออีลีนไดอะมิน และน้ำบริสุทธิ์จะได้สีน้ำตาลเข้ม สารละลาย EPD ที่ได้จะมีสีชาแก่จนถึงสีน้ำตาลไหม้ถ้าเติมไพโรแคตคอลมากขึ้น การเตรียมสารละลายเป็นเวลานานขึ้นจะทำให้ได้สีเข้มขึ้น

การเตรียมสารละลาย EPD ในบีกเกอร์ให้ความร้อนโดย Hot plate แล้วทำการกวนสารละลายตลอดเวลาด้วยแท่งแม่เหล็กกวน ทำการกัดซิลิคอนอีพิเซียลชนิด n บนฐานรองซิลิคอนชนิด p หนา 100) ซึ่งมีสภาพความต้านทานชั้นอีพิเซียลประมาณ 8-12 โอห์ม-เซนติเมตรและมีสภาพความต้านทานของฐานรองซิลิคอนประมาณ 12 โอห์ม-เซนติเมตร ต่อจากนั้นสร้างมาร์คต้นแบบที่มีลวดลาย(แพทเทิร์น)ทดสอบเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2x2 mm. โดยเริ่มจากนำแผ่นซิลิคอนมาสร้างซิลิคอนไดออกไซด์แบบแห้ง 3 ชั่วโมง ตามด้วยแบบชื้น 2 ชั่วโมง และแบบแห้ง 1 ชั่วโมง ซึ่งได้ความหนาประมาณ 6,000 อังสตรอม โดยสามารถทนต่อการกัดด้วย EPD ได้ประมาณ 3,000 นาที ที่อุณหภูมิ 100 °C ก่อนเริ่มกระบวนการกัดต้องทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนด้วยกรดไนตริกร้อน 5 นาที ล้างด้วยน้ำ DI เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน ล้างไขมันด้วยไตรคลอโรเอธิลีนและอะซิโตน ทำความสะอาดด้วยน้ำ DI เป่าให้แห้งจุ่มในสารละลาย HF 10% ล้างออกด้วยน้ำ DI และเป่าด้วยก๊าซให้แห้ง

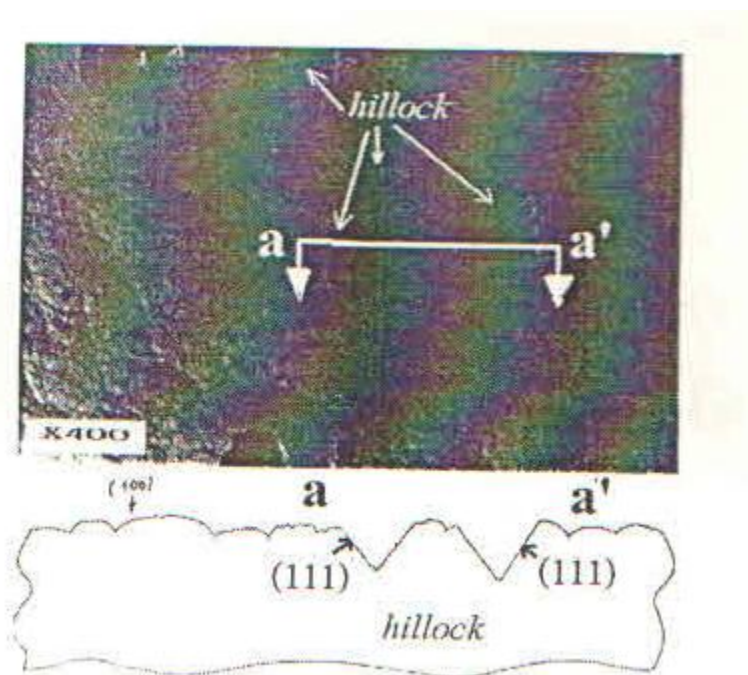
ผลของความเข้มข้นของ EPD

อัตราส่วนที่เป็นที่นิยมกันทั่วไป คือ E 50 ml. : P 8 กรัม : DI 16 ml. โดยเริ่มทำการกัดซิลิคอนที่อุณหภูมิ 100 °C และกวนสารละลายด้วยอัตราเร็ว 100 รอบต่อนาที แล้วสังเกตชิ้นงานเมื่อเวลาผ่านไป 1 และ 2 ชั่วโมง ผิวงานที่ได้มีลักษณะเป็นแบบผิวส้มแสดงดังภาพที่ 2.14 ลักษณะเป็นปุ่มของผิวส้มเรียกว่าเน็ตเกรน(Gain) พบว่าเมื่ออัตราส่วน E 50 ml. : P 8 กรัม : DI 16 ml. แต่เปลี่ยนปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จาก 8 กรัม เป็น 12 กรัม และ 15 กรัม ตามลำดับ พบว่าเกิดฟองอากาศหนาแน่นมากขึ้น ณ บริเวณที่ถูกกัด พื้นผิวจะขรุขระมากขึ้น(ขนาดของเกรนจะใหญ่ขึ้น) เมื่อวัดอัตราการกัดด้วยการวัดความลึกของหลุมที่ถูกกัด พบว่าจะมีอัตราการกัดเพิ่มขึ้นจากประมาณ 1.4 เป็น 1.6 และ 1.7 ไมครอนต่อชั่วโมง ตามลำดับ แต่จะเกิดหลุมปริมาตรซึ่งเรียกว่า hillock ขึ้นบนไดอะแฟรม ดังภาพที่ 2.15 จะพบพฤติกรรมที่คล้ายกันถ้าทำการเปลี่ยนแปลงสัดส่วน เอธิลีนไดอะมินต่างๆกันไป พบว่าอัตราส่วน E : P ต่ำกว่า 50 : 8 จะทำให้เกิด hillock มากขึ้นทั้งนี้เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่สำคัญสำหรับปฏิกิริยาหลักซึ่งจะกัดซิลิคอนให้กลายเป็นสารประกอบออกซาลิกซึ่งสามารถละลายน้ำได้ จากการทดลองจะไม่พบการเปลี่ยนแปลงสภาพพื้นผิวและอัตราการกัดเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนด้วย DI ไม่ว่าอัตราส่วนใดๆพื้นผิวไดอะแฟรมจะมีความลาดเอียงจากขอบด้านหนึ่งของไดอะแฟรมไปอีกด้านหนึ่งเสมอ แสดงดังภาพที่ 2.16 นอกจากนี้ตรงขอบจะเกิดรอยบาก(notch)(ภาพ 2.14) ซึ่งเป็นข้อควรระวังในการกัดไดอะแฟรมที่มีความหนาน้อยกว่า 15 ไมครอนเนื่องจากไดอะแฟรมจะขาดเสียก่อน

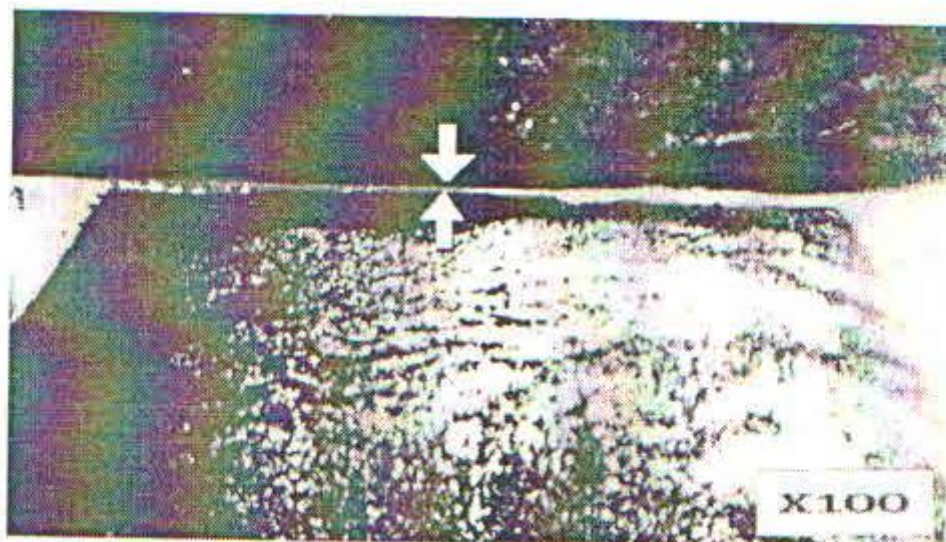
เทคนิคการควบคุมความหนาของไดอะแฟรมก็คือกัดแผ่นซิลิคอนไปจนกระทั่งแสงสามารถทะลุจนเห็นไดอะแฟรมได้ ซึ่งต้องใช้ร่วมกับการคำนวณเวลากัด



ภาพที่ 2.14 แสดงลักษณะคล้ายผิวส้มของไดอะแฟรมซิลิคอนระนาบ (100) เมื่อถูกกัดด้วย EPD อัตราส่วน 50 : 8 : 16 ที่ 100°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง (กำลังขยาย 200 เท่า)
ที่มา : วิทยานิพนธ์, ศรีเมษ รัตนชัย, 2542



ภาพที่ 2.15 แสดงซิลิคอนระนาบ (100) เมื่อถูกกัดด้วย EPD อัตราส่วน 50 : 12 : 16 ที่ 100°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง (กำลังขยาย 400 เท่า)
ที่มา : วิทยานิพนธ์, ศรีเมษ รัตนชัย, 2542



ภาพที่ 2.16 แสดงภาพ SEM ของภาคตัดขวางไดอะแฟรมซิลิคอนระนาบ (100) เมื่อถูกกัดด้วยอัตราส่วน 50 : 8 : 16 ที่ 100°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง แสดงให้เห็นถึงความลาดเอียง
ที่มา : วิทยานิพนธ์, ศรีเมษ รัตนชัย, 2542