

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสร้างเทอร์โมคัปเปิลแบบฟิล์มเพชร

The production of diamond film thermocouple

จัดทำโดย

นาย อนุวัต ชูกิจโกศล รหัสประจำตัว 47010930

นาย นาวิณ ณ เชียงใหม่ รหัสประจำตัว 47012214

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. สมศักดิ์ เขียวศิริกุล

รพ.

๑๑๒๓๗

๒๕๕๐

เลขหมู่.....

82180

เลขทะเบียน.....

- 9 ก.ค. ๒๕๕๑

วัน,เดือน,ปี.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา ๒๕๕๐

b. 1194๕๒๑
i.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกแห่งที่มีการนำออกใช้

การสร้างเทอร์โมคัปเปิลแบบฟิล์มเพชร
The production of diamond film thermocouple



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการภาษาไทย

การสร้างเทอร์โมคัปเปิลแบบฟิล์มเพชร

ชื่อโครงการภาษาอังกฤษ

The production of diamond film thermocouple

จัดทำโดย

นายอนุวัต

ชุกิจ โกลล

รหัสประจำตัว 47010930

ชั้นปีที่ 4C

นายนาวิน

ณ เชียงใหม่

รหัสประจำตัว 47012214

ชั้นปีที่ 4CS

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. สมศักดิ์ เชียรศิริกุล

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ ปีการศึกษา 2550

รายงานฉบับนี้ได้ผ่านการตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว

() อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. สมศักดิ์ เชียรศิริกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างเทอร์โมคัปเปิลแบบฟิล์มเพชร

นายอนุวัต ชูกิจโกศล รหัส 47010930
นายนาวิน ณ เชียงใหม่ รหัส 47012214
รศ. สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2550

บทคัดย่อ

เทอร์โมคัปเปิลเป็นอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ ซึ่งประกอบด้วยวัสดุตัวนำสองชนิดต่างกัน โดยปลายข้างหนึ่งถูกเชื่อมต่อกันเมื่อเกิดผลต่างของอุณหภูมิ จะเกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเทอร์โมคัปเปิล โดยค่าแรงดันไฟฟ้าขึ้นกับชนิดของวัสดุและผลต่างของอุณหภูมิ

ในรายงานฉบับนี้ การศึกษาและพัฒนากระบวนการสร้างเทอร์โมคัปเปิลชนิดฟิล์มเพชร โดยโครงสร้างของฟิล์มเพชร ได้จากการสังเคราะห์ในกระบวนการ CVD แบบลดความร้อนที่ความดัน 50 โวลต์ บนฐานรองซิลิคอนที่มีการสร้างลวดลายฟิล์มเพชร โดยเทคนิคใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นหน้ากักป้องกันการเกิดฟิล์มเพชร จากนั้นกัดเนื้อซิลิคอนแบบแอนไอโซโทรปิก ในสารละลาย EPD ทำการสร้างขั้วโลหะเทอร์โมคัปเปิล โดยการระเหยในระบบสุญญากาศ การวัดและทดสอบ ทำการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The production of diamond film thermocouple

Mr. Anuwat Chukitkosol ID 47010930

Mr. Nawin Na chiengmai ID 47012214

Associate Prof. Somsak Cheersirikul Advisor

Education Year 2007

Abstract

Thermocouple, one type of thermal meter, has been designed to have two different materials in contact. The temperature difference between the contacts results in voltage drop across the thermocouples. The voltage level depends on type of materials used and the different temperature.

The report is based on the research and the development of diamond film thermocouple production. The structure of diamond film comes from synthesized CVD procedure, which is combined with heat wire at the voltage of 50 Volts. The technical production of the silicon base which has diamond film design is to use silicon dioxide as a mask to protect diamond film. Then, nibble anisotropic silicon in EPD substance. Make thermocouple metal top by evaporation in vacuum circumstance. For measuring and testing, test electric properties by the temperature of each part of material.

กิตติกรรมประกาศ

รายงานฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี ขอกราบขอบพระคุณ รศ.สมศักดิ์ เชียรศิริกุลที่ได้ช่วยกรุณาให้คำปรึกษาวางแนวทางในการทำการวิจัย การแก้ปัญหา การคิดริเริ่มตลอดจนชี้แนะ ทำให้รายงานฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามเป้าหมาย

ขอกราบขอบคุณ พี่สราวุฒิ ที่ช่วยให้คำปรึกษาทั้งทางด้านทฤษฎีและปฏิบัติ ร่วมกับอาจารย์ที่ปรึกษา ในการทำโครงการนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้ความอำนวยความสะดวกและเครื่องมือต่างๆในการทำโครงการ

ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ และพี่น้อง ที่ให้กำลังใจและสนับสนุนการศึกษามาโดยตลอด

ขอขอบคุณ เพื่อนๆทุกคน ที่คอยให้กำลังใจในการทำงานมาโดยตลอด

ผู้จัดทำ

นาย อนุวัต ชูกิจโกศล

นาย นาวิณ ณ เชียงใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	i
Abstract	ii
สารบัญ	iii
สารบัญภาพ	v
สารบัญตาราง	viii
สัญลักษณ์	ix
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎี	5
2.1 Diamond (เพชร)	5
2.2 คุณสมบัติต่างๆของเพชร	6
2.2.1 คุณสมบัติทางกล	6
2.2.2 คุณสมบัติทางแสง	7
2.2.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้า	7
2.2.4 คุณสมบัติของเพชรเมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น	8
2.3 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชร	8
2.4 ปรากฏการณ์ไฟฟ้าความร้อน (Thermoelectric Effect)	10
2.4.1 ปรากฏการณ์ซีเบ็ค (Seebeck Effect)	10
2.4.2 ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier Effect)	23
2.4.3 ปรากฏการณ์ทอมสัน (Thomson Effect)	24
2.5 การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer)	25
2.5.1 การนำความร้อน (Conduction)	26
2.5.2 การพาความร้อน (Convection)	28
2.5.3 การแผ่รังสี	30
บทที่ 3 การออกแบบและกระบวนการสร้าง	31
3.1 การออกแบบไดอะแฟรม	31
3.2 การออกแบบเทอร์โมคัปเปิล	32
3.3 การออกแบบแถบโลหะและไมโครฮีตเตอร์	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.4 การออกแบบหลุมในการกัก	34
3.5 ขั้นตอนกระบวนการสร้าง	35
3.5.1 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชร	35
3.5.2 กระบวนการสร้าง	36
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	41
4.1 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชร	41
4.1.1 การเตรียมฐานรองซิลิคอน	41
4.1.2 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชร	42
4.2 ผลการศึกษาการสร้างฟิล์มเพชรตามลวดลายที่กำหนด	44
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	52
ภาคผนวก ก	53
ภาคผนวก ข	54
ภาคผนวก ค	55
ภาคผนวก ง	56
กิตติกรรมประกาศ	57
เอกสารอ้างอิง	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 ระบบการวัดและแสดงผลแบบพื้นฐาน	1
รูปที่ 1.2 ลักษณะการทำงานของเซนเซอร์แบบกำเนิดเอง และแบบผสมสัญญาณ	2
รูปที่ 2.1 ตำแหน่งอะตอมใน cubic cell	6
รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกของเพชร	6
รูปที่ 2.3 ภาพไดอะแกรมระบบ CVD แบบลดความร้อน	9
รูปที่ 2.4 วงจรปิดจะเกิดกระแสไหลวน	11
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของเทอร์โมคัปเปิล	11
รูปที่ 2.6 โลหะแทรก	12
รูปที่ 2.7 กฎของการแทรกอุณหภูมิ	12
รูปที่ 2.8 การต่อขานานเทอร์โมคัปเปิล	13
รูปที่ 2.9 การหาผลต่างกลับขั้วของเทอร์โมคัปเปิล	13
รูปที่ 2.10 การต่อเทอร์โมคัปเปิลเพิ่ม ไม่มีผลต่อแรงเคลื่อนไฟฟ้า	14
รูปที่ 2.11 การต่ออนุกรมเทอร์โมคัปเปิล	14
รูปที่ 2.12 การเปลี่ยนระดับเฟอร์มิและแพร์ของอิเล็กทรอนิกส์	19
รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ของตำแหน่งเฟอร์มิในช่วงแบนด์กับซิลิคอนที่มี ความสัมพันธ์กับอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารเจือ N_d และ N_a	20
รูปที่ 2.14 การเปรียบเทียบของฉนวน สารกึ่งตัวนำและโลหะ	22
รูปที่ 2.15 วงจรการทดลองของเพลทเทียร์	23
รูปที่ 2.16 ปรากฏการณ์เพลทเทียร์ที่รอยต่อของวัสดุตัวนำ	24
รูปที่ 2.17 การนำความร้อนผ่านของแข็งที่มีพื้นที่ A	27
รูปที่ 2.18 การพาความร้อนจากผิววัสดุ	29
รูปที่ 3.1 ภาพตัดขวางแสดงลักษณะการกักแบบแอนไอโซโทรปิก	32
รูปที่ 3.2 การออกแบบเทอร์โมคัปเปิล	32
รูปที่ 3.3 การออกแบบแถบโลหะ	33
รูปที่ 3.4 การออกแบบไมโครฮีตเตอร์	33
รูปที่ 3.5 มาส์ก	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

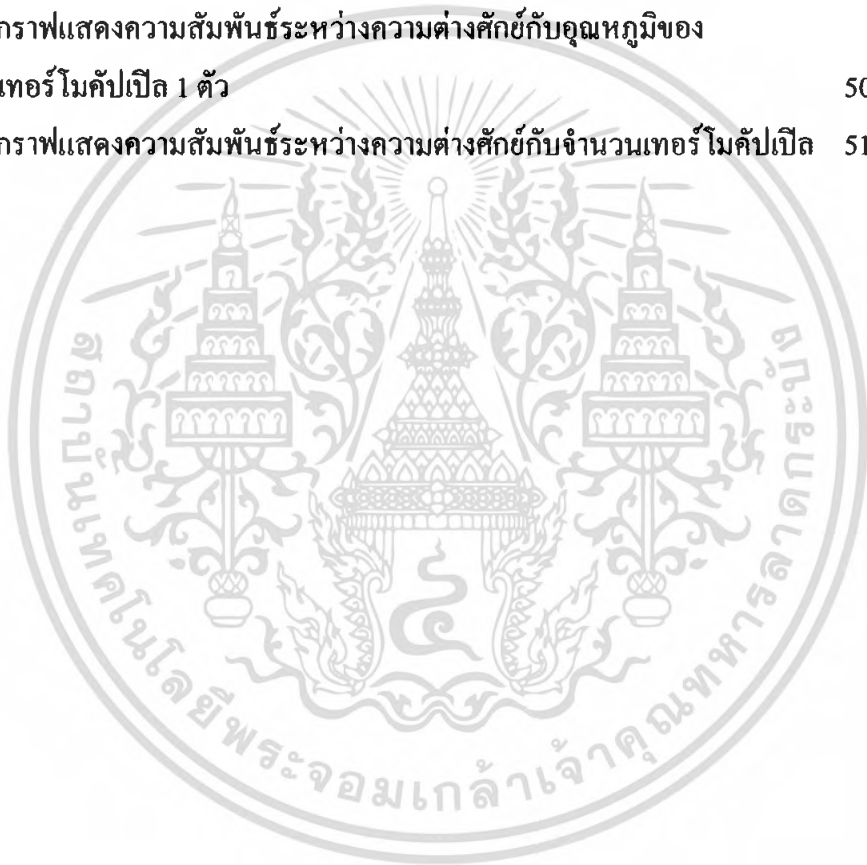
สารบัญภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.6 การออกแบบไมโครฮิตเตอร์	34
รูปที่ 3.7 ไคอะแฟรม	34
รูปที่ 3.8 เทอร์โมคัปเปิล	35
รูปที่ 3.9 แผนภาพไคอะแกรมของระบบเครื่องสร้างฟิล์มเพชร	35
รูปที่ 3.10 แผ่นซิลิคอนเริ่มต้นระนาบ 100	36
รูปที่ 3.11 แผ่นซิลิคอนที่ขัดผิวหน้าด้วยคริมเพชรขนาด 0.25 ไมครอน	36
รูปที่ 3.12 สร้าง ชั้น Nitride บนแผ่น ซิลิคอน	36
รูปที่ 3.13 Etch Si_3N_4 ออก ด้วยกรด Buffer 180 องศา	37
รูปที่ 3.14 สร้างชั้น Si_3N_4	37
รูปที่ 3.15 Etch Si_3N_4 ออก ด้วยกรด Buffer 180 องศา	37
รูปที่ 3.16 สร้างชั้น SiO_2	38
รูปที่ 3.17 Etch Si_3N_4 ออก	38
รูปที่ 3.18 สร้างฟิล์มเพชร	38
รูปที่ 3.19 กัด EPD	39
รูปที่ 3.20 เคลือบน้ำยา AZ 4620	39
รูปที่ 3.21 Sputtering Ti / Cu and Electroless plating	40
รูปที่ 3.22 Left off AZ 4620	40
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่าของผิวหน้า แผ่นซิลิคอนที่ขัดด้วยคริมเพชร 0.25 ไมครอน	41
รูปที่ 4.2 แผนภาพไคอะแกรมของระบบเครื่องสร้างฟิล์มเพชร	42
รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายฟิล์มที่สังเคราะห์ได้ระยะเวลาสังเคราะห์ฟิล์ม 8 ชั่วโมง ความหนาฟิล์ม 8 ไมครอน พื้นที่ขนาด $2.5 \times 2.5 \text{ cm}^2$	44
รูปที่ 4.4 แสดงตัวอย่างลวดลายที่ใช้ในการทดลอง (กำลังขยาย 100เท่า)	45
รูปที่ 4.5 แผนภาพแสดงผลความหนาของชั้น SiO_2 ที่มีต่อการเกิดลวดลายของฟิล์มเพชร	46
รูปที่ 4.6 ลายเส้นเพชรขนาด 20 ไมครอน	46
รูปที่ 4.7 ภาพแสดงมุมมองของการเกิดพื้นที่เพชร	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.8 ภาพแสดงมุมมองจากการเกิดพื้นที่เพชร	47
รูปที่ 4.9 ช่องว่างระหว่างเพชร Error เนื่องจากเพชรเกิดล้าเข้าไปในออกไซด์	48
รูปที่ 4.10 ช่องว่างระหว่างเพชร Error เนื่องจากกระบวนการโฟโตโคราฟีไม่สมบูรณ์	48
รูปที่ 4.11 การทดลอง	49
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับอุณหภูมิของ เทอร์โมคัปเปิล 1 ตัว	50
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับจำนวนเทอร์โมคัปเปิล	51



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ชนิดของเซนเซอร์ที่แบ่งตามสัญญาณ	2
ตารางที่ 1.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติไฟฟ้าและความร้อน	3
ตารางที่ 2.1 ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของวัสดุ โดยที่จุดอ้างอิงอยู่ที่ 0 °C และจุดที่วัด 100 °C	17
ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิล 1 ตัว	50
ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับจำนวนเทอร์โมคัปเปิล ที่อุณหภูมิ 50 และ 100 องศาเซลเซียส	51

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย
ϵ	ค่าเพอิมิตติวิตี (permittivity)
ϵ_0	ค่าเพอิมิตติวิตีของสุญญากาศ (permittivity of vacuum)
ϵ_s	ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสารกึ่งตัวนำ (dielectric constant of semiconductor)
θ	มุม(angle)
χ	อิเล็กตรอนเอฟฟินิตี (electron affinity)
λ	ความยาวคลื่นของแสง (wavelength of light)
μ	ความคล่องตัวของพาหะ (mobility)
μ_e	ความคล่องตัวของอิเล็กตรอน (electron mobility)
μ_h	ความคล่องตัวของโฮล (hole mobility)
ν	ความถี่ของแสง (frequency of light)
ρ	สภาพความต้านทานไฟฟ้า (electrical resistivity)
σ_0	สภาพนำไฟฟ้า (conductivity)
σ_D	สภาพนำไฟฟ้ามืด (dark conductivity)
σ_p	สภาพนำไฟฟ้าด้วยแสง (photoconductivity)
τ	เวลาอายุพาหะ (lifetime)
ϕ	ฟังก์ชันงาน (work function)
ω	ความถี่เชิงมุม (angular frequency)
B	แบนด์วิดท์ (band width)
C	ความจุไฟฟ้า (capacitance)
C_j	ความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ (junction capacitance)
E_A	ระดับพลังงานแอกเซ็ปเตอร์ (acceptor level)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
E_C	ระดับคอนดักชัน (conduction level)
E_D	ระดับพลังงานโดเนอร์ (donor level)
E_f	ระดับพลังงานเฟอร์มี (fermi level)
E_g	ช่องว่างแถบพลังงาน (energy band gap)
E_V	ระดับเวเลนซ์ (valence level)
f	ความถี่ (frequency)
I	กระแสไฟฟ้า (current)
I_d	กระแสไฟฟ้ามืด (dark current)
I_p	กระแสไฟฟ้าโฟโต (photocurrent)
I_s	สัญญาณรบกวนชนิดช็อต (shot noise)
I_{sc}	กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตลัดวงจร (short circuit output current)
m^*	มวลประสิทธิผล (effective mass)
N_A	ความหนาแน่นของแอคเซปเตอร์ (acceptor density)
N_V	ความหนาแน่นประสิทธิผลของสเตตของโฮล (effective density of holes)
q	ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน (electronic charge)
V_{bi}	ศักย์ไฟฟ้าภายใน (built-in voltage)
V_{oc}	แรงดันเอาต์พุตวงจรมีเปิด (open circuit voltage)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ทรานสดิวเซอร์เป็นตัวแปลงสัญญาณอย่างหนึ่งไปเป็นสัญญาณอีกอย่างหนึ่ง ซึ่งประกอบด้วย เซนเซอร์ (sensor) และแอกชูเอเตอร์ (Actuator) เซนเซอร์เป็นทรานสดิวเซอร์ที่แปลงสัญญาณในรูปต่างๆ ให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ส่วนแอกชูเอเตอร์จะเป็นทรานสดิวเซอร์ที่แปลงสัญญาณทางไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณอย่างอื่น จะเห็นได้ว่าทั้งเซนเซอร์และแอกชูเอเตอร์จะแปลงสัญญาณที่ตรงข้ามกันและมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 1.1 แสดงให้เห็นว่า เซนเซอร์จะวัดคุณสมบัติทางกายภาพหรือเคมีแล้วแปลงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วส่งไปยังกระบวนการประมวลผลสัญญาณที่เหมาะสม เพื่อที่จะส่งไปยังส่วนแอกชูเอเตอร์ เพื่อที่จะแปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นเอาต์พุตที่ต้องการแสดงมีด้วยกันหลายวิธี เช่น แสดงเป็นภาพ เสียง การสั่น อุณหภูมิและแสงสว่าง เป็นต้น ซึ่งทำให้เราสามารถรับรู้ถึงการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจน นอกจากนั้นยังสามารถบันทึกข้อมูลได้



รูปที่ 1.1 ระบบการวัดและแสดงผลแบบพื้นฐาน

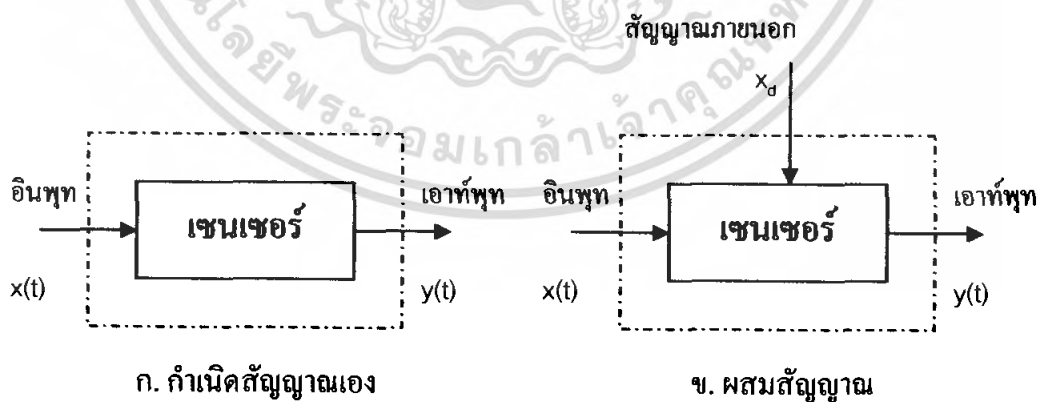
เซนเซอร์เป็นอุปกรณ์สำหรับระบบการวัดและควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถแสดงผลและแทนการตอบสนองของระบบประสาทมนุษย์ที่มีขีดจำกัดในการรับรู้ที่มีระบบประสาทสัมผัสทั้ง 5 คือ หูรับฟังเสียง ร่างกายรับการสัมผัส จมูกใช้ดมกลิ่น ลิ้นใช้การลิ้มรสและตาใช้ในการมอง ซึ่งถ้าสิ่งที่ใช้สัมผัสมีปริมาณมากเกินไปจะเป็นอันตรายต่อร่างกาย และถ้ามีปริมาณน้อยเกินไปก็ไม่สามารถรับรู้การเปลี่ยนแปลงได้ โดยทั่วไปเซนเซอร์แบ่งออกได้เป็น 6 ชนิด ตามชนิดสัญญาณคือเซนเซอร์ความร้อน (thermal sensor) เซนเซอร์รังสี (radiation sensor) เซนเซอร์กล (mechanical sensor) เซนเซอร์เคมี (chemical sensor) และเซนเซอร์ชีวภาพ (Biological sensor) แสดงดังตารางที่ 1.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 ชนิดของเซนเซอร์ที่แบ่งตามสัญญาณ

สัญญาณ	การวัด
ความร้อน	อุณหภูมิ ความร้อน อัตราการไหลความร้อน ความจุความร้อน
การแผ่รังสี	รังสีแกมมา อัลตราไวโอเลต การมองเห็น อินฟราเรด ไมโครเวฟ คลื่นวิทยุ
กล	ระยะทาง ความเร็ว ความเร่ง แรง ทอร์ก ความดัน การไหลของมวล การสั่นของคลื่นยาวและความสูงคลื่น
แม่เหล็ก	สนามแม่เหล็ก ฟลักซ์ โมเมนต์แม่เหล็ก สภาพการขอมแม่เหล็ก อำนาจแม่เหล็ก
เคมี	ความชื้น ค่าพี-เอช ความเข้มข้นก๊าซ
ชีวภาพ	ความหวาน โปรตีน โฮโมน

สำหรับเซนเซอร์ความร้อนสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ แบบกำเนิดสัญญาณเอง (self generating) และแบบผสมสัญญาณ (modurating) เซนเซอร์แบบกำเนิดสัญญาณเองไม่ต้องการพลังงานจากภายนอกก็สามารถทำงานได้เช่น เทอร์โมคัปเปิลจะให้ค่า e.m.f (electromotive force) ที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิ ในกรณีเซนเซอร์แบบผสมสัญญาณ ต้องมีแหล่งจ่ายพลังงานเช่น โฟโอดีไดโอด ต้องให้แรงดันไบอัสถึงจะทำงานได้แสดงดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 ลักษณะการทำงานของเซนเซอร์แบบกำเนิดเอง และแบบผสมสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับเทอร์โมคัปเปิลใช้วัดความแตกต่างอุณหภูมิ $\Delta T(t)$ และเอาท์พุท e.m.f $\phi(t)$ ซึ่งแสดงเป็นสมการได้

$$y(t) = F(x(t)) \quad (1.1)$$

หรือ
$$y(t) = F(\Delta T(t)) \quad (1.2)$$

โดยที่ $F(\Delta T(t))$ คือ คุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะของเซนเซอร์แบบ
กำเนิดสัญญาณ

ในกรณีของเซนเซอร์แบบผสมสัญญาณ สามารถเขียนเป็นสมการที่ซับซ้อนขึ้น

$$y(t) = F(x(t) + x_d) \quad (1.3)$$

โดย x_d เป็นแหล่งจ่ายพลังงานจากภายนอก เช่น กระแสหรือแรงดันไฟฟ้า

ไมโครเซนเซอร์แบบความร้อน (Thermal microsensors) ใช้ในการวัดปริมาณความร้อน เช่น อุณหภูมิ (T) การไหลของความร้อน (heat flux Q) และค่าความจุความร้อน (heat capacity C_T) อุณหภูมิเป็นคุณสมบัติพื้นฐานที่สำคัญที่สุดในการวัดปริมาณความร้อนหรือความร้อนในวัสดุ ค่าความจุความร้อนคือความสามารถเก็บความร้อนต่อหนึ่งหน่วยอุณหภูมิ (J/K) เปรียบได้กับตัวเก็บประจุไฟฟ้า (C) ความต้านทานความร้อน (R_T) คือความสามารถต้านทานการไหลผ่านความร้อน เปรียบได้กับตัวความต้านทาน (R) ดังนั้นอุณหภูมิและการไหลของความร้อนเปรียบได้กับความต่างศักย์ไฟฟ้า (V) และกระแส (I) ในระบบความร้อนไม่มีตัวเปรียบเทียบระบบไฟฟ้า ตัวเหนี่ยวนำ (L) แสดงดังตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติไฟฟ้าและความร้อน

ระบบ	ตัวแปร	องค์ประกอบ	กฎสแตติก	กฎไดนามิก
ไฟฟ้า	I, V	R, L, C	$q = C/V$	$V = IR$
ความร้อน	Q, T	R_T, C_T	$Q = C_T/T$	$T = Q/R_T$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัตถุประสงค์และขอบเขตของโครงการ

จากอดีตที่ผ่านมาเทอร์โมคัปเปิลมีความสำคัญ และมีประโยชน์มากในการวัดอุณหภูมิ สำหรับการประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ได้ใน โครงการ โดยโครงการนี้มีวัตถุประสงค์ดังนี้

1. ศึกษาโครงสร้างของเทอร์โมคัปเปิล
2. ศึกษาคุณสมบัติของเทอร์โมคัปเปิล
3. ศึกษาวิธีการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี CVD แบบลดความร้อน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

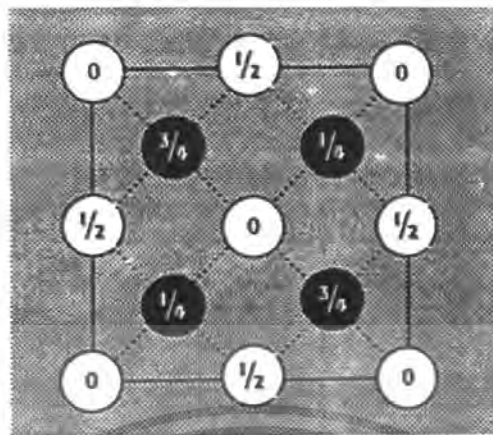
บทที่ 2

ทฤษฎี

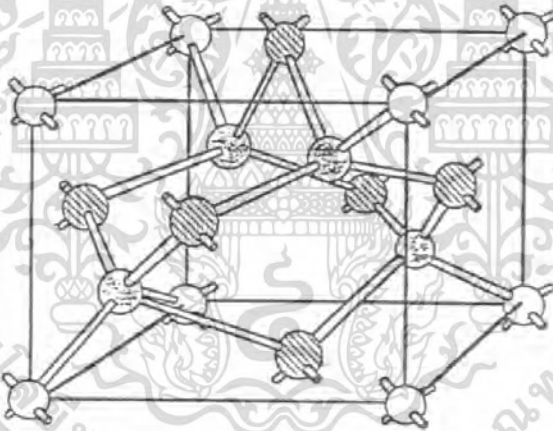
คาร์บอน เป็นธาตุที่อยู่ในหมู่ที่ 4 โดยทั่วไปแล้วเมื่อกล่าวถึงคาร์บอนเรามักจะนึกถึงถ่านอันเป็นรูปหนึ่งของคาร์บอนซึ่งพบได้ง่าย แต่แท้จริงแล้วคาร์บอนยังสามารถอยู่ในรูปอื่นได้อีก อาทิเช่น กราไฟต์หรือเพชร เป็นต้น ตลอดจนถึงปัจจุบันได้มีผู้สนใจศึกษาการสร้างและนำฟิล์มเพชรมาใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยเทคนิคในการสังเคราะห์นั้นจำเป็นต้องมีอะตอมคาร์บอนในระบบเพื่อที่จะทำให้เกิดฟิล์มเพชรขึ้นมา แต่ในบางครั้งก็พบว่าฟิล์มที่สังเคราะห์มาได้นั้น ไม่มีคุณสมบัติเป็นเพชร หรือมีคุณสมบัติของสารชนิดอื่นอยู่ด้วย เช่น กราไฟต์ อมอร์ฟัสคาร์บอน Microcrystalline carbon และ Lonsdaleite ซึ่งสารที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ก็คือรูปต่างๆของคาร์บอนนั่นเอง โดยสารแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันไปแล้วแต่ลักษณะโครงสร้างภายใน

2.1 Diamond (เพชร)

ในกรณีของธรรมชาติ อะตอมของคาร์บอนจะจับตัวเป็นโครงสร้างที่เรียกว่า “Diamond structure” ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูป 2.2 จากรูปพบว่า ภายในยูนิทเซลล์จะมีอะตอมคาร์บอน 6 อะตอมเรียงตัวแบบ Face center cubic (FCC) และอะตอมคาร์บอนอีก 4 อะตอม อยู่ในตำแหน่ง $\frac{1}{4}$ เมื่อวัดตามแนวทแยงมุมของยูนิทเซลล์ คาร์บอนแต่ละอะตอมจะจับตัวแบบ tetrahedral กับอะตอมคาร์บอนทั้งสี่ตัวที่อยู่รอบๆตัวมันเองด้วยพันธะโควาเลนต์แบบ sp^3 ในที่สุดจะได้ว่าใน Diamond structure นี้อะตอมของคาร์บอนจะจับตัวเป็นวงแหวนหกเหลี่ยม โดยอะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกันจะมีการเหลื่อมในตำแหน่งสูงและต่ำสลับกันจากระนาบ หรืออาจมองอีกอย่างหนึ่งว่า เป็นวงแหวนหกเหลี่ยมที่เกิดจากอะตอมคาร์บอนที่จับตัวกันเป็นระนาบ $\{111\}$ 2 อัน วางซ้อนทับกันอยู่ในลักษณะกลับหัวและอะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกันจะไม่อยู่ในระดับเดียวกัน รูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นระนาบ $\{111\}$ ของอะตอมคาร์บอนที่เป็นลายจุดและระนาบ $\{111\}$ ของอะตอมคาร์บอนที่เป็นลายขวางซ้อนกันเป็นรูปวงแหวนหกเหลี่ยม ความยาวแลตทิซอาจถูกมองว่าเป็นการเรียงกันเป็นชั้นๆของวงแหวนหกเหลี่ยม โดยที่แต่ละวงมีตำแหน่งตรงกัน ในทิศทางของระนาบ $\{111\}$ การเรียงลำดับชั้นจะเป็นแบบ ABC ABC ABC ...



รูปที่ 2.1 ตำแหน่งอะตอมใน cubic cell



รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกของเพชร

2.2 คุณสมบัติต่างๆของเพชร

2.2.1 คุณสมบัติทางกล

โครงสร้างของเพชรจะประกอบด้วยพันธะทางเคมีที่มีความแข็งแรง ดังนั้นเพชรจึงมีคุณสมบัติทางกลหลายๆอย่างที่พิเศษกว่าวัสดุชนิดอื่น เช่น เพชรจะมีความแข็ง Molar density และ Thermal conductivity สูง อีกทั้งเพชรยังมีความยืดหยุ่น และ Bulk modulus ต่ำกว่าวัสดุชนิดอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตลอดจนยังมีค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนต่ำมากคือมีค่าเพียง $0.8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ คุณสมบัติต่างๆ ทางกลของเพชรจะมีรายละเอียดดังนี้

- Thermal conductivity เพชรจะมีค่าสูงที่สุดในบรรดาวัสดุทั้งหมด คือ มีค่าถึง 20 watts/cm.K จะมีค่าลดลงเมื่อมีไนโตรเจนจำนวนมาก

- Molar heat capacity หมายความว่า ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำให้อุณหภูมิของหนึ่งน้ำหนักโมลของวัสดุใดๆ มีค่าเพิ่มขึ้น 1 องศา จะพบว่าค่าของเพชรมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับวัสดุอื่นๆ เหมาะสมที่จะนำมาใช้งานทางด้านกระจายความร้อนได้ดีเท่ากับ Heat sink

- Thermal expansion คือ ค่าอัตราส่วนของระยะทางที่ความร้อนที่อุณหภูมิใดๆ แพร่ไปถึง เทียบกับระยะทางที่เปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิเท่ากับ 0°C เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า Molar heat capacity

- Hardness เพชรเป็นสารที่มีความแข็งสูงที่สุดในบรรดาวัสดุทั้งหมดที่เรารู้จัก โดยจะมีค่าความแข็งสูงถึง $5,700 - 10,400 \text{ kg/mm}^2$ และยังมีคุณสมบัติทางกลอื่นๆ ที่ไม่ได้ยกตัวอย่างในที่นี้ เช่น ค่า Elastic wave, Young's modulus, Fracture toughness, Coefficient of friction และค่า Density

2.2.2 คุณสมบัติทางแสง

การพิจารณาคุณสมบัติทางแสงของเพชรส่วนใหญ่แล้ว จะพิจารณาจากค่าดัชนีหักเห และการดูดกลืนแสงที่อุณหภูมิ และความยาวคลื่นที่กำหนด

2.2.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

พิจารณาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเพชรในแง่ของสารกึ่งตัวนำ เพชรในทางธรรมชาติมีค่าสัมประสิทธิ์ของ Hall อยู่ในช่วง 10^{12} ที่อุณหภูมิ 140 K ถึง 10^5 ที่อุณหภูมิห้อง ค่าความคล่องตัว Hall ของโฮลของเพชรในทางธรรมชาติมีค่า $1800 \text{ cm}^2/\text{volt-sec}$ และอิเล็กตรอนมีค่า $2000 \text{ cm}^2/\text{volt-sec}$ สำหรับค่าความคล่องตัวของโฮล ที่ได้จากการสร้างเพชรที่อุณหภูมิห้อง 500°C วัดได้ $850 \text{ cm}^2/\text{volt-sec}$ ที่ความแรงสนามไฟฟ้ามีค่า 10^4 cm/sec ความเร็วครีฟของพาหะทั้งอิเล็กตรอนและโฮลจะเริ่มมีค่าอิมพัลส์สำหรับโฮลจะมีค่าความเร็วครีฟได้สูงสุด 10^7 cm/sec และ $2.1 \times 10^7 \text{ cm/sec}$ สำหรับอิเล็กตรอน สภาพต้านทานไฟฟ้าของเพชรในธรรมชาติมีค่าสูงถึง 10^{15} ohm-cm

2.2.4 คุณสมบัติของเพชรเมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น

สามารถสรุปข้อดีของเพชรที่เหมาะสมในการใช้งานเป็นสารกึ่งตัวนำได้ดังนี้

1. เพชรมีค่าแถบพลังงานต้องห้ามสูงกว่าซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนค์มาก จึงเหมาะสำหรับใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิสูงๆ
2. เพชรมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่ำ ทำให้สามารถทำงานได้ที่ความถี่สูง
3. ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของเพชรในธรรมชาติมีค่าสูงมาก ดังนั้นจึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานเป็นฉนวนไฟฟ้า ซึ่งค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้านี้สามารถเปลี่ยนค่าได้ตามต้องการ โดยเติมอะตอมสารเจือลงไป

2.3 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

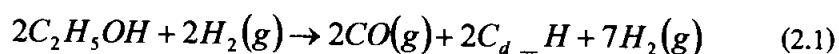
การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรสามารถทำได้หลายวิธี เช่น สังเคราะห์ด้วยระบบ CVD แบบหลอดความร้อน (Hot-Filament CVD) แบบคลื่นไมโครเวฟ (Microwave plasma CVD) แบบดีซีพลาสมา (DC Plasma CVD) และแบบคลื่นความถี่ (RF Plasma CVD) เป็นต้น โดยในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะวิธีการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธีการ CVD แบบหลอดความร้อน ซึ่งฟิล์มเพชรที่ได้จะมีคุณภาพดี ราคาต้นทุนต่อการสร้างต่ำ และยังสามารถสร้างได้ในบริเวณกว้าง โดยมีหลักการสังเคราะห์ดังนี้

1. ในระบบจะต้องมีอะตอมคาร์บอน

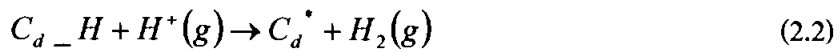
เนื่องจากการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร จะใช้อะตอมคาร์บอนเป็นปัจจัยในการเกิดผลึกเพชร โดยสามารถใช้ก๊าซไฮโดรคาร์บอน หรือแอลกอฮอล์เป็นแหล่งจ่ายคาร์บอน ซึ่งนอกจากจะได้อะตอมคาร์บอนแล้ว ในส่วนของก๊าซไฮโดรเจนและอนุโมลคาร์บอนที่เหมาะสม จะทำให้การเกิดของเพชรมีคุณภาพที่ดี

2. การกระตุ้นก๊าซให้เกิดอนุโมลคาร์บอน

การกระตุ้นก๊าซเฟสเพื่อให้แยกอะตอมของคาร์บอนออกมา นับว่าเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร โดยเราจะใช้ความร้อนจากหลอดความร้อนทั้งสแตนด์ เป็นตัวกระตุ้นให้อะตอมคาร์บอนแยกตัวออกจากอะตอมอื่น แล้วก่อตัวเป็นฟิล์มเพชรบนฐานรองที่เตรียมไว้ สมการเคมีแสดงการแตกตัวของก๊าซเป็นดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



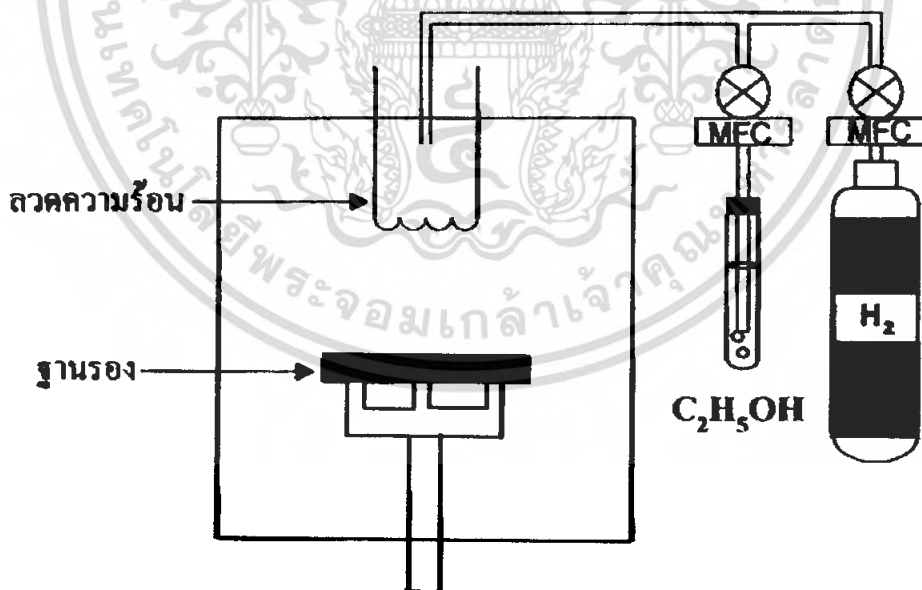
3. อุณหภูมิของฐานรองที่เหมาะสม

พิจารณาที่รูป 2.2 อุณหภูมิของฐานรองนั้นเกิดจากการถ่ายเทความร้อนจากหลอดความร้อนไปยังฐานรอง ดังนั้นระยะห่างระหว่างไส้หลอดความร้อนกับฐานรอง จะเป็นตัวกำหนดอุณหภูมิของฐานรอง ซึ่งมีส่วนสำคัญในการกำหนดรูปร่างของฟิล์มเพชร

4. การเตรียมพื้นผิวของฐานรอง

ฐานรอง (Substrate) มีความสำคัญมากต่อการเกิดนิวเคลียชันของเพชร โดยสามารถเลือกฐานรองได้หลายชนิด เช่น ซิลิคอน อลูมินา โมลิบดีนัม โดยทั่วไปมักใช้ซิลิคอน นำมาขัดผิวน้ำด้วยครีมเพชรให้มีลักษณะเป็นรอยขีดข่วน ทั้งนี้เพื่อป้องกันการเกิดนิวเคลียชันของผลึกเพชร ฟิล์มเพชรจะเริ่มต้นเกิดที่รอยขีดข่วน จากนั้นจึงเริ่มขยายขึ้นเรื่อยๆ

สรุปได้ว่า วิธีการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี CVD แบบหลอดความร้อนนี้ จะได้เพชรที่มีคุณภาพดีและอัตราการก่อตัวสูงพอสมควร อีกทั้งสิ่งเจือปนที่เกิดจากไส้หลอดมีน้อยมาก จนยอมรับให้ใช้ในงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ได้จนเป็นวิธีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมสร้างฟิล์มเพชร



รูปที่ 2.3 ภาพไออะแกรมระบบ CVD แบบหลอดความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ปรากฏการณ์ไฟฟ้าความร้อน (Thermoelectric Effect)

เป็นปรากฏการณ์ของความสัมพันธ์ของพลังงานความร้อนและไฟฟ้า เมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิที่ปลายวัสดุจะเกิดปรากฏการณ์ไฟฟ้าความร้อน ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ปรากฏการณ์คือ

1. ปรากฏการณ์ซีเบ็ค (Seebeck Effect)

เป็นปรากฏการณ์นี้สังเกตได้จากการทดลองเมื่อนำวัสดุตัวนำต่างกัน 2 ชนิด โดยการนำปลายทั้งสองมาเชื่อมต่อกัน และปลายทั้งสองถูกทำให้มีอุณหภูมิต่างกัน ทำให้เกิดกระแสไหลในวงจรโลหะ

2. ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier Effect)

เป็นปรากฏการณ์ที่กล่าวถึงวัสดุตัวนำต่างกัน 2 ชนิด ที่ปลายทั้งสองด้านถูกเชื่อมต่อกัน เมื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านรอยต่อที่ถูกเชื่อม โดยความร้อนจะถูกคายออกมาด้านหนึ่งและปลายอีกด้านหนึ่งดูดความร้อน ซึ่งจะขึ้นกับทิศทางการกระแสที่ไหล

3. ปรากฏการณ์ทอมสัน (Thomson Effect)

เป็นปรากฏการณ์ที่กล่าวถึงวัสดุตัวนำที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน เมื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุแท่งตัวนำ จะเกิดการดูดความร้อนและคายความร้อน

จากปรากฏการณ์ทั้งหมดที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ ปรากฏการณ์ซีเบ็คเป็นที่รู้จักกันดีและประยุกต์ใช้เป็นเทอร์โมคัปเปิลซึ่งถูกใช้วัดความแตกต่างของอุณหภูมิ ถึงแม้ว่าปรากฏการณ์เพลเทียร์จะได้รับความสนใจน้อยกว่าแบบแรก แต่ถูกประยุกต์ใช้ทำเป็นระบบทำความเย็นและระบบทำความร้อนที่ใช้โครงสร้างเดียวกัน ส่วนปรากฏการณ์ทอมสันได้รับความสนใจน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับสองปรากฏการณ์ที่กล่าวมาและไม่มีการประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติ

2.4.1 ปรากฏการณ์ซีเบ็ค (Seebeck Effect)

ปรากฏการณ์นี้ถูกค้นพบโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมันชื่อ โทมัส ซีเบ็ค (Thomas Seebeck) ในราวปี ค.ศ. 1822 พบว่าเมื่อนำโลหะสองเส้นชนิดต่างกันมาเชื่อมต่อปลายทั้งสองข้างเข้าด้วยกัน ซึ่งปลายจุดต่อทั้งสองมีอุณหภูมิต่างกันจะเกิดกระแสไหลในวงจรเส้นลวดทั้งสองตามรูปที่... ปริมาณการไหลของกระแสไฟฟ้านี้จะเปลี่ยนแปลงตามผลต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้งสอง และถ้าเปิดจุดต่อเชื่อมด้านหนึ่งออกจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Electromotive Force) ที่ปลายเปิด ซึ่งถูกเรียกว่า “เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)” แสดงดังรูปที่... โดยที่ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะเกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้งสองข้าง เมื่ออิเล็กทรอนิกส์ได้รับความร้อนจะทำให้อิเล็กทรอนิกส์เคลื่อนที่

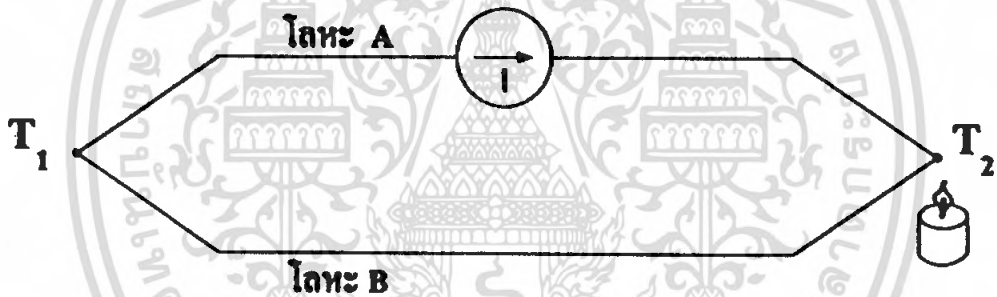
และไปสะสมอยู่ที่ปลายด้านที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ของเทอร์โมคัปเปิลได้ดังสมการที่ 2.3

$$V_{AB} = \alpha_{AB} (T_2 - T_1) \quad (2.3)$$

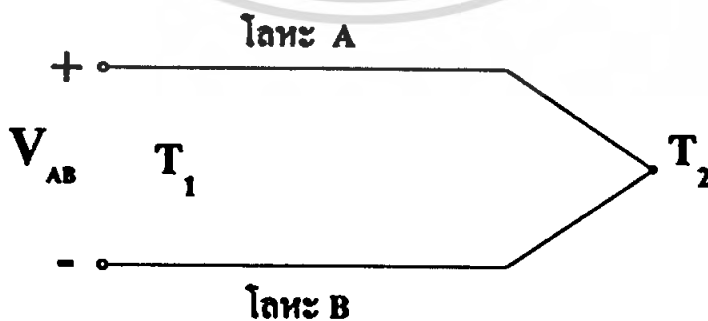
เมื่อ α_{AB} คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของซีเบ็ค (Seebeck Coefficient) ของวัสดุ เทียบกับวัสดุ B เป็นค่าคงที่ มีหน่วยเป็น V/K T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K) และ V_{AB} คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้า (Electromotive Force)

เมื่อนำเทอร์โมคัปเปิลมาใช้งานโดยการนำรอยต่อ AB ไปยังจุดที่ต้องการวัดอุณหภูมิและปลายอีกด้านหนึ่งอยู่ที่อุณหภูมิอ้างอิงหรืออุณหภูมิที่รู้ค่า ทำให้เทอร์โมคัปเปิลสามารถวัดอุณหภูมิได้

จากการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับเทอร์โมคัปเปิลดำเนินต่อมาจนเป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในวงการอุตสาหกรรม



รูปที่ 2.4 วงจรปิดจะเกิดกระแสไหลวน



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของเทอร์โมคัปเปิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1.1 กฎการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากความร้อน (Thermoelectric Laws)

1. กฎของวงจรโลหะชนิดเดียวกัน (Law of the Homogeneous Circuit)

เป็นวงจรที่ประกอบขึ้นด้วยโลหะชนิดเดียวกัน จะไม่เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า เมื่อเกิดความต่างของอุณหภูมิ ณ ปลายจุดทั้งสอง

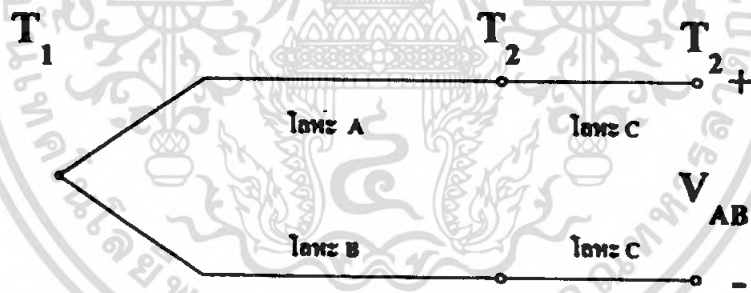
แรงเคลื่อนไฟฟ้าจะเกิดในกรณีที่ลวดทั้งสองเป็นโลหะต่างชนิดกันเท่านั้น แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้งสองข้าง

2. กฎของโลหะ (Law of Intermediate Metals)

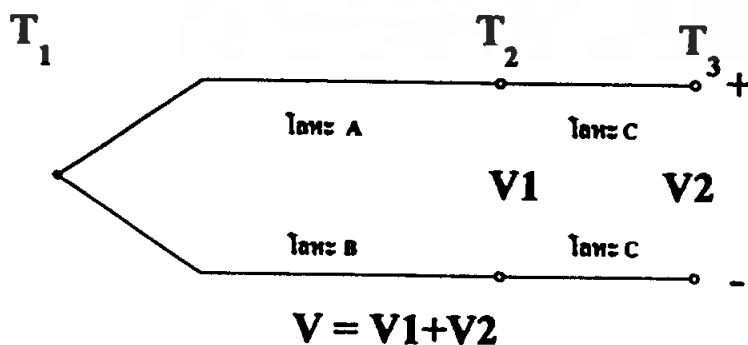
ในวงจรเทอร์โมคัปเปิล ถ้ามีโลหะแทรกอยู่ในส่วนหนึ่งส่วนใดของวงจร หากจุดต่อของปลายโลหะแทรกทั้งสองมีอุณหภูมิเท่ากันแล้ว โลหะที่แทรกนี้จะไม่มีผลต่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ในทางปฏิบัติมีอยู่เสมอ เช่น ข้อต่อ หรือลวดทองแดงที่ต่อเข้ากับขามิเตอร์ แสดงดังรูปที่ 2.6 โดยมีโลหะ C ที่ต่อแทรกอยู่ในวงจรจะไม่มีผลต่อการวัดถ้าอุณหภูมิที่ปลายทั้งสองเท่ากัน

3. กฎของอุณหภูมิแทรก (Law of Intermediate Temperature)

แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นโดยเทอร์โมคัปเปิลชุดใดๆ ที่มีอุณหภูมิที่จุดต่อต่างกัน จะมีค่าเท่ากับผลบวกทางพีชคณิตของแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเทอร์โมคัปเปิลชุดนั้น ตามรูปที่ 2.7 คือ ผลรวมของแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับผลรวมเทอร์โมคัปเปิลทั้งสองชุด



รูปที่ 2.6 โลหะแทรก



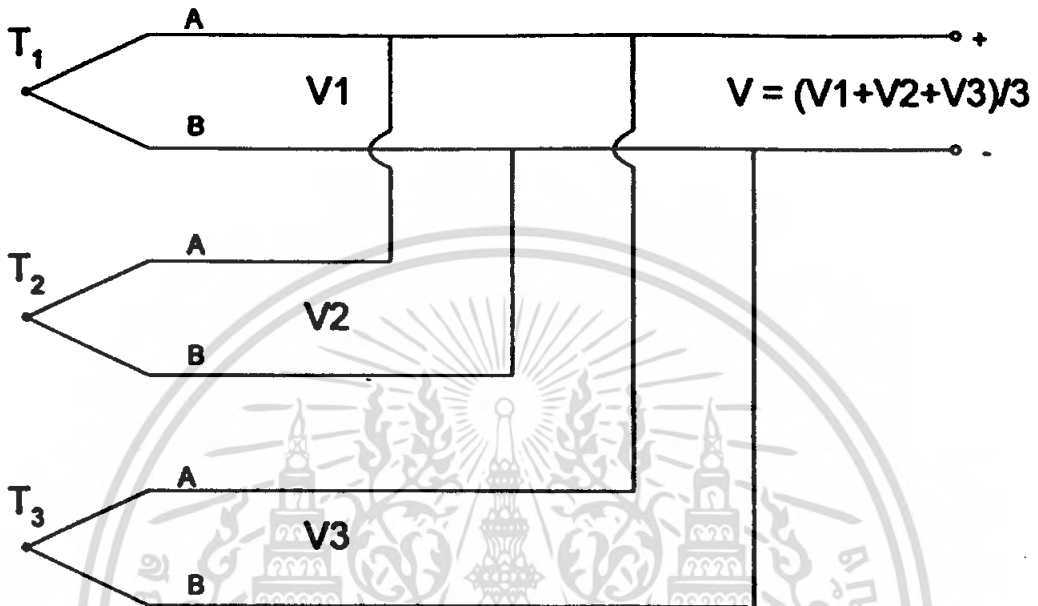
รูปที่ 2.7 กฎของการแทรกอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1.2 ผลของการนำเอาเทอร์โมคัปเปิลมาต่อกันจะได้ดังนี้

1. การนำเทอร์โมคัปเปิลมาต่อขนานกัน ผลที่ได้คือแรงดันเคลื่อนไฟฟ้าเฉลี่ย แสดงดังรูปที่

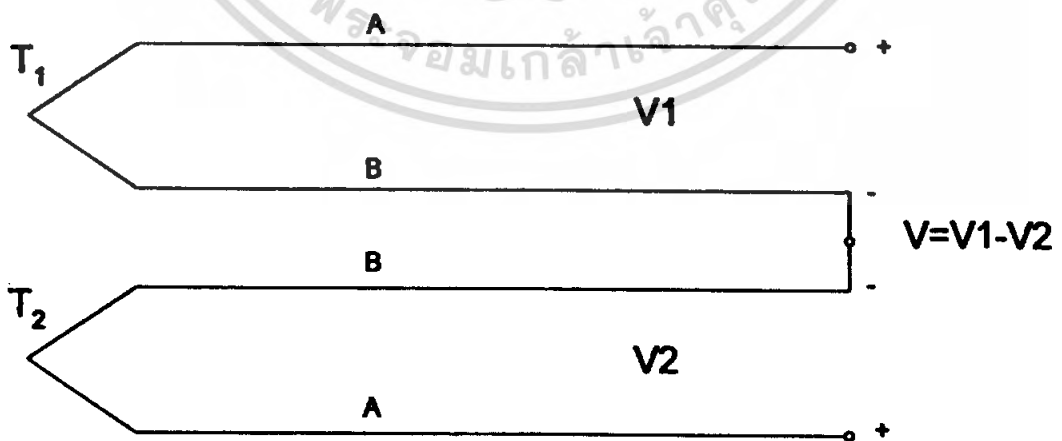
2.8



รูปที่ 2.8 การต่อขนานเทอร์โมคัปเปิล

2. การนำเทอร์โมคัปเปิลสองชุดมาต่อกลับขั้วกันจะให้ผลของเอาต์พุตลดลงแสดงดังรูปที่

2.9

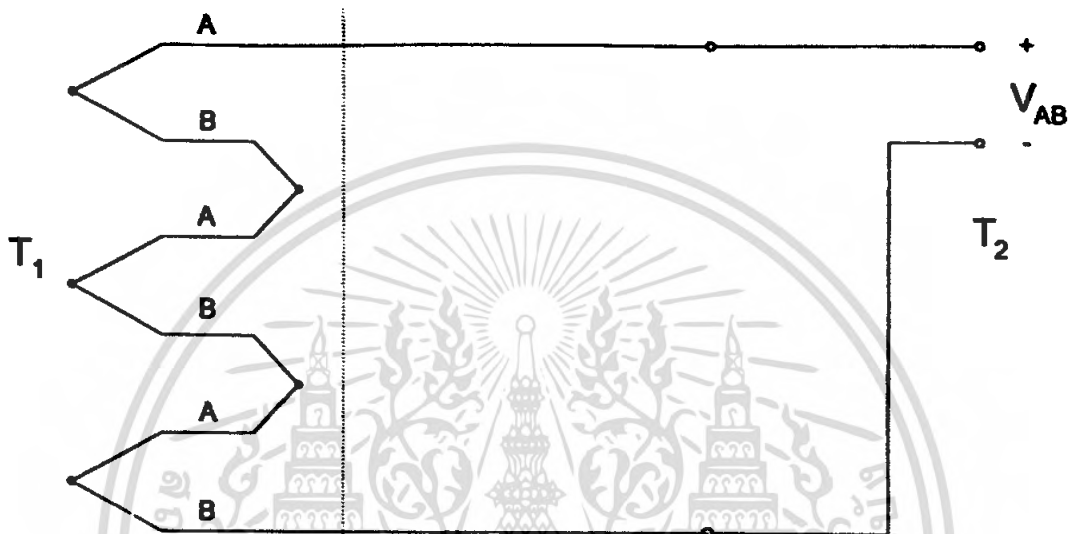


รูปที่ 2.9 การหาผลต่างกลับขั้วของเทอร์โมคัปเปิล

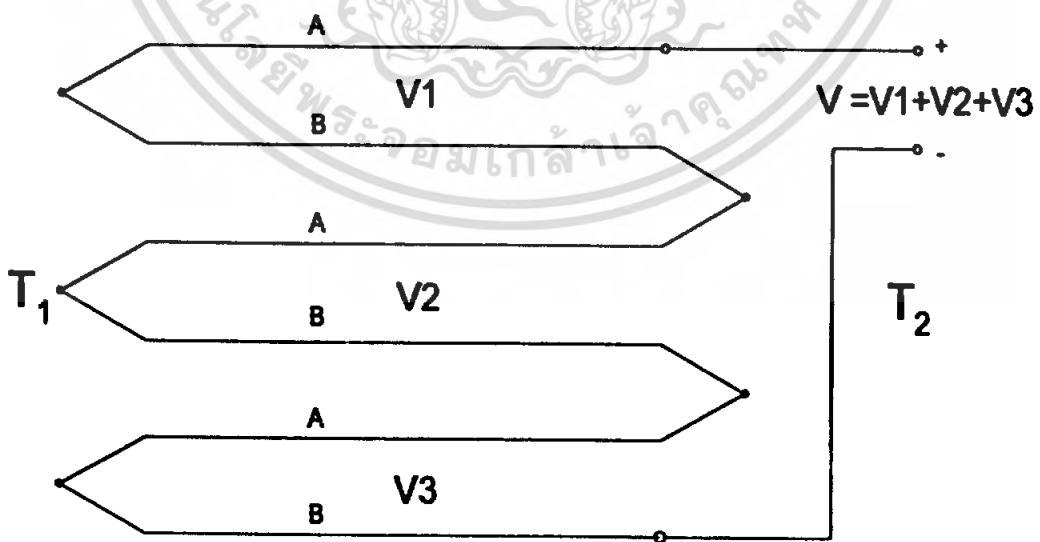
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การเพิ่มจำนวนเทอร์โมคัปเปิลมาต่อกัน จะไม่มีผลต่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.10

4. การนำเทอร์โมคัปเปิลมาต่ออนุกรมกัน จะได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าก็คือผลรวมของจำนวนเทอร์โมคัปเปิลแต่ละชุดมารวมกัน แสดงดังรูปที่ 2.11 ถูกเรียกว่า “เทอร์โมโพลี (Thermopile)”



รูปที่ 2.10 การต่อเทอร์โมคัปเปิลเพิ่มไม่มีผลต่อแรงเคลื่อนไฟฟ้า



รูปที่ 2.11 การต่ออนุกรมเทอร์โมคัปเปิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจุบันคุณสมบัติของปรากฏการณ์ซีเบ็คได้ถูกศึกษากันอย่างกว้างขวาง แต่อย่างไรก็ตาม การเกิดปรากฏการณ์ไฟฟ้าความร้อนยังไม่เพียงพอที่จะอธิบายโครงสร้างของอิเล็กทรอนิกส์และการกระเจิงของอิเล็กตรอน (electron scattering) ที่เป็นไปตามทฤษฎีและผลการทดลอง และบ่อยครั้งก็ไม่เป็นไปตามทฤษฎีและผลการทดลอง ดังนั้นการศึกษาปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ซีเบ็คนั้นต้องรู้การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัสดุเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามแท่งวัสดุจะมีการเปลี่ยนแปลงหลายอย่างดังนี้

ก. การเปลี่ยนแปลงระดับเฟอร์มิ (change of Fermi level)

ระดับเฟอร์มิจึงมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ทำให้ปลายทั้งสองมีระดับเฟอร์มิไม่เท่ากัน

ข. การเปลี่ยนช่องว่างแถบพลังงาน (band gap change)

ในสถานะของแข็งอิเล็กตรอนเท่านั้นที่สามารถมีพลังงานได้หลายสถานะ ในแถบพลังงานของโลหะจะมีอิเล็กตรอนอยู่เต็ม ในการตรงกันข้ามของสารกึ่งตัวนำและฉนวน โดยที่แถบวาเลนซ์จะมีอิเล็กตรอนอยู่เต็มและแถบคอนดักชันไม่มีอิเล็กตรอนอยู่เลย ความกว้างของแถบพลังงานขึ้นกับอุณหภูมิ ทำให้เกิดการไหลของประจุพาหะระหว่างปลายทั้งสองของแท่งวัสดุ

ค. การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของประจุพาหะ (change carrier concentration gradient change)

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของประจุพาหะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเป็นสาเหตุให้ความเข้มข้นของประจุพาหะเปลี่ยนไปส่งผลให้เกิดการแพร่ประจุพาหะ

ง. การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient change)

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอนุภาคมีความสัมพันธ์กับระยะการชนของอนุภาคและค่าความพร่องตัวของประจุพาหะ จากที่กล่าวมาความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเป็นสาเหตุของการแพร่ของประจุพาหะตามแท่งของวัสดุ

จ. การแพร่ของความร้อน (thermal diffusion)

พลังงานจลน์ของอนุภาคและประจุพาหะขึ้นกับอุณหภูมิ โดยที่ปลายด้านร้อนอนุภาคจะมีพลังงานสูงทำให้อนุภาคเคลื่อนที่จากบริเวณที่ร้อนไปยังบริเวณที่เย็นกว่าและจะมีการสะสมของอนุภาคและประจุพาหะที่ปลายทั้งของวัสดุ

ช. โฟนอนคราก (phonon drag)

เป็นการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะมีฟลักซ์ (flux) ความร้อนไหลตามแท่งวัสดุ ฟลักซ์ความร้อนจะถูกพาไปโดยประจุพาหะและโฟนอน โดยที่โฟนอนเป็นผลจากการสั่นของแลตทิซ (lattice) ทั้งประจุพาหะและโฟนอนจะมีความสัมพันธ์และอิทธิพลต่อกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซ. การสะสมของประจุพาหะ (change accumulation)

จากปรากฏการณ์ที่กล่าวมาข้างต้นเป็นสาเหตุของการสะสมของประจุพาหะที่อยู่ปลายทางทั้งสองของแท่งวัสดุจะมีขั้วประจุต่างกันเป็นผลให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าและสนามไฟฟ้า ในกรณีที่ป็นวงจรเปิดสนามไฟฟ้าจะอยู่ในสภาวะสมดุล จากปรากฏการณ์ทั้งหมดมีผลครอบคลุมค่าซีเบ็คของโลหะและสารกึ่งตัวนำ

2.4.1.3 ปรากฏการณ์ซีเบ็คในโลหะ (Seebeck effect in metal)

โลหะเป็นวัสดุตัวนำซึ่งมีอิเล็กตรอนเป็นพาหะที่นำไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดี ดังนั้นปรากฏการณ์ซีเบ็คเป็นคุณสมบัติของวัสดุทุกตัว แต่การวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คของวัสดุตัวนำต้องมีรอยต่อของวัสดุที่ต่างกันดังนั้นนิยามของซีเบ็ค คือ

$$\Delta V = \alpha_A \Delta T \quad (2.4)$$

α_A คือ ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คของโลหะ A และ ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้งสองของแท่งโลหะ A ดังนั้นความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คของโลหะต่างกันของโลหะ A และ B ถูกนิยามโดยสมการที่ (2.5) จะได้

$$\alpha_{AB} = \alpha_A - \alpha_B \quad (2.5)$$

ในการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คของโลหะตัวนำต่างๆ ต้องเลือกโลหะตัวใดตัวหนึ่งเป็นตัวอ้างอิงในการหาค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คโดยต้องมีค่าซีเบ็คต่างๆ P_c ถูกเลือกเป็นโลหะอ้างอิงในการวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คของโลหะต่างๆ และรู้คุณสมบัติเป็นอย่างดี ที่อุณหภูมิสูงๆ P_c มีเสถียรภาพดี แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของวัสดุ โดยที่จุดอ้างอิงอยู่ที่ 0 °C และจุดที่วัด 100 °C

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

สำหรับการพิจารณาในกรณีการเกิดปรากฏการณ์ซีเบ็คเนื่องจากการแพร่ของความร้อน เมื่ออิเล็กตรอนได้รับความร้อนที่ปลายแท่งโลหะทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานจลน์สูงขึ้นจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากบริเวณที่ปลายร้อนไปยังปลายเย็นเพราะว่าอิเล็กตรอนมีประจุไฟฟ้าเป็นลบทำให้ปลายด้านเย็นมีค่าเป็นลบและปลายด้านร้อนมีค่าเป็นบวก จะได้ผลค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คเป็นลบซึ่งเป็นไปตามผลที่คาดการณ์ไว้ แต่กลไกการแพร่ความร้อนยังไม่เพียงพอที่จะอธิบายปรากฏการณ์ที่ตารางที่ 2.1 เพราะว่าโลหะมีอิเล็กตรอนเคลื่อนที่อย่างอิสระแต่อย่างไรก็ตามยังมีโลหะบางชนิดมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คเป็นบวกและนั่นหมายถึงอิเล็กตรอนไปสะสมที่ปลายร้อนของแท่งโลหะ เพื่อให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับกระบวนการทางไฟฟ้าของโลหะทำให้เกิดปรากฏการณ์ซีเบ็ค คือ การเปลี่ยนแปลงระดับเฟอร์มิ การเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การแพร่ และการแพร่ของความร้อน ในสภาวะสมดุลของปรากฏการณ์จะถูกชดเชยด้วยสนามไฟฟ้าสาเหตุเนื่องมาจากการสะสมของประจุไฟฟ้าที่ปลายทั้งสองของแท่งโลหะ การเปลี่ยนอุณหภูมิทำให้ระดับเฟอร์มิเปลี่ยนแปลง เพราะกฎการแยกตัวเพาลี (Pauli exclusion principle) ที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์สถานะของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลง 82180 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานอยู่ต่ำกว่าระดับเฟอร์มิที่จะมีอิเล็กตรอนครอบครองอยู่และที่ระดับพลังงานที่สูงกว่า ระดับเฟอร์มิขึ้นไปจะมีแต่ความว่างเปล่า กล่าวคืออิเล็กตรอนมีพลังงานไม่เกินระดับเฟอร์มิ ที่อุณหภูมิใดๆ สถานะพลังงานของอิเล็กตรอนถูกควบคุมโดยฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มิไดเรค (fermi-dirac distribution function)

$$f_{ED}(E) = \frac{1}{1 + \exp\left[\frac{E - E_F}{kT}\right]} \quad (2.6)$$

โดยที่ k คือ ค่าคงที่ของโบลซ์แมน (Boltzmann) และ T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ เมื่ออุณหภูมิ 0 K ค่า $E_F(T)$ จะมีระดับพลังงานเท่ากับ $E_F(0)$ ในขณะที่อุณหภูมิเปลี่ยนไปจะทำให้ $E_F(T)$ มีระดับไม่เท่ากับ $E_F(0)$ มีผลให้มีอิเล็กตรอนสามารถอยู่ในระดับที่มีพลังงานสูงกว่าเดิมได้ อย่างไรก็ตามการอธิบายปรากฏการณ์เทอร์มิอิเล็กทริกเป็นเรื่องที่ละเอียดอ่อนและสำคัญมาก สำหรับการคำนวณหาจำนวนรวมอิเล็กตรอน n ตัวต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของโลหะซึ่งมีพลังงานอยู่ในช่วง E และ $E + dE$ เท่ากับจำนวนสถานะพลังงานต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (density of available energy state) $N(E)$ คูณกับฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มิไดเรคและทั้งหมดคูณอินทิเกรต

$$n = \int N(E) f_{FD}(E) dE \quad (2.7)$$

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

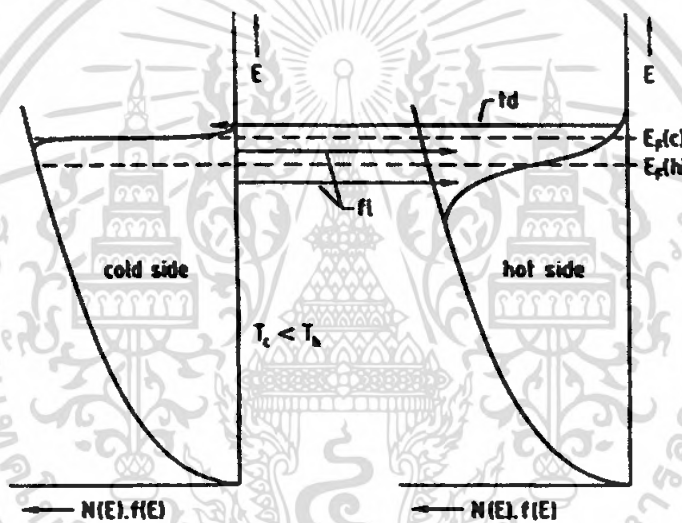
$$E_F(T) = E_F(0) - \frac{\pi^2 k^2 T^2}{12 E_E} \quad (2.8)$$

และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_F(T) = E_F(0) - \frac{\pi^2 k^2 T^2}{6E_E} \frac{d(\ln N(E))}{dE} \quad (2.9)$$

จากสมการอธิบายการลดลงของระดับเฟอร์มิเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ที่ปลายแท่งโลหะได้รับความร้อนมีผลให้ระดับเฟอร์มิอยู่ต่ำกว่าปลายด้านเย็นมีอิเล็กตรอนไหลจากปลายด้านร้อนไปยังปลายด้านเย็นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คเป็นบวกซึ่งตรงกันข้ามกรณีของการแพร่ของประจุพาหะเมื่อได้รับความร้อนแสดงดังรูปที่ 2.12

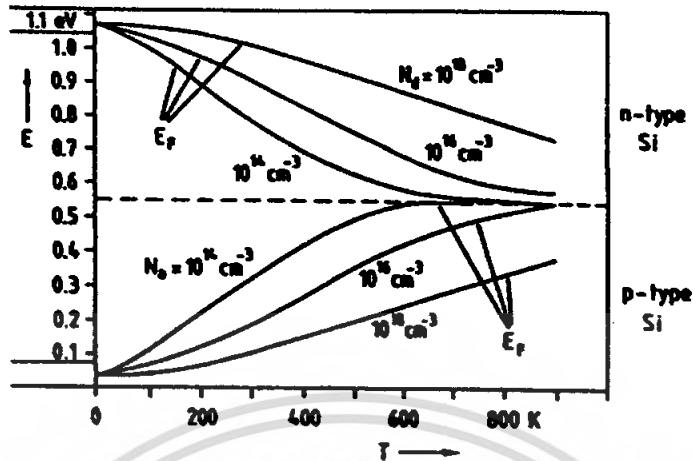


รูปที่ 2.12 การเปลี่ยนระดับเฟอร์มิและแพร่ของอิเล็กตรอน

2.4.1.4 ปราคฏการณ์ซีเบ็คในสารกึ่งตัวนำ

ในการเปรียบเทียบขนาดสัมประสิทธิ์ซีเบ็คระหว่างสารกึ่งตัวนำกับโลหะนั้นสารกึ่งตัวนำจะมีค่าสูงกว่าโลหะมาก เมื่อนำแท่งสารกึ่งตัวนำมาทำให้มีความแตกต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้งสองด้านจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับเฟอร์มิที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณความเข้มของสารเจือ แสดงดังรูปที่ 2.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ของตำแหน่งเฟอร์มิในช่วงแบนด์กับซิลิคอนที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารเจือ N_d และ N_a

จากรูปที่ 2.13 สามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลงของระดับเฟอร์มิ ปรากฏการณ์ไฟฟ้าความร้อนที่เกิดจากการเปลี่ยนระดับเฟอร์มิจะมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คมาก สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คเป็นลบและสารกึ่งตัวนำชนิดพีได้ค่าซีเบ็คเป็นบวก ดังนั้นการวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คสามารถใช้บอกชนิดและความเข้มข้นของสารเจือสารกึ่งตัวนำได้

สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ปลายด้านหนึ่งของแท่งเป็นสาเหตุทำให้มีประจุพาหะเพิ่มขึ้นเพราะว่า โสลและอิเล็กตรอนมีพลังงานเพิ่มขึ้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของโซลและอิเล็กตรอนที่ต่างกัน และขนาดของแถบพลังงานเองก็มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมิมีผลต่อตำแหน่งของเฟอร์มิ สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คสำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

$$\alpha(a) = \frac{1}{q} \frac{dE_F}{dT} = -\frac{k}{q} \left(\ln \frac{N_c}{N_d} + \frac{3}{2} \right) \quad (2.10)$$

โดยที่ N_c คือ ความหนาแน่นของสถานะพลังงานในชั้นของคอนดักชัน

N_d คือ ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ

k คือ ค่าคงที่โบลซ์แมน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการเปลี่ยนแปลงระดับเฟอร์มิมีผลที่ตามมา คือ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ประจุพาหะมีพลังงานจลน์เพิ่มขึ้นและเคลื่อนไปยังบริเวณที่เย็นกว่า นอกจากนั้นยังเกิดการกระเจิงของประจุพาหะซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิ ดังสมการ

$$\alpha(d) = -\frac{k}{q}(1+s) \quad (2.11)$$

โดยที่ s คือ ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการชนเฉลี่ยระหว่างการชนและพลังงานของประจุพาหะ

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะเกิดการไหลของโฟนอนจากปลายด้านร้อนไปด้านเย็น การสั่นของโฟนอนสามารถถ่ายเทโมเมนตัมของประจุพาหะทำให้เกิดการลาก (drag) ของประจุพาหะ แสดงดังสมการ

$$\alpha(f) = -\frac{k}{q}\phi \quad (2.12)$$

โดยที่ ϕ คือ ค่าโฟนอนคราก

สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นได้ค่าสัมประสิทธิ์ซีบี๊ครวมเป็น

$$\alpha = -\frac{k}{q} \left(\ln \frac{N_c}{N_d} + \frac{5}{2} + S_n + \phi \right) \quad (2.13)$$

สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดพีได้ค่าสัมประสิทธิ์ซีบี๊ครวมเป็น

$$\alpha = -\frac{k}{q} \ln \frac{N_v}{N_a} + \frac{5}{2} + S_p + \phi \quad (2.14)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

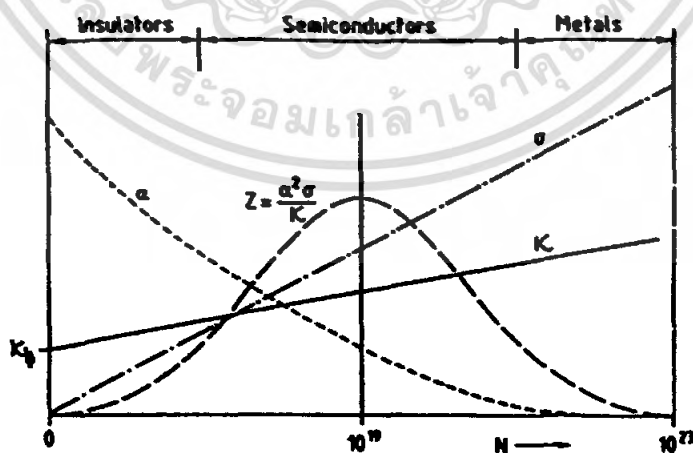
โดยที่ α คือ ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็ค

σ คือ ค่าความนำไฟฟ้า

K คือ ค่าการนำความร้อน

สำหรับประสิทธิภาพของ power converters ของวัสดุที่มีการนำไฟฟ้าสูงและการนำความร้อนต่ำจะทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิสูง แต่ในทางปฏิบัติคุณสมบัติการนำทั้งสองอย่างขึ้นตรงกับความหนาแน่นของประจุพาหะ สำหรับวัสดุที่เหมาะสมคือสารกึ่งตัวนำนี้สามารถเติมอะตอมสารเจือให้มีความเข้มข้นสูงเพราะว่าคุณสมบัติของวัสดุจะมีโฟนอนที่ทำให้ค่าการนำความร้อนลดลง จากรูปที่ 2.14 เป็นการเปรียบเทียบของฉนวน สารกึ่งตัวนำและโลหะ ความสำคัญของค่าคงที่ ที่ได้จากการคำนวณจาก figure of merit Z ได้แสดงความสัมพันธ์ของ Z และค่าความหนาแน่นของประจุพาหะ โดย K_0 คือ ค่าโฟนอน K คือ ค่าการนำความร้อนนี้ไม่ขึ้นกับความหนาแน่นของประจุพาหะ

จากความสัมพันธ์ของกราฟทำให้คาดการณ์ความสัมพันธ์ความหนาแน่นของประจุพาหะที่เพิ่มขึ้นและถ้าความหนาแน่นประจุพาหะเพิ่มขึ้นทำให้ค่า Z เพิ่มขึ้นด้วยเพราะว่าระดับของเฟอร์มิเปลี่ยนแปลงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คลดลงพร้อมกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารเจือ จากกราฟแสดงค่า Z สูงสุดในช่วงความหนาแน่นของสารเจือระหว่าง 10^{18} ถึง 10^{21} cm^{-3}



รูปที่ 2.14 การเปรียบเทียบของฉนวน สารกึ่งตัวนำและโลหะ

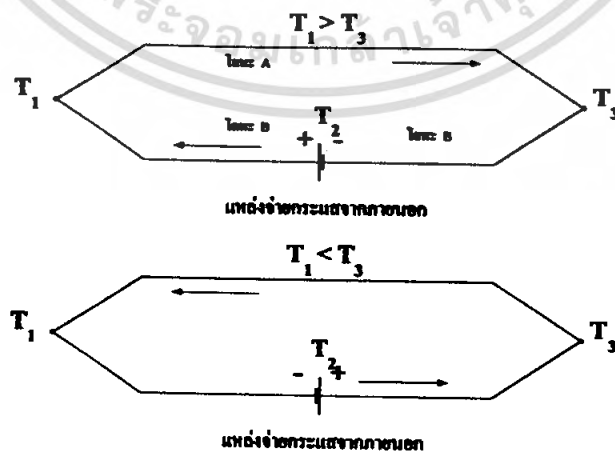
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier Effect)

ปรากฏการณ์นี้ถูกค้นพบโดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อ ฌอง ซี เอ เพลเทียร์ (Jean C.A. Peltier) ในปี ค.ศ. 1834 เมื่อนำวัสดุต่างชนิดกันนำปลายทั้งสองเชื่อมต่อกัน พบว่าเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในวงจร จะทำให้เกิดอุณหภูมิที่ปลายทั้งสองของจุดเชื่อมต่อแตกต่างกัน โดยที่ปลายด้านหนึ่งจะคลายความร้อนและอีกปลายด้านหนึ่งดูดความร้อน วงจรการทดลองของเพลเทียร์ แสดงดังรูปที่ 2.15 ถ้าเราเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสม ซึ่งเป็นไปได้ที่จะทำให้น้ำเป็นน้ำแข็งหรือเค็ลคที่จุดครอยต่อนั้น เพียงแต่เปลี่ยนทางการไหลของกระแสเท่านั้น ทำให้ได้รับความสนใจอย่างมาก เพราะเชื่อว่ามีสิทธิภาพ ซึ่งจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นเครื่องปรับอากาศในฤดูร้อนและเครื่องกำเนิดความร้อนในฤดูหนาว แต่อย่างไรก็ตามจากการทดลองพบว่าอุปกรณ์นี้มีประสิทธิภาพต่ำ จึงทำให้อุปกรณ์ของเพลเทียร์ได้รับความสนใจน้อยลง แต่ก็ยังมีการใช้อยู่ในระบบเล็กๆ ที่ใช้พลังงานน้อย เช่น ระบบทำความเย็นเฉพาะจุด ปรากฏเพลเทียร์เกิดขึ้นเนื่องจากพลังงานประจุพาหะที่เคลื่อนที่จากวัสดุ A ไปยังอีกวัสดุ B ซึ่งรอยต่อมีระดับพลังงานต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.16 อิเล็กตรอนซึ่งมีระดับพลังงาน E_a จะเคลื่อนที่เคลื่อนที่จากวัสดุ A ไปยัง B ทำให้อิเล็กตรอนจำเป็นต้องการพลังงานเพิ่มขึ้นโดยการดูดพลังงานเพื่อเพิ่มพลังงานให้กับอิเล็กตรอนให้มีพลังงานเท่ากับระดับพลังงาน E_b และเมื่ออิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากวัสดุ B ไปวัสดุ A ทำให้อิเล็กตรอนต้องคายพลังงานออกมา ซึ่งจะทำให้หาความสัมพันธ์ความหนาแน่นของกระแส (J) ที่รอยต่อวัสดุ A และ B ได้ดังนี้

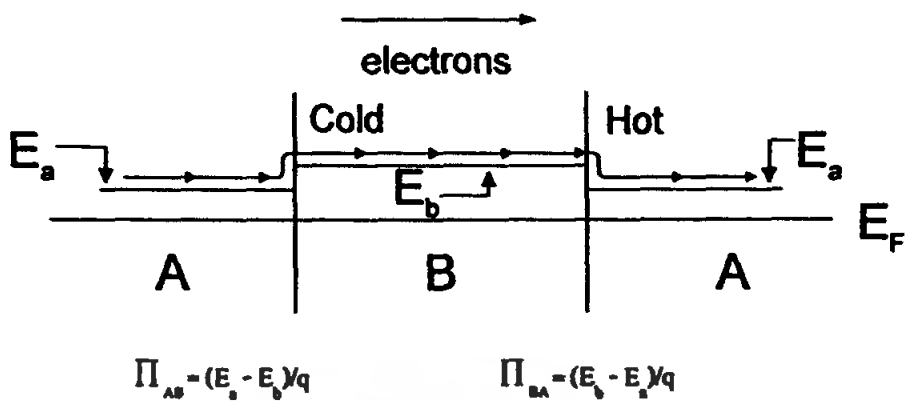
$$J_a - J_b = \Delta J_h = n_a E_a v_a - n_b E_b v_b \quad (2.16)$$

เพราะว่ากระแสไหลผ่านวัสดุ A และ B จะมีค่าเท่ากันและ q คือ ประจุของอิเล็กตรอน



รูปที่ 2.15 วงจรการทดลองของเพลเทียร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 ปรากฏการณ์เพลเทียร์ที่รอยต่อของวัสดุตัวนำ

$$J_e = n_a q v_a = n_b q v_b \quad (2.17)$$

$$\Delta J_h = \frac{J_e}{q} (E_a - E_b) \quad (2.18)$$

ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ของเพลเทียร์ (Peltier coefficient) Π_{ab} ระหว่างวัสดุ 2 ชนิด คือ ปริมาณความร้อนที่ดูดหรือคายต่อหนึ่งหน่วยกระแส

$$\Pi_{ab} = \frac{\Delta J_h}{J_e} = \frac{1}{q} (E_a - E_b) \quad (2.19)$$

2.4.3 ปรากฏการณ์ทอมสัน (Thomson Effect)

ตามกฎความร้อนของจูล เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุตัวนำจะทำให้เกิดความร้อน อย่างไรก็ตามสำหรับแท่งวัสดุตัวนำที่มีอุณหภูมิตลอดทั้งแท่งไม่เท่ากัน เพราะที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน เมื่อให้กระแสไหลผ่านจะทำให้พลังงานของประจุพาหะมีความสัมพันธ์กับตำแหน่งบนแท่งวัสดุตัวนำ การเปลี่ยนแปลงของพลังงานของประจุพาหะจะสัมพันธ์กับการสั้นของแลตทิซบนแท่งวัสดุ ซึ่งประจุพาหะอาจดูดความร้อนหรือคายความร้อนให้กับแลตทิซ ดังนั้นปรากฏการณ์ทอมสัน แสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$\Delta J_h = \gamma \Delta T J_e \quad (2.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ ΔJ_h คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนที่ดูดหรือคาย
 γ คือ สัมประสิทธิ์ของทอมสัน (Thomson coefficient)
 ΔT คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิ
 J_e คือ ความหนาแน่นของกระแส

2.5 การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer)

ในทางเทอร์โมไดนามิกส์ (thermodynamic) ลักษณะของพลังงานนั้นจะระบุสถานะของระบบ โดยเป็นที่ทราบกันดีว่าพลังงานจะสร้างขึ้นใหม่หรือทำลายไม่ได้ เพียงแต่มีความสามารถเปลี่ยนจากรูปหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่งได้ ดังนั้นความรู้ทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่เกี่ยวข้องสัมพันธ์ระหว่างความร้อนและรูปแบบอื่นๆ ของพลังงาน แต่ความรู้เกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์หาอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในระบบ การถ่ายเทพลังงานในแง่ของความร้อนนั้นไม่สามารถที่จะวัดได้โดยตรง แต่สามารถพิจารณาได้จากวิธีการทางฟิสิกส์เพราะว่าความร้อนเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สามารถวัดได้โดยการสังเกต พบว่าเมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิขึ้นในระบบแล้วจะมีการไหลของความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า เนื่องจากการไหลของความร้อนจากบริเวณเกิดขึ้นได้เมื่อไรก็ตามที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิในระบบ ดังนั้นความรู้เกี่ยวกับการกระจายของอุณหภูมิในระบบจึงจำเป็นมาก ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและถ้าทราบการกระจายตัวของอุณหภูมิ ทำให้สามารถหาฟลักซ์ความร้อน (heat flux) ซึ่งเป็นค่าของปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อหนึ่งหน่วยเวลาได้ จากกฎหรือสมการซึ่งเกี่ยวข้องระหว่างฟลักซ์ความร้อนกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

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

การถ่ายเทความร้อน คือ การเคลื่อนที่ของความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า สามารถแยกพิจารณาได้เป็น 3 แบบ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระจายของอุณหภูมิในตัวกลางหนึ่งจะถูกควบคุมโดยอิทธิพลรวมของการถ่ายเทความร้อนทั้ง 3 แบบตามที่กล่าวมา แต่ความเป็นจริงนั้นไม่สามารถจะแยกแบบหนึ่งแบบใดได้โดยสิ้นเชิงจาก 3 แบบ อย่างไรก็ตามเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์จะแยกพิจารณาเป็นแบบใดแบบหนึ่งได้

2.5.1 การนำความร้อน (Conduction)

การนำความร้อน เป็นรูปหนึ่งของการถ่ายเทความร้อน ในลักษณะของการแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง ไปยังที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยเคลื่อนที่แบบจลน์ (kinetic motion) หรือเป็นการชนกันโดยตรงของโมเลกุลซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นในการไหลที่หยุดนิ่ง ส่วนในกรณีของโลหะนั้นจะมีการไหลของกระแสอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นมา สำหรับของแข็งที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี จะมีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระมากมายเคลื่อนไหวอยู่ภายใน โครงสร้างของโมเลกุล (Lattice) ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าวัตถุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีจะเป็นตัวนำความร้อนที่ดีตามไปด้วย ยกตัวอย่างเช่น ทองแดง เงิน เหล็ก เป็นต้น อันเป็นผลจากการนำหรือถ่ายเทพลังงานความร้อนโดยอิเล็กตรอนเหล่านี้

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

$$Q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.21)$$

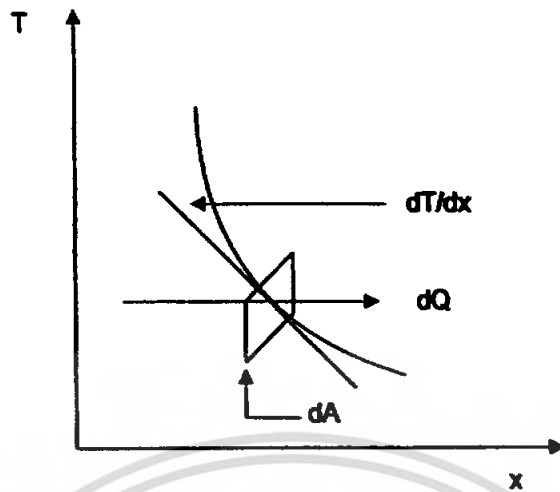
โดยที่ Q_x คือ อัตราการนำความร้อนผ่านพื้นที่ A ในทิศทางบวก x

k คือ ค่าสภาพการนำความร้อนของวัตถุ (thermal conductivity of material)

A คือ พื้นที่ที่ความร้อนเคลื่อนผ่านและตั้งฉากกับทิศทางของ x

$\frac{dT}{dx}$ คือ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับระยะทาง

จากสมการที่ (2.21) เครื่องหมายลบแสดงว่าความร้อนที่ไปในทิศทางที่อุณหภูมิลดลง แสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การนำความร้อนผ่านของแข็งที่มีพื้นที่ A

สมการของฟูรีเยร์อาจเขียนอยู่ในรูปของอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

$$q_x = \frac{Q_x}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.22)$$

สมการ $Q_x = -k \frac{dT}{dx}$ แสดงว่าความร้อนเคลื่อนที่ในทิศทางของ x โดยที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงในทิศทางของ x เท่านั้น โดยทั่วไปแล้ว อุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงทั้งสามทิศทางคือเปลี่ยนแปลงในทิศทาง x , y และ z ตามลำดับ ดังนั้นการเคลื่อนที่ของความร้อนจึงเกิดขึ้นทั้งสามทิศทาง โดยการสมมติว่าตัวกลางที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน มีค่านำความร้อน (k) คงที่ อัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งสามทิศทางสามารถหาได้จากสมการของฟูรีเยร์ดังนี้

$$q_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.23)$$

$$q_y = -k \frac{dT}{dy} \quad (2.24)$$

$$q_z = -k \frac{dT}{dz} \quad (2.25)$$

หรือสามารถเขียนให้อยู่ในรูปต่างๆไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$q = -k\nabla T \quad (2.26)$$

∇ คือ 3-d grad operator

ในการวิเคราะห์การนำความร้อนก็เพื่อที่จะหาสนามของอุณหภูมิ (temperature field) ในตัวกลางหนึ่งซึ่งเป็นผลจากเงื่อนไขซึ่งสอดคล้องกับขอบเขตสนามของอุณหภูมินั้นคือ ต้องการทราบการกระจายของอุณหภูมิ (temperature distribution) เมื่อทราบค่านี้ก็จะสามารถหาพลັกซ์ความร้อนที่จุดใดๆ ในตัวกลางนั้นได้ จากกฎของฟูริเยร์ (Fourier's law) การหาค่านี้ทำได้โดยการใช้กฎพลังงาน (energy conservation) กับปริมาตรควบคุมดิฟเฟอเรนเชียล (differential) ซึ่งระบุกระบวนการถ่ายเทพลังงาน และใช้สมการอัตราที่เหมาะสม ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นสมการดิฟเฟอเรนเชียลซึ่งคำตอบของมันจะให้การกระจายอุณหภูมิและการกระจายตัวของอุณหภูมิ $T(x,y,z)$ กำหนดในพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinates) โดยกำหนดปริมาตรควบคุมเล็กๆ $dx dy dz$ ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแล้วการนำความร้อนก็จะเกิดขึ้นข้ามแต่ละอันของผิวควบคุม อัตราการนำความร้อนนี้จะตั้งฉากกับผิวควบคุมแต่ละอันที่ตำแหน่ง โคออร์ดิเนต x, y, z จากกฎทรงพลังงาน อัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานของปริมาตร เท่ากับผลรวมของอัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงาน

$$\left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \frac{q_g}{k} = c_p \rho \left[\frac{\partial T}{\partial t} \right] \quad (2.27)$$

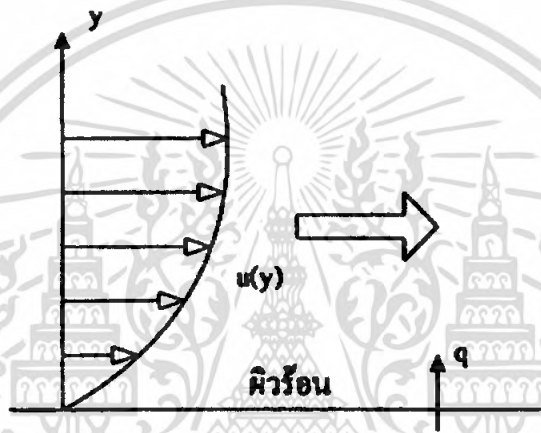
สมการนี้เรียกว่า ฟูริเยร์ฟิลด์อีควชัน (Fourier field equation) และ q_g คือ อัตราการเกิดความร้อนภายใน

2.5.2 การพาความร้อน (Convection)

เมื่อของไหลไหลผ่านวัตถุที่เป็นของแข็งหรือไหลผ่านภายในช่องทางการไหล โดยที่อุณหภูมิของของไหลและผิวของของแข็งมีค่าแตกต่างกัน การถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลและผิวของของแข็งจะเกิดขึ้นเมื่อของไหลเคลื่อนที่สัมผัสกับผิวของของแข็ง กลไกของการถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า “การพาความร้อน” ถ้าการเคลื่อนที่ของของไหลเกิดขึ้นโดยการทำขึ้นเอง โดยใช้ปั๊มหรือพัดลมทำให้เกิดแรง (forced convection) ถ้าการเคลื่อนที่ของของไหลมีผลกระทบ ซึ่งมีผลจากความแตกต่างของความหนาแน่นที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิภายในของไหล การถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า การพาความร้อนแบบอิสระ หรือการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (free or natural convection) เช่น ปล่องควันที่วางอยู่ในแนวตั้งไว้ในอากาศเย็นที่หุบคั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูเห็นข้อความนี้จะเห็นว่าเป็นการคัดลอกโดยไม่ผ่านการคัดลอก หรือการนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ผ่านการคัดลอก

ชั้นของอากาศที่ติดกับพื้นผิวของวัตถุจะมีการเคลื่อนที่เพราะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในอากาศ เป็นผลทำให้การเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้อากาศเกิดการเคลื่อนที่ โดยการเคลื่อนที่ของของไหลมีผลกระทบต่อสนามของอุณหภูมิในของไหล การคำนวณหาการกระจายของอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนแบบการพาในทางปฏิบัติเป็นเรื่องที่สลับซับซ้อนมากในทางวิศวกรรมศาสตร์ เพื่อให้การคำนวณหาการถ่ายเทความร้อนง่ายขึ้นระหว่างผิวที่ร้อน T_w และอุณหภูมิของของไหลเย็นที่ไหลผ่านบนผิวที่อุณหภูมิ T_f ตามที่แสดงในรูป 2.18 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) จากกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of Cooling) ถูกกำหนดเป็น



รูปที่ 2.18 การพาความร้อนจากผิววัสดุ

$$q = h[T_w - T_f] \quad (2.28)$$

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

$$q = h[T_f - T_w] \quad (2.29)$$

โดยที่ q เป็นฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทจากของไหลที่ร้อนไปที่เย็น

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h (Convective heat transfer coefficient) จะมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามชนิดของการไหล รูปทรงของวัตถุ พื้นที่ของการไหลผ่าน คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของ

ของไหลอุณหภูมิเฉลี่ย และตำแหน่งต่างๆตามพื้นผิวของวัตถุ นอกจากนี้ยังขึ้นกับกลไกของการถ่ายเทความร้อนว่าเป็นพาความร้อนแบบบังคับหรือการพาความร้อนแบบธรรมชาติ

2.5.3 การแผ่รังสี

การแผ่รังสีความร้อน คือ พลังงานที่ถูกส่งออกไปโดยสารซึ่งอยู่ที่อุณหภูมิจำกัดแน่นอนจนถึงแม้ว่าจะเน้นการแผ่รังสีจากผิวของวัตถุแข็งก็ตาม การส่งออกของรังสีอาจเกิดขึ้นได้จากของเหลวและก๊าซด้วย โดยไม่คำนึงถึงรูปแบบของสาร การแผ่รังสีออกของรังสีเชื่อว่าเป็นการเปลี่ยนการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนขององค์ประกอบของอะตอมหรือโมเลกุล พลังงานของสนามการแผ่รังสีนั้นจะถูกนำออกไปโดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือเรียกว่าโฟตอน ในขณะที่การถ่ายเทพลังงานโดยการนำ หรือการพาต้องการวัตถุตัวกลาง แต่การแผ่รังสีไม่ต้องการตัวกลาง ในความเป็นจริง การถ่ายเทโดยการแผ่รังสีเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด ในสุญญากาศ

ค่าฟลักซ์ความร้อนสูงสุดที่ซึ่งการแผ่รังสีถูกส่งออกไปได้จากพื้นผิวหนึ่งกำหนดโดยกฎของสเติเฟน โบลซ์แมน (Stefan-Boltzmann Law)

$$q = \sigma T_s^4 \quad (2.30)$$

โดยที่ T_s คือ ค่าอุณหภูมิสัมพัทธ์ (K) ของผิว

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

โดยที่ผิวนั้นจะเรียกว่า ตัวแผ่รังสีอุดมคติหรือวัตถุดำ (blackbody) ฟลักซ์ความร้อนซึ่งถูกส่งออกโดยผิวจริงจะน้อยกว่าที่ส่งออกจากตัวแผ่รังสีอุดมคติ (ideal radiator) ได้เป็น

$$q = \epsilon \sigma T_s^4 \quad (2.31)$$

บทที่ 3

การออกแบบและกระบวนการสร้าง

การออกแบบและสร้างต้นแบบ จะต้องพิจารณาโครงสร้างและทฤษฎี แล้วจึงนำคุณสมบัติของเทอร์โมคัปเปิลมาออกแบบให้มีขนาดความกว้างยาว และระยะห่างระหว่างแถบสารเจือ เพื่อให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการ และเมื่อได้ลวดลายต้นแบบแล้วจึงนำมาผลิตเป็นกระจกมาสก์ โดยการถ่ายย่ส่วนเพื่อใช้ในกระบวนการสร้าง หลังจากนั้นจะนำเข้ากระบวนการที่เป็นลำดับขั้นตอนที่มาตรฐานของการสร้างเทอร์โมคัปเปิล เช่น การทำความสะอาดแผ่นผลึกเริ่มแรก กระบวนการสร้างเพชร กระบวนการกัดฐานรองเพื่อสร้างโคอะแฟรม เป็นต้น ซึ่งเมื่อจบขั้นตอนต่างๆแล้ว จึงนำมาทำการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของเทอร์โมคัปเปิล

3.1 การออกแบบโคอะแฟรม

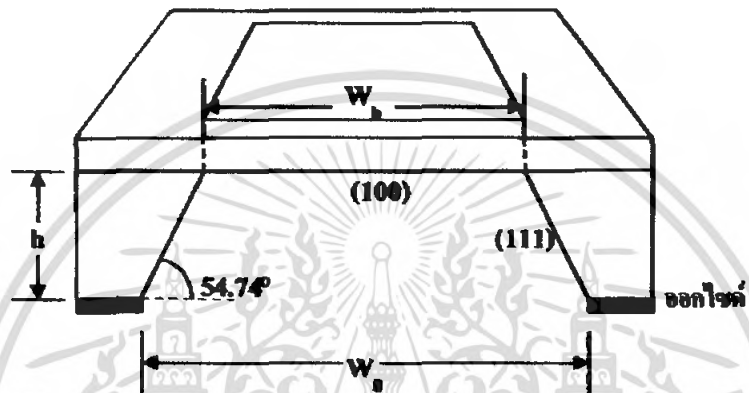
โครงสร้างของซิลิโคนฟิล์มเพชรประกอบด้วยโคอะแฟรมบางของฟิล์มเพชรเป็นส่วนสำคัญ ด้วยเหตุนี้การกัดซิลิโคนบางส่วนออกเพื่อให้เหลือเป็นโคอะแฟรมของฟิล์มเพชรจึงเป็นขั้นตอนสำคัญในการสร้างอุปกรณ์ โคอะแฟรมของฟิล์มเพชรเกิดจากการกัดฐานรองซิลิโคนระนาบ (100) ออกโดยสารละลายที่มีลักษณะการกัดเป็นแบบแอนไอโซโทรปิก (anisotropic) คือการกัดที่ตัวกัด (etchant) ซึ่งอยู่ในรูปของสารละลายจะกัดเนื้อสารในทิศทางหรือระนาบต่างๆของผลึกไม่เท่ากัน ดังแสดงในรูป 3.1

ดังนั้นการออกแบบปากหลุมจึงมีความสัมพันธ์กับความกว้างของกันหลุม ถ้าเปิดปากหลุมกว้างเท่ากับ W_0 และทำการกัดได้ลึกเท่ากับ h จะได้ขนาดความกว้างกันหลุม W_b ดังสมการ

$$W_b = W_0 - \frac{2h}{\tan(54.74^\circ)} \cong W_0 - \sqrt{2}h \quad (3.1)$$

ถ้าต้องการความกว้างกัน 2000 ไมครอน และแผ่นซิลิโคนมีความหนา 430 ไมครอน ดังนั้นต้องเปิดปากหลุมเท่ากับ $W_0 = 2000 + \sqrt{2}(430) = 2391$ ไมครอน

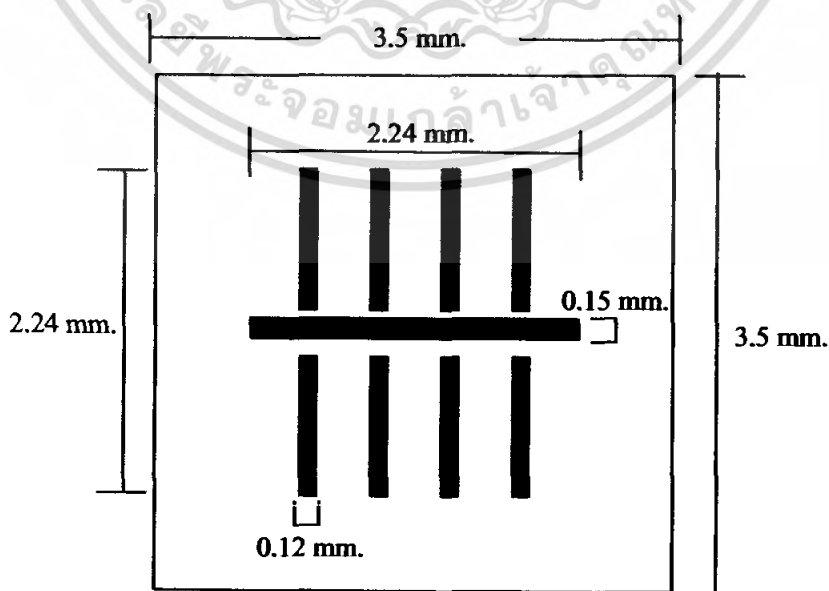
ในการทดลองเราใช้สารละลายที่เกิดจากการผสมระหว่างเอทิลีนไดอะมีน (Ethylenediamine) กับไพโรแคทีคอล (Pyrocatechol) และน้ำบริสุทธิ์ (DI water) หรือที่นิยมเรียกว่า EPD โดยมีอัตราส่วน E 50 ml : P 8 g : DI 16 ml ทำการกัดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส กวนสารละลายด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที มีอัตราการกัดซิลิคอนประมาณ 1.50 ไมครอนต่อนาที ใช้ชั้นออกไซด์หนาประมาณ 7000 อังสตรอม เป็นชั้นป้องกันการกัดซิลิคอน โดยสารละลาย EPD จะไม่กัดฟิล์มเพชร



รูปที่ 3.1 ภาพตัดขวางแสดงลักษณะการกัดแบบแอนไอโซโทรปิก

3.2 การออกแบบเทอร์โมคัปเปิล

ในการออกแบบเทอร์โมคัปเปิลจะกำหนดขนาดความกว้างยาวในการสร้างฟิล์มเพชร และระยะห่างระหว่างฟิล์มเพชร โดยมีขนาดความกว้างยาวดังรูปที่ 3.2

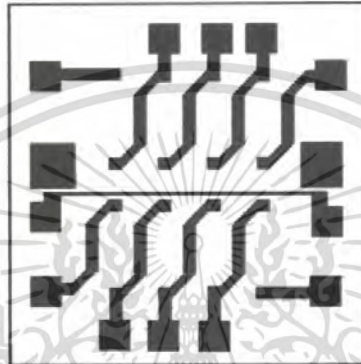


รูปที่ 3.2 การออกแบบเทอร์โมคัปเปิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การออกแบบแถบโลหะและไมโครฮิตเตอร์

ในการออกแบบแถบโลหะและไมโครฮิตเตอร์จากไททานเนียมและทอง จะกำหนดให้มีขนาดความกว้างยาวต่างกันคือ ในการสร้างแถบโลหะจะมีขนาดเท่ากับขนาดของเทอร์โมคัปเปิล ซึ่งออกแบบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าดังรูปที่ 3.3 ส่วนการสร้างไมโครฮิตเตอร์จะมีขนาดกว้างยาวคือ $0.04 \times 2.24 \text{ mm}$ ดังรูปที่ 3.4

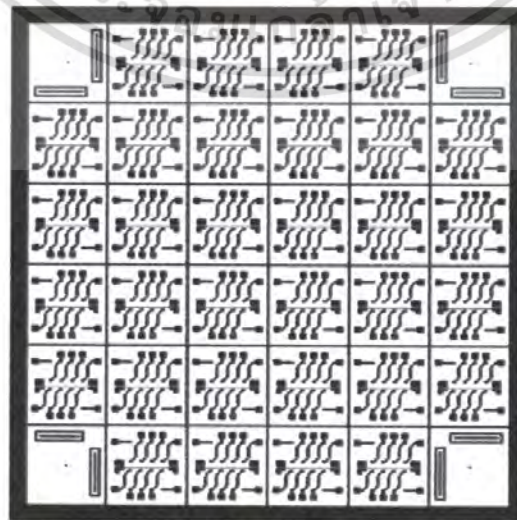


รูปที่ 3.3 การออกแบบแถบ โลหะ

$W \times L = 0.04 \times 2.24$



รูปที่ 3.4 การออกแบบ ไมโครฮิตเตอร์

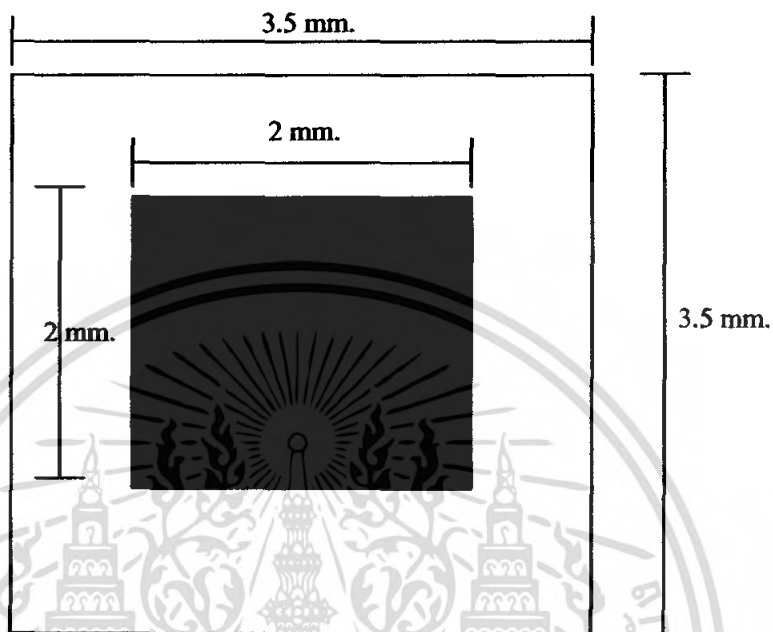


รูปที่ 3.5 มาส์ก

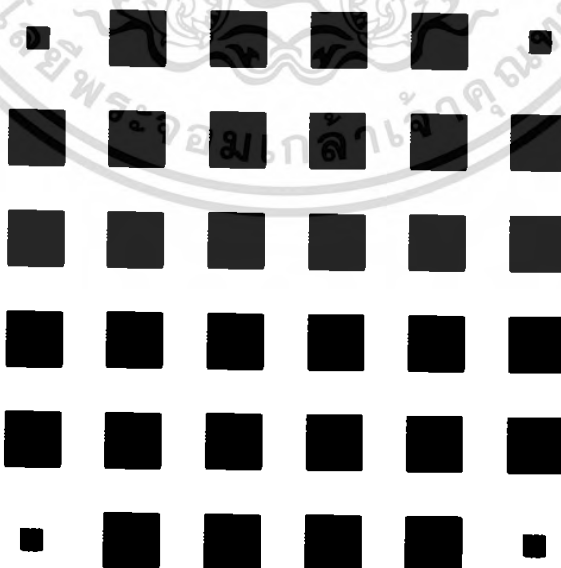
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานรูปที่ 3.5 มาส์ก เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การออกแบบหลุมในการกัด

การออกแบบหลุมในการกัดเพื่อให้ฐานรองเป็นโคอะเฟรมบาง จะออกแบบให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด ดังรูปที่ 3.6

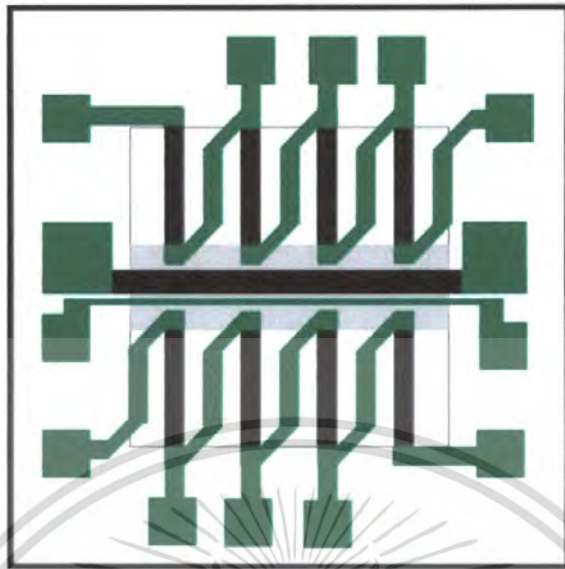


รูปที่ 3.6 การออกแบบ ไมโครฮีดเตอร์



รูปที่ 3.7 โคอะเฟรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

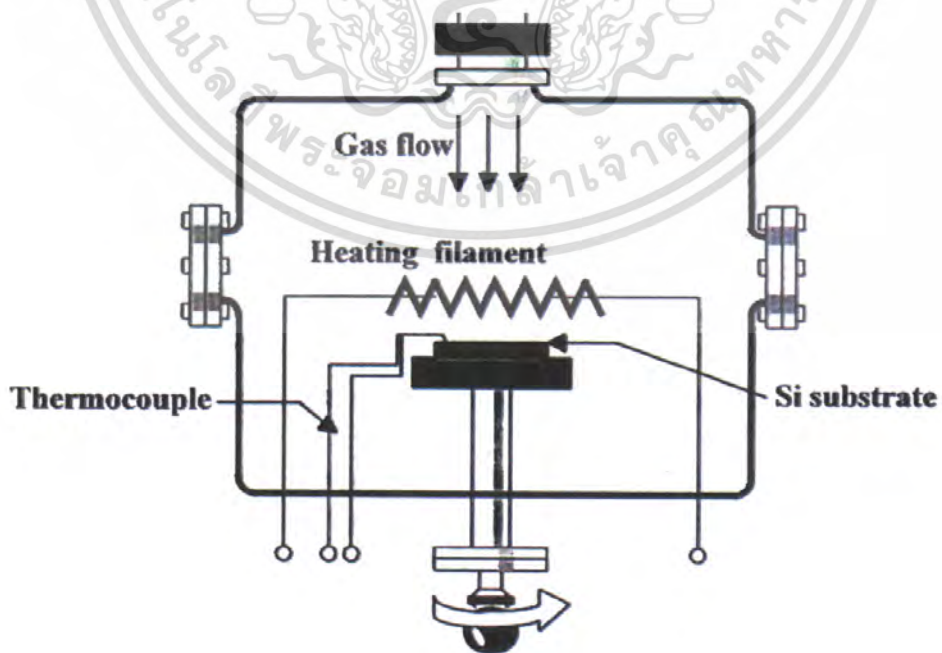


รูปที่ 3.8 เทอร์โมคัปเปิล

3.5 ขั้นตอนกระบวนการสร้าง

3.5.1 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

ฟิล์มเพชรถูกสังเคราะห์บนฐานรองซิลิกอนด้วยวิธีการ CVD แบบลดความร้อน รูปที่ 3.9 แสดงภาพถ่ายเครื่องสร้างฟิล์มเพชรที่ความดันต่ำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับกรณีสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 3.9 แผนภาพไดอะแกรมของระบบเครื่องสร้างฟิล์มเพชร
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 กระบวนการสร้าง

3.5.2.1 แผ่นซิลิคอนเริ่มต้น

นำแผ่นซิลิคอนระนาบ 100 ตัดให้ได้ขนาดกว้าง 1.2 เซนติเมตรและยาว 1.5 เซนติเมตร และทำความสะอาดพื้นผิว



รูปที่ 3.10 แผ่นซิลิคอนเริ่มต้นระนาบ 100

3.5.2.2 ขัดครีมเพชร

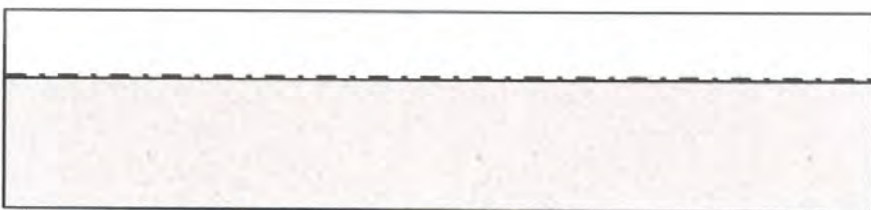
นำแผ่นซิลิคอนไปขัดผิวหน้าด้วยครีมเพชรขนาด 0.25 ไมครอน



รูปที่ 3.11 แผ่นซิลิคอนที่ขัดผิวหน้าด้วยครีมเพชรขนาด 0.25 ไมครอน

3.5.2.3 Silicon Nitride (Si_3N_4)

ทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนแล้วสร้าง ชั้น Nitride บนแผ่น ซิลิคอน



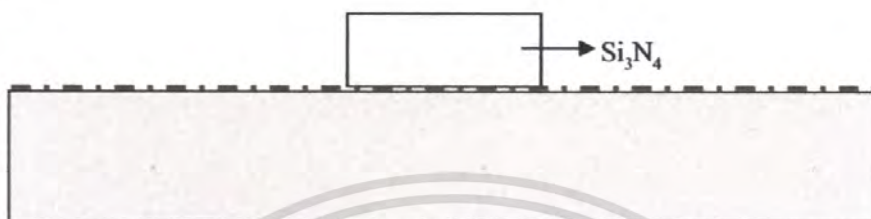
} Si_3N_4

รูปที่ 3.12 สร้าง ชั้น Nitride บนแผ่น ซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2.4 Pattern and Plasma Etch Si₃N₄

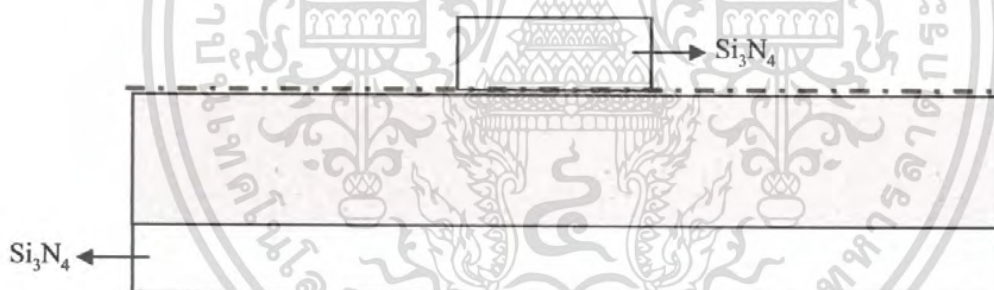
Etch Si₃N₄ ออก ด้วย Buffer 180 องศา โดยให้ ชั้น Si₃N₄ เหลือเพียง ใดอะเฟรมตามที่เรากำหนดไว้



รูปที่ 3.13 Etch Si₃N₄ ออก ด้วยกรด Buffer 180 องศา

3.5.2.5 Silicon Nitride (Si₃N₄)

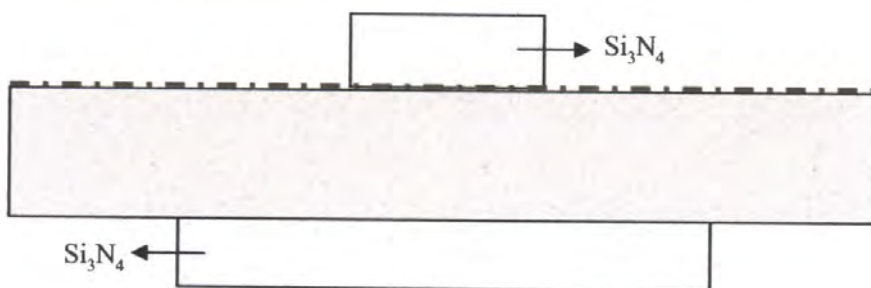
สร้างชั้น Nitride ขนาด 1.2 ไมครอน ที่ด้านหลังของแผ่นซิลิคอน



รูปที่ 3.14 สร้างชั้น Si₃N₄

3.5.2.6 Pattern and Plasma Etch Si₃N₄

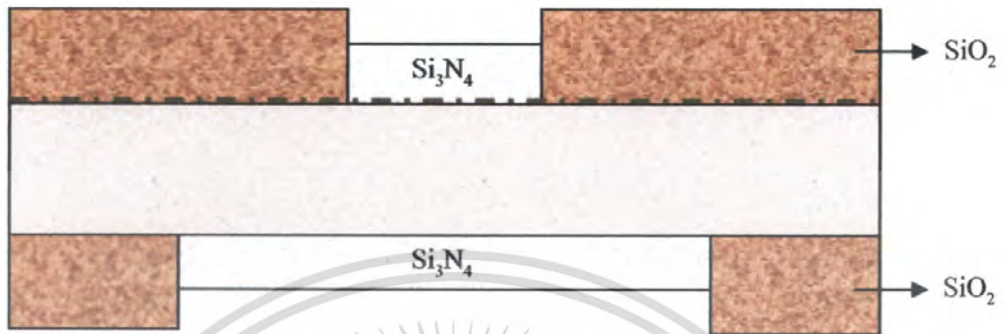
Etch Si₃N₄ ด้านหลังออก เหลือเพียง ใดอะเฟรมตามที่เรากำหนดไว้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2.7 Oxide Thermally to from SiO₂

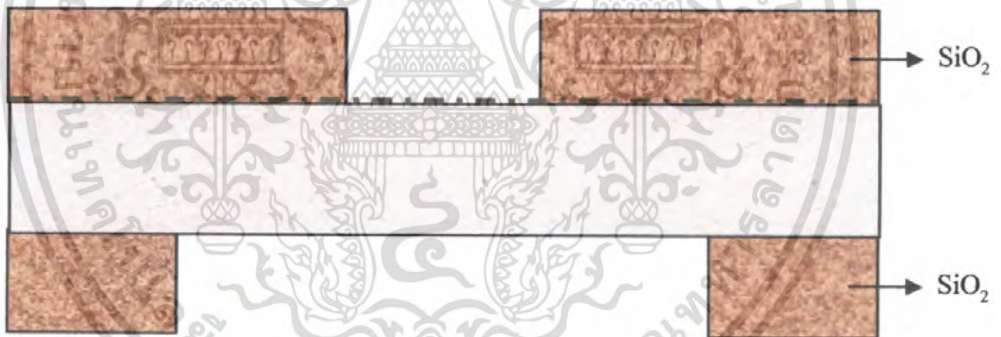
สร้างชั้น SiO₂ ทั้งด้านหน้าและด้านหลังแผ่นซิลิคอน



รูปที่ 3.16 สร้างชั้น SiO₂

3.5.2.8 Pattern and Plasma Etch Si₃N₄

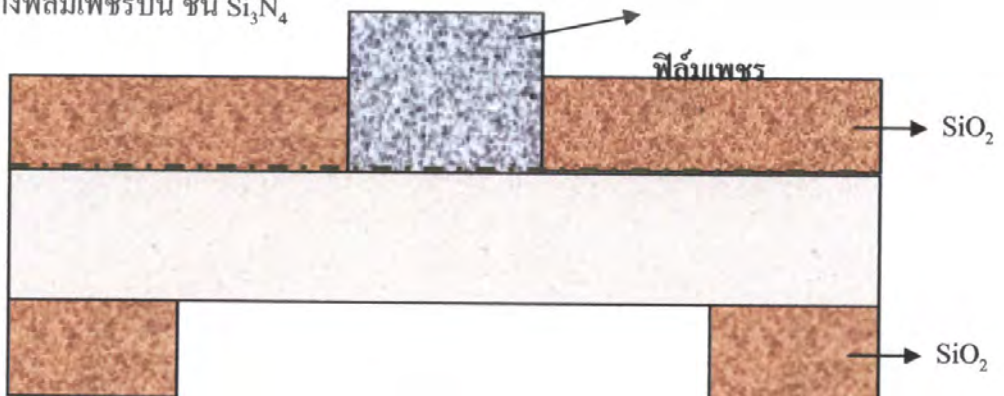
Etch Si₃N₄ ด้านหน้าและด้านหลังออก



รูปที่ 3.17 Etch Si₃N₄ ออก

3.5.2.9 Selectively Deposit Polycrystalline Diamond SiO₂ Etch During Deposition

สร้างฟิล์มเพชรบน ชั้น Si₃N₄

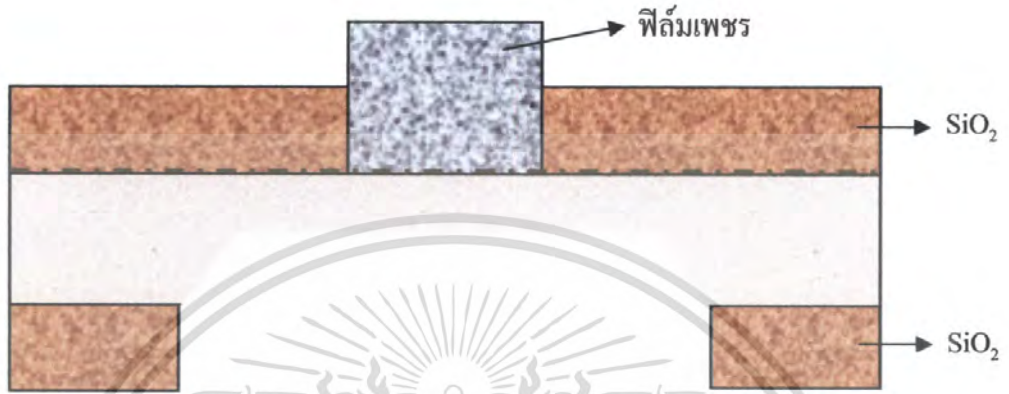


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้แบบเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไร่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.18 สร้างฟิล์มเพชร

3.5.2.10 Chemical Etch Si to diamond

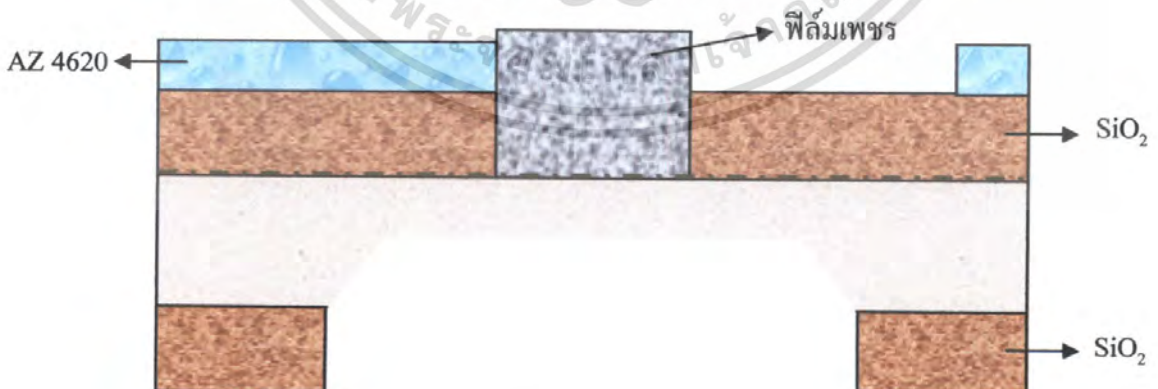
กัดแผ่นซิลิคอนเป็นไดอะแฟรมบาง ด้วยสารละลาย EPD



รูปที่ 3.19 กัด EPD

3.5.2.11 Pattern Frontside

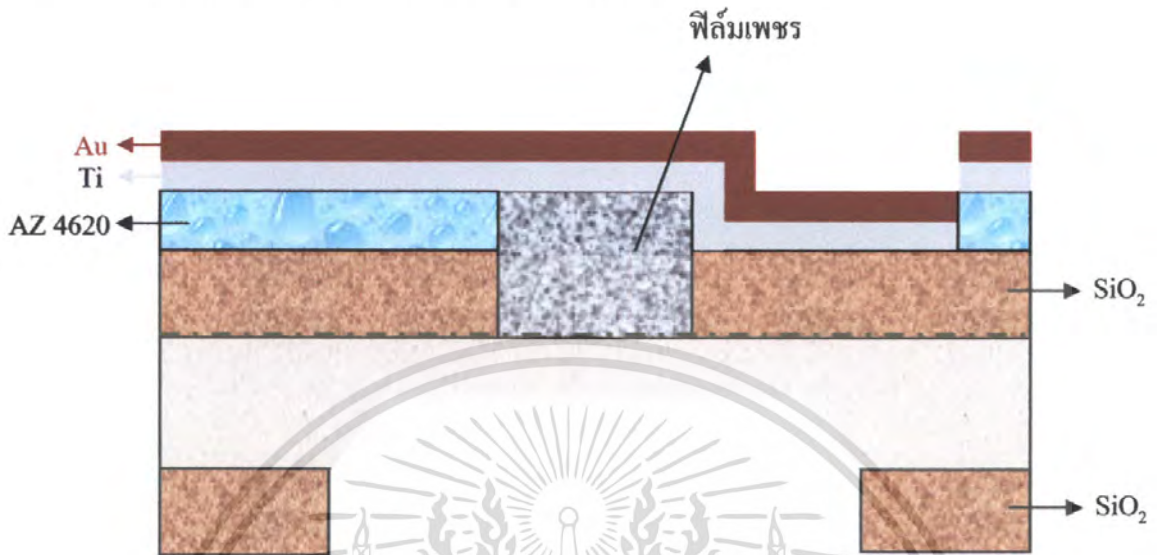
เคลือบน้ำยา AZ 4620



รูปที่ 3.20 เคลือบน้ำยา AZ 4620

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

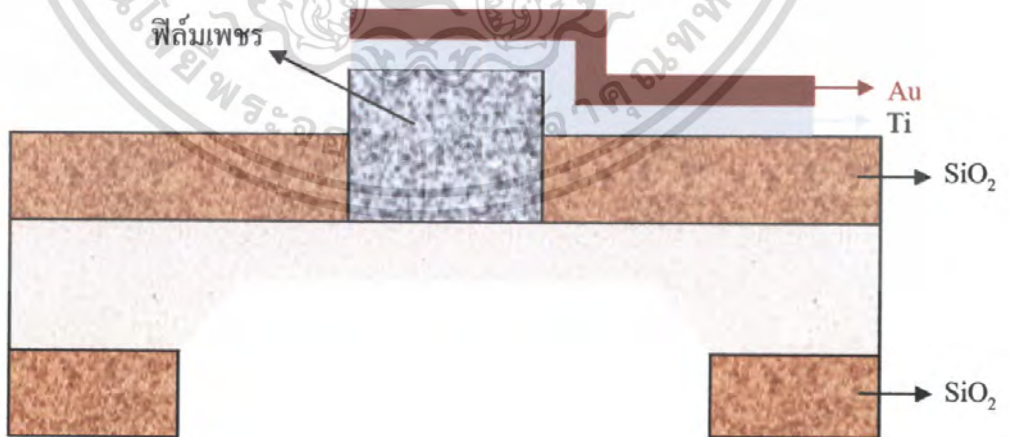
3.5.2.12 Sputtering Ti / Au and Electroless plating



รูปที่ 3.21 Sputtering Ti / Au and Electroless plating

3.5.2.13 Left off AZ 4620

ลอกน้ำยาไวแสง



รูปที่ 3.22 Left off AZ 4620

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

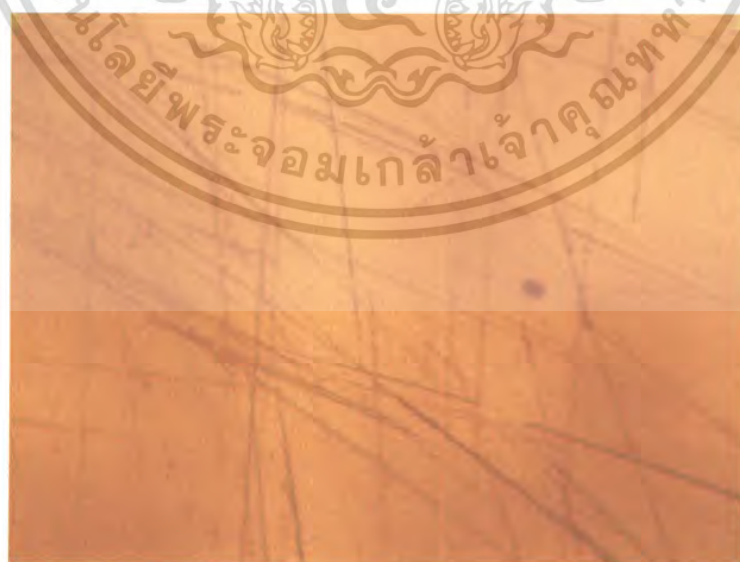
การทดลองและผลการทดลอง

4.1 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรในการทดลองนี้ใช้วิธีการ CVD แบบลดความร้อนที่ความดันต่ำ ฟิล์มเพชรถูกสร้างบนฐานรองซิลิคอน โดยใช้แหล่งจ่ายเป็นไฮโดรเจนของเอทิลแอลกอฮอล์สำหรับฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิกและผสมด้วยสารละลายโบรอนไดรอกไซด์ (B_2O_3) สำหรับฟิล์มเพชรชนิดเอกซ์ทรินซิก รายละเอียดวิธีการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรแสดงในหัวข้อต่อไป

4.1.1 การเตรียมฐานรองซิลิคอน

ฟิล์มเพชรถูกสร้างลงบนฐานรองซิลิคอนที่ทำการขัดผิวหน้าด้วยครีมเพชร สาเหตุที่ต้องขัดผิวหน้า เพื่อให้ช่วยต่อการเกิดนิวเคลียสของผลึกเพชร โดยการเกิดเพชรจะเริ่มต้นเกิดที่รอยขัดก่อนจากนั้นจึงเริ่มขยายขึ้นเรื่อยๆ การสร้างฟิล์มเพชรในการทดลองนี้เราใช้ฐานรองเป็นซิลิคอนระนาบ (100) ขัดผิวหน้าด้วยครีมเพชรขนาด 0.25 ไมครอน ภาพซิลิคอนที่ขัดผิวหน้าแล้วแสดงในรูปที่ 4.1 จากนั้นจึงนำซิลิคอนที่ขัดผิวหน้าเรียบร้อยแล้วไปเข้าเครื่องสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

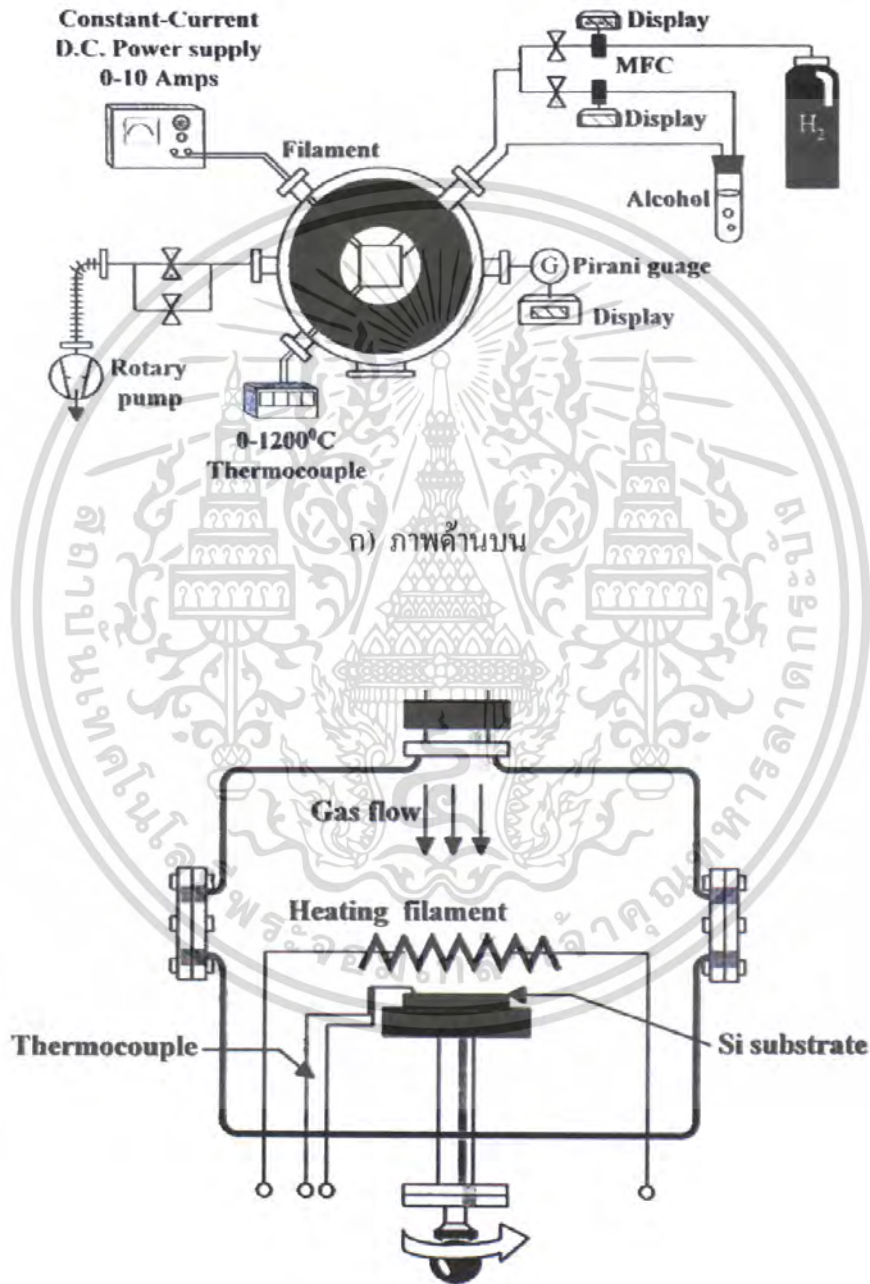


รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่าของผิวหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ **แผ่นซิลิคอนที่ขัดด้วยครีมเพชร 0.25 ไมครอน** ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

แผนภาพไอโซแกรมของระบบเครื่องสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธีการ CVD แบบลวดความร้อนที่ความดันต่ำแสดงในรูปที่ 4.2



ข) ภาพตัดขวางด้านหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดลองสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธีการCVDแบบลดความร้อนที่ความดันต่ำ ระยะห่างระหว่างไส้ทั้งสแตงกับฐานรองซิลิคอนจะมีผลต่อขนาดของเม็ดผลึกเพชร โดยที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์เท่ากัน จากการทดลองพบว่าถ้าลดระยะห่างระหว่างไส้ทั้งสแตงกับฐานรองซิลิคอนลงจะทำให้ขนาดของเม็ดผลึกเพชรมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยในการทดลองระยะห่างที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสังเคราะห์ฟิล์มด้วยระบบนี้คือ 4 มิลลิเมตร เนื่องจากฐานรองซิลิคอนจะอยู่ใกล้กับลดทั้งสแตงมากโดยบริเวณนี้จะมีความหนาแน่นของก๊าซที่แตกตัวมากทำให้การก่อตัวเป็นผลึกเพชรเกิดขึ้นได้เร็ว ในขณะที่ระยะห่างจากไส้ทั้งสแตงมากขึ้นความหนาแน่นของก๊าซที่แตกตัวจะลดลง ทำให้การก่อตัวของผลึกเพชรช้าลงด้วย สำหรับระยะห่างต่ำกว่า 3 มิลลิเมตรลงมา จะเกิดการแพร่กระจายของอุณหภูมิของไส้ลดทั้งสแตงมายังฐานรองซิลิคอนมากทำให้อุณหภูมิฐานรองสูงมากกว่า 1000 องศาเซลเซียส อีกทั้งความหนาแน่นของก๊าซที่แตกตัวมีปริมาณมากทำให้ได้ผลึกเพชรรูปร่างเป็นแบบบอล (ball shape)

นอกจากนี้ในการทดลองพบว่าความดันที่ใช้ในขณะที่ทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรจะมีผลต่อขนาดพื้นของฟิล์มเพชรบนฐานรองซิลิคอน ผลการทดลองพบว่าที่ความดันต่ำการกระจายตัวของฟิล์มเพชรจะได้พื้นที่มากกว่าที่ความดันสูง ทั้งนี้เนื่องจากการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรที่ความดันต่ำช่วงอายุ (lift time) ของก๊าซที่แตกตัวจะมีค่ามากกว่าช่วงอายุของก๊าซแตกตัวที่ความดันสูง ดังนั้นที่ความดันต่ำจะทำให้การเกิดนิวเคลียสสามารถกระจายตัวได้บริเวณกว้าง ทำให้ได้พื้นที่ฟิล์มเพชรบนฐานรองซิลิคอนมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ในขณะเดียวกันถ้าความดันต่ำเกินไปก็จะทำให้อัตราการเกิดผลึกเพชรลดลงเนื่องจากปริมาณก๊าซที่จะเกิดปฏิกิริยาลดลงทำให้ต้องใช้เวลาในการสังเคราะห์นานขึ้น ในการทดลองพบว่าความดันที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 50 ทอร์ สำหรับอัตราส่วนปริมาณก๊าซไฮโดรเจนต่อไอระเหย C_2H_5OH จะเป็นตัวแปรสำคัญในการสังเคราะห์เพชร จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนปริมาณของเอทิลแอลกอฮอล์ที่เหมาะสมคือ 1 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้จะได้ฟิล์มเพชรที่มีปริมาณของคาร์บอนกราไฟท์และอะมอร์ฟัสคาร์บอนน้อยลง

ฟิล์มเพชรที่ใช้นามาสร้างเป็นอุปกรณ์ต่างๆในการทดลองนี้จะสังเคราะห์บนฐานรองซิลิคอน โดยมีเงื่อนไขการสังเคราะห์ฟิล์มดังนี้

1. อุณหภูมิฐานรอง 900 องศาเซลเซียส วัดด้วย thermocouple ที่สัมผัสอยู่บนผิวของฐานรองซิลิคอน
2. อุณหภูมิไส้ทั้งสแตง 2000 องศาเซลเซียส
3. ระยะห่างระหว่างไส้ลดทั้งสแตงกับฐานรองซิลิคอน 4 มิลลิเมตร
4. อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ควบคุมโดย mass flow controller (MFC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. อัตราการไหลของแก๊สออกซอเจน 1 เปอร์เซ็นต์ ควบคุมโดย mass flow controller (MFC)
6. ควบคุมความดันที่ 50 ทอร์ วัดด้วย pirani gauge
7. เวลาในการสร้างฟิล์ม 8 ชั่วโมง ได้ฟิล์มเพชรพื้นที่ขนาด 1.2x1.5 ตารางเซนติเมตร ความหนาประมาณ 8 ไมครอนเมตร

อัตราการก่อตัวของผลึกเพชรประมาณ 1 ไมครอนต่อชั่วโมง สำหรับภาพถ่ายฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้แสดงในรูปที่ 4.3 เป็นการสังเคราะห์ฟิล์มบนฐานรองซิลิคอนพื้นที่ขนาด 2.5x2.5 ตารางเซนติเมตร



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายฟิล์มที่สังเคราะห์ได้ระยะเวลาสังเคราะห์ฟิล์ม 8 ชั่วโมง ความหนาฟิล์ม 8 ไมครอน พื้นที่ขนาด $2.5 \times 2.5 \text{ cm}^2$

4.2 ผลการศึกษาการสร้างฟิล์มเพชรตามลวดลายที่กำหนด

ฟิล์มเพชรจะถูกสร้างให้เกิดลวดลายตามที่ลูกออกแบบไว้ด้วยวิธีตามที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 เพื่อศึกษาค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่จำเป็นต้องใช้ในการออกแบบวงจรต่อไป โดยในการทดลองมีการเตรียมพื้นฐานรองโดยการขัดแผ่นซิลิคอนด้วยคริมเพชรขนาด $0.25 \mu\text{m}$ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายหลังจากการสร้างฟิล์มเพชรเสร็จแล้ว ชิ้นงานจะถูกนำมาวิเคราะห์ถึงผลที่ได้ว่ามีความผิดพลาดเกิดขึ้นมากน้อยเพียงใด เช่น การเกิดฟิล์มเพชรหรือผลึกเพชรบนพื้นที่ที่ไม่ต้องการให้เกิดลักษณะฟิล์มเพชรที่เกิดขึ้น ความผิดพลาดของระยะห่างที่ใกล้ที่สุดระหว่างสวดลายของฟิล์มเพชรรวมไปถึงค่าความกว้างน้อยที่สุดของสวดลายฟิล์มเพชรที่เกิดขึ้น เมื่อเทียบกับค่าที่ออกแบบไว้

ผลจากการสร้างสวดลายฟิล์มเพชรโดยใช้วิธีในไตต์เป็นหน้ากากป้องกัน

การสร้างสวดลายของฟิล์มเพชรจะใช้ชิ้นงานในกระบวนการสร้างในบทที่ 3 โดยทำการสร้างฟิล์มเพชรในเงื่อนไขของบทที่ 4.1.2 ตัวอย่างสวดลายก่อนทำการสร้างฟิล์มเพชรแสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ตัวอย่างสวดลายที่ใช้ในการทดลอง (กำลังขยาย 100เท่า)

ซึ่งผลการตรวจสอบพบว่า การเกิดสวดลายฟิล์มเพชรจะขึ้นอยู่กับกระบวนการสร้างชั้น SiO_2 ด้วยวิธีออกซิเดชันแบบความร้อน ภายหลังจากสร้างเสร็จสิ้นจะพบว่าจะไม่เกิดฟิล์มเพชรตามสวดลายที่ต้องการ แต่จะเป็นผลึกเดี่ยวๆกระจายต่างๆทั่วไปทั้งผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน และผิวหน้าของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

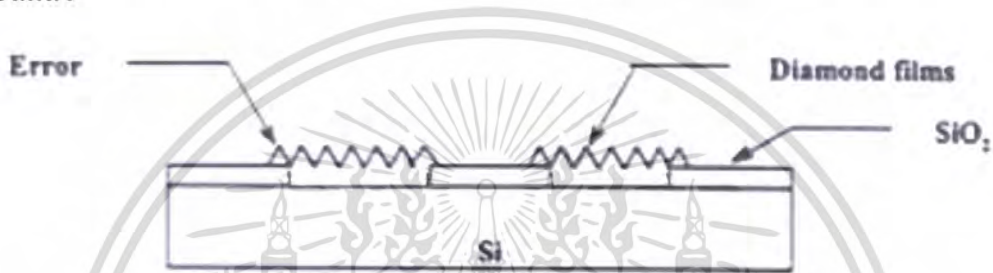
สาเหตุที่ไม่เกิดฟิล์มเพชรตามสวดลายที่ต้องการ แต่เกิดผลึกกระจายทั่วไปหมด สันนิษฐานได้ว่า กระบวนการสร้างชั้น SiO_2 แบบออกซิเดชันแบบความร้อนเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้น เกิดชั้น SiO_2 ลึกลงไปในแผ่นซิลิคอน เมื่อลอก SiO_2 ออก SiO_2 ที่ถูกลอกออกไปจะมีผลต่อรอยขีดที่เกิดจากการขัดครีมนเพชร คือไปลดให้ลดยึดตกลง ทำให้เกิดนิวมลึเอชันของเพชรน้อยลงด้วย

อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองพบว่าความหนาชั้นซิลิคอนมีผลต่อการเกิดสวดลายฟิล์มเพชรด้วย หากความหนา SiO_2 มีค่าน้อยเกินไป สวดลายของฟิล์มจะไม่คมชัด และข้อผิดพลาดสูง เนื่องจากการเกิดผลึกเพชรขึ้นบนชั้น SiO_2 ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างสวดลายของฟิล์มเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้เห็นประโยชน์ของการนำเอกสารนี้ไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าหากความหนาของ SiO_2 มีค่าน้อย ลวดลายของฟิล์มเพชรจะไม่คมชัดและเกิดข้อผิดพลาดสูง แต่ ถ้าความหนาชั้น SiO_2 มีค่าเพิ่มขึ้น ความผิดพลาดของลวดลายก็จะมีค่าลดลง

สาเหตุที่เกิดข้อผิดพลาดระหว่างลวดลายฟิล์มเพชรมากในกรณีที่ SiO_2 มีความหนาน้อย สันนิษฐานได้ว่าอาจเกิดจากที่ผลึกเพชรบริเวณขอบของลวดลายเกินออกมาบนชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ แต่หาก SiO_2 มีความหนาพอ โอกาสที่ผลึกเพชรบริเวณขอบของลวดลายเกินออกมาที่ SiO_2 จะลดลง



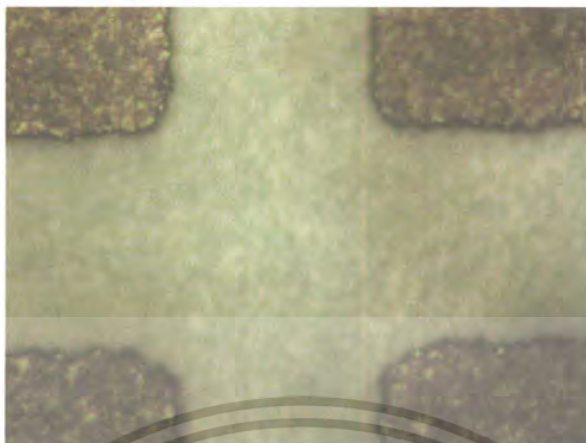
รูปที่ 4.5 แผนภาพแสดงผลความหนาของชั้น SiO_2 ที่มีต่อการเกิดลวดลายของฟิล์มเพชร

ระยะห่าง และขนาดความกว้างของลวดลายมีผลต่อความผิดพลาดของการเกิดฟิล์มเพชรคือ บริเวณขอบด้านนอกของลวดลายจะเกิดฟิล์มเพชรเกินออกมาจากลวดลายที่ออกแบบไว้ โดยที่ขนาดความกว้างของลวดลายฟิล์มเพชรต่ำๆ จะมีความผิดพลาดเกิดขึ้นสูง แต่หากความกว้างเพิ่มขึ้น ความผิดพลาดจะมีค่าต่ำลง เนื่องจากขนาดของผลึกที่เกินมายังขอบนอกลวดลายมีค่าคงที่ เช่นเดียวกับ ระยะห่างใกล้ที่สุดระหว่างลวดลาย คือที่ระยะห่างใกล้ที่สุดระหว่างลวดลายมีค่าน้อยความผิดพลาดก็จะเกิดขึ้นสูง และที่ระยะห่างใกล้ที่สุดระหว่างลวดลายมีค่ามากความผิดพลาดก็จะเกิดจะลดลง ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกัน โดยความผิดพลาดที่เกิดขึ้น จะเกิดขึ้นเท่าๆกันทุกทิศทางของพื้นที่ที่ ออกแบบไว้



รูปที่ 4.6 ลายเส้นเพชรขนาด 20 ไมครอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในวงการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ภาพแสดงมุมมองจากการเกิดพื้นที่เพชร

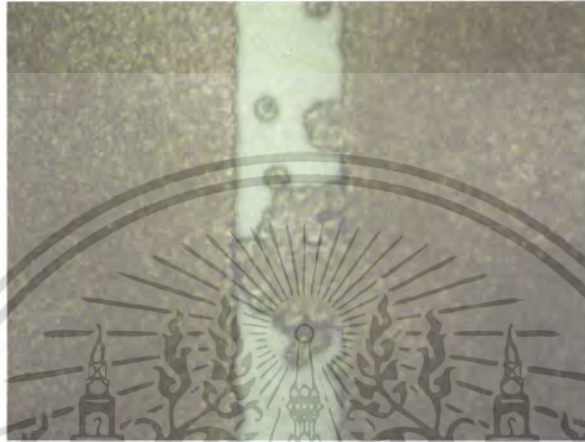


รูปที่ 4.8 ภาพแสดงมุมมองจากการเกิดพื้นที่เพชร

จากการทดลองสร้างฟิล์มเพชรตามลวดลายจะพบว่าในบางครั้งจะมีข้อผิดพลาดทำให้ ลวดลายของฟิล์มเพชรเสียหาย เช่น อุณหภูมิฐานรองไม่เหมาะสม คือถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปจะเป็น การไปเพิ่มความหนาแน่นการเกิดนิวคลีโอซันให้มากขึ้น ทำให้เกิดฟิล์มเพชรบนชั้น SiO_2 ขึ้นมา ซึ่ง บางครั้งไม่สามารถกำจัดออกได้ กระบวนการเตรียมพื้นผิวฐานรองมีข้อผิดพลาด คือในการขัด ผิวหน้าแผ่นซิลิคอนหากมีวัสดุอื่นที่ไม่ใช่ครีမ်เพชรเจอปน เช่นเศษแผ่นซิลิคอนที่แตกระหว่างขัด ทำ ให้ผิวหน้าแผ่นซิลิคอนมีรอยที่ไม่ได้เกิดจากการขัดครีမ်เพชรขึ้นมา ซึ่งเมื่อนำไปสร้างฟิล์มเพชรแล้ว บางครั้งจะเกิดผลึกเกาะตัวตามรอยเสียหายนี้ และไม่สามารถถูออกเลยได้ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างลวดลาย ดังนั้นจึงควรระมัดระวังอย่าให้มีรอยนี้เกิดขึ้น กระบวนการขั้นตอนการเกิดช่องของชั้น SiO_2 คือหากใช้ระยะเวลาในการลอกชั้น SiO_2 มากเกินไปทำให้เกิดการเซาะ SiO_2 บริเวณรอบๆ พื้นที่ช่วงที่เปิด เมื่อนำชิ้นงานไปสร้างฟิล์มเพชร พบว่าจะมีฟิล์มเพชรเกิดตามออกมานอกลวดลายที่กำหนดไว้



รูปที่ 4.9 ช่องว่างระหว่างเพชร Error เนื่องจากเพชรเกิดล้าเข้าไปในออกไซด์



รูปที่ 4.10 ช่องว่างระหว่างเพชร Error เนื่องจากกระบวนการ โฟโตลิโกราฟีไม่สมบูรณ์

จากที่กล่าวมาทั้งหมด สรุปได้ว่าการสร้างฟิล์มเพชรให้เกิดเป็นลวดลายจำเป็นจะต้องพิถีพิถัน และควบคุมขั้นตอนต่างๆในการสร้างให้ละเอียดรอบคอบ มิฉะนั้นแล้วผลที่ได้จะมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นซึ่งจะไม่เป็นผลดีต่อการนำไปใช้งานต่อไป อย่างไรก็ตามหากมีการควบคุมขั้นตอนต่างๆอย่างเหมาะสม ก็จะได้ฟิล์มเพชรเป็นลวดลายตามที่ต้องการเพื่อจะนำไปประยุกต์ใช้ในต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



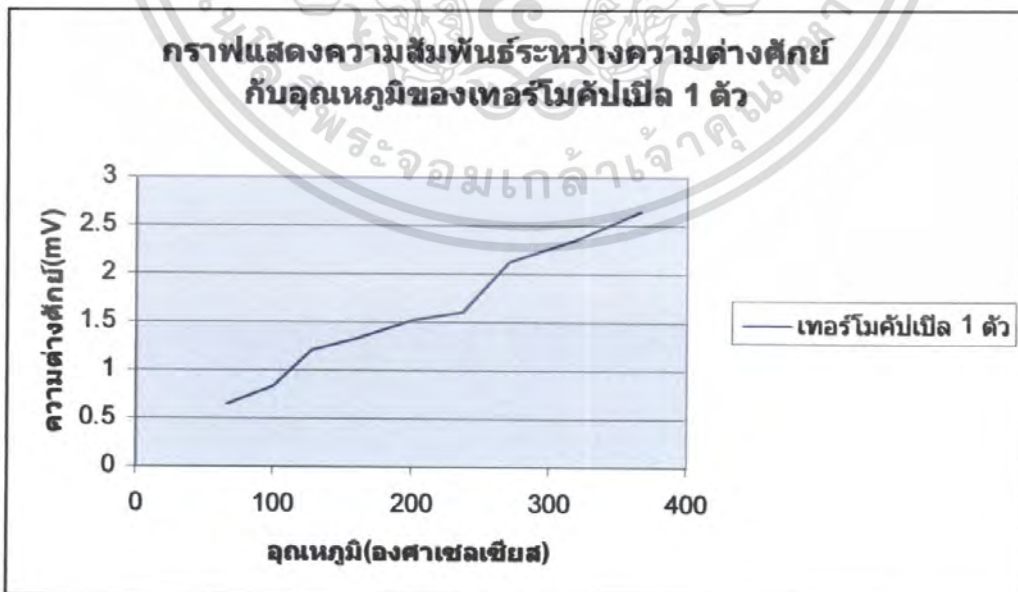
รูปที่ 4.11 การทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิล 1 ตัว

อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)	ความต่างศักย์(mV)
66	0.65
99	0.84
128	1.21
161	1.33
200	1.53
238	1.61
271	2.12
320	2.36
366	2.64

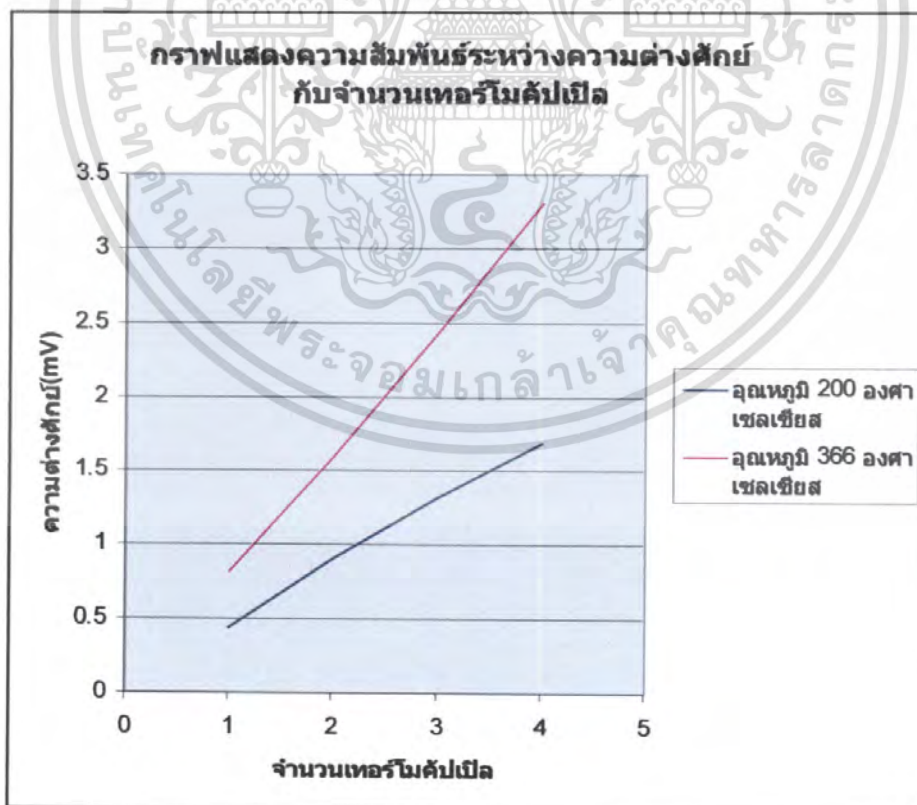


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิล 1 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับจำนวนเทอร์โมคัปเปิล ที่อุณหภูมิ 50 และ 100 องศาเซลเซียส

จำนวนเทอร์โมคัปเปิล	ความต่างศักย์(mV) (50 องศาเซลเซียส)	ความต่างศักย์(mV) (100 องศาเซลเซียส)
1	0.44	0.82
2	0.91	1.59
3	1.32	2.43
4	1.69	3.31



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับจำนวนเทอร์โมคัปเปิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

รายงานเล่มนี้แสดงผลการศึกษา และพัฒนาเพื่อนำฟิล์มเพชรมาประยุกต์สร้างเป็นเทอร์โมคัปเปิล โดยศึกษาการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรจากกระบวนการ CVD แบบลดความร้อนที่ความดันต่ำ เนื่องจากเพชรมีคุณสมบัติต่างๆทางฟิสิกส์ และอิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสม ซึ่งจากการทดลองสรุปได้ว่า สามารถสังเคราะห์ฟิล์มเพชรขึ้นบนพื้นที่ที่จำกัดไว้ได้ แต่พื้นที่ที่จะทำการสร้างนั้นมีข้อจำกัดเนื่องจากถ้ามีขนาดพื้นที่เล็กเกินไปอาจทำให้เกิดความผิดพลาดในกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรขึ้นมา

ซึ่งจากการทดลองพบว่า การสร้างฟิล์มเพชรมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นคือ เกิดเพชรล้าเข้าไปในออกไซด์ซึ่งเกิดกระบวนการสร้างชั้น SiO_2 แบบออกซิเดชันด้วยความร้อน หรือความหนาของชั้นออกซิเดชัน หรือระยะห่างและขนาดความกว้างของลวดลายและในส่วนของฟิล์มเพชรบางส่วนที่ไม่เกิดฟิล์มเพชรขึ้น เนื่องจากในกระบวนการลอก Si_3N_4 ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากน้ำยาป้องกันชั้น Si_3N_4 ในส่วนที่ถ่ายมาส์กไว้ป้องกันได้ไม่ครบ ทำให้เมื่อถึงกระบวนการสร้างฟิล์มเพชรเกิดส่วนที่ฟิล์มเพชรไม่เกิดขึ้น ดังนั้นจึงต้องพิถีพิถันและควบคุมขั้นตอนต่างๆในการสร้างให้ละเอียดรอบคอบเพื่อที่จะได้ฟิล์มเพชรเป็นลวดลายตามที่ต้องการในการนำไปประยุกต์ใช้งาน

เอกสารอ้างอิง

- [1] นริศ จันทร์แดง(2538), “การสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำเพชร”, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า-วิทยานิพนธ์
- [2] กอบศักดิ์ ศรีประภา(2541), “การศึกษาการเลือกสร้างฟิล์มเพชรเฉพาะพื้นที่ด้วยวิธี CVD แบบความร้อน”, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า-วิทยานิพนธ์
- [3] ศราวุธ ลอดชะ(2537), “การสังเคราะห์ฟิล์มบางของเพชรด้วยวิธีการ CVD แบบความร้อนและการสังเคราะห์กับคุณลักษณะฟิล์มเพชรที่เจือโบรอน”, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์-ปริญญาโท
- [4] ถัดดาวลัย สุภาดี(2544), “การปลูกผลึกเพชรด้วยเทคนิค Hot filament chemical vapor deposition”. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง-วิทยานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การทำความสะอาดผิวผลึกซิลิคอนเริ่มต้น (initial cleaning) มีขั้นตอนดังนี้

1. ทำความสะอาดผิวด้วยน้ำบริสุทธิ์ (deionized water) ในเครื่องสั่นความถี่สูง (supersonic cleaning)
2. ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
3. กัดผิวหน้าด้วยกรดกัดแก้ว (HF) 5% เป็นเวลา 2 นาที
4. ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
5. ต้มในกรดไนตริก (HNO_3) เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำเศษ โลหะหนักที่ผิวหน้า
6. ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
7. ต้มในน้ำบริสุทธิ์เป็นเวลา 5 นาที
8. ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
9. เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
10. ต้มในไตรโคลโรเอทิลีน (Trichloroethylene) เป็นเวลา 5 นาทีเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกประเภทไขมัน
11. ล้างด้วยอะซีโตน (Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูงเป็นเวลา 3 นาที
12. ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
13. จุ่มลงในกรดกัดแก้ว (HF) 5% เป็นเวลา 20 นาที
14. ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
15. เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

ภาคผนวก ข

การทำความสะอาดผิวหน้าฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์แล้วก่อนนำเข้ากระบวนการอื่นต่อไปมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. กัดด้วยสารละลายอิมตัวของโครเมียมไดออกไซด์ (CrO_3) ในกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ที่อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 3 นาที เพื่อกำจัดคราฟท์ที่ผิวหน้า
2. ล้างด้วยสารละลายคัมเดอคของ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) กับแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) อัตราส่วน 1:1
3. ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
4. เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

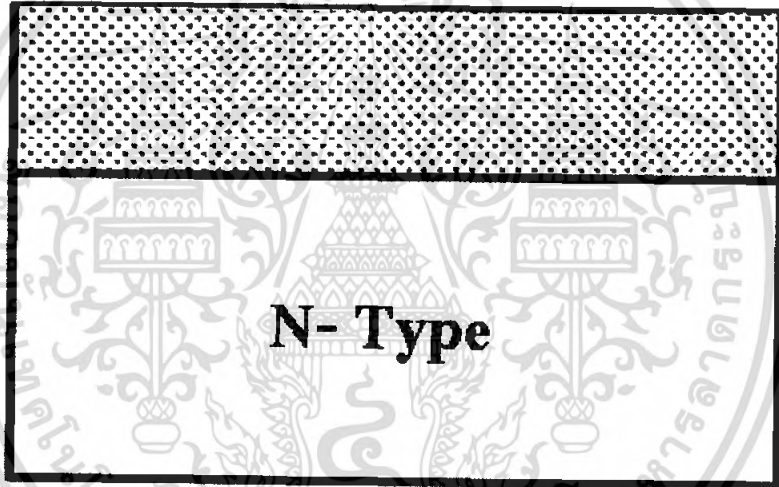


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

กระบวนการออกซิเดชัน (การสร้าง SiO_2 ให้หนา 12,000 Å)

- Dry Oxidation ด้วย O_2 1200 cc/min 2 ชั่วโมง
(เป็นการสร้าง SiO_2 แบบละเอียดและกระบวนการที่เกิดขึ้นช้า)
- Wet Oxidation ด้วย O_2 1000cc/min 12 ชั่วโมง



แสดงกระบวนการสร้าง SiO_2 แบบ Wet และ Dry

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

- อบแผ่นผลึกในเตาอบเพื่อไล่ความชื้นที่ อุณหภูมิ 100 °c ประมาณ 1 ชั่วโมง
- เคลือบน้ำยาไวแสงด้วยเครื่อง Spinner 5000 rpm สำหรับ AZ 4620
- Peabrake ด้วยการอบในเตาอบที่ อุณหภูมิ 90 °c ประมาณ 30 นาที
- นำแผ่นทำการ Mask Alignment และฉายแสงประมาณ 80 วินาที
- Development โดย จุ่ม AZ 400K เป็นเวลา 40 วินาที
- Postbake ในเตาอบที่อุณหภูมิ 100 °c ประมาณ 20 นาที แล้วนำออกมาเคลือบสารไวแสงข้างหลังเพื่อป้องกันการกัดด้วย AZ แล้วอบต่ออีก 10 นาที

การใช้สารละลายกัดชั้นออกไซด์ (Oxide Etching)

- จุ่มในสารละลาย Buffer 12 นาที (สารจาสกัดชั้น ออกไซด์ นาทีละ 1000 Å°)
- จุ่มในน้ำ DI 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วย N₂

กระบวนการลอกฟิล์ม (ลอกฟิล์มที่โดนแสงออกไป)

- ล้างในสารละลาย Acetone 2 แก้ว แก้วละ 1 นาที
- จุ่มในน้ำ DI 10 นาที 2-3 ครั้ง
- ดัมในน้ำ DI 30 นาที 1-2 ครั้ง
- ล้างน้ำ DI 10 นาที 2-3 ครั้งแล้วเป่าแห้งด้วย N₂