

ทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดเพชรแบบเปียโซรีซิสทีฟฟิล์ม
บนฟิล์มบางเพชร

DIAMOND PIEZORESISTIVE PRESSURE TRANSDUCER
ON DIAMOND THIN FILM



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2545

ISBN 974 - 324 - 135 - 3

ช.ม. 21.4
เลขที่ 55 7
เลขที่ 45650
น. เดือน, ปี 1.2 ก.พ. 2546

b.....	1102205
i.....	1022655

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**DIAMOND PIEZORESISTIVE PRESSURE TRANSDUCER
ON DIAMOND THIN FILM**

EAKKARACH RATANAUDOMPHISUT

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

2002

ISBN 974 - 324 - 135 - 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2002

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดเพชรแบบเป็ยโซริซีฟที่ปบนฟิล์มบางเพชร
นักศึกษา	นายเอกราช รัตนอุดมพิสุทธิ
รหัสประจำตัว	40061084
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการสร้างทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดเพชรแบบเป็ยโซริซีฟที่ปบนฟิล์มบางเพชร โดยการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD แบบลดความร้อนที่ความดันต่ำ การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเงื่อนไขที่เหมาะสมจะทำให้ได้ฟิล์มเพชรที่มีคุณภาพดี และจะถูกนำไปสร้างเป็นทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดเพชรขึ้น ทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดเพชรนี้เป็นทรานสดิวเซอร์ความดันที่มีโครงสร้างไดอะแฟรมเป็นฟิล์มเพชร ซึ่งเป็นไดอะแฟรมฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิกที่มีความหนา 7 ไมครอน การกักด้วยวิธีไมโครเวฟพลาสมาจะถูกนำมาใช้ในการกักเพชรเพื่อให้เกิดเป็นโครงสร้างตัวต้านทานเพชรเอ็กทรินซิกชนิด p บนไดอะแฟรมฟิล์มบางเพชรซึ่งประกอบด้วยตัวต้านทานในแนวตั้งฉากและตัวต้านทานในแนวนอน ทรานสดิวเซอร์ความดันที่สร้างเสร็จสมบูรณ์จะถูกนำมาต่อขั้วไฟฟ้าและเก็บบรรจุ หลังจากนั้นจึงนำมาทดสอบกับความดันในช่วง 0-0.6 kgf/cm² ด้วยดิจิตอลไมเตอร์พบว่าตัวต้านทานเพชรทั้ง 4 ตัว คือ R_{p1}, R_{p2}, R_{L1} และ R_{L2} จะมีความไวในการตอบสนอง 0.53, 0.44, 0.25 และ 0.20 $\mu\text{V/V}\cdot\text{kgf/cm}^2$ ตามลำดับ โดยใช้วงจรวิทสโตนบริดจ์แบบควอเตอร์บริดจ์ในการทดสอบและเมื่อนำตัวต้านทานทั้ง 4 ตัวบนไดอะแฟรมของทรานสดิวเซอร์ความดันนี้มาต่อกันเป็นวงจรวิทสโตนบริดจ์แบบฟูลบริดจ์พบว่ามีความไวในการตอบสนองเพิ่มขึ้นโดยมีความไวเฉลี่ย 1.068 $\mu\text{V/V}\cdot\text{kgf/cm}^2$

Thesis Title	Diamond Piezoresistive Pressure Transducer on Diamond Thin Film
Student	Mr. Eakkarach Ratanaudomphisut
Student ID.	40061084
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2002
Thesis Advisor	Associate Professor Somsak Cheersirikul

ABSTRACT

This thesis presents the formation of diamond piezoresistive pressure transducer on diamond thin film. Diamond film was synthesized on a silicon substrate by low pressure hot-filament CVD. The p-type diamond film was synthesized on intrinsic diamond film and used to fabricate a pressure transducer. The transducer was fabricated on intrinsic diamond diaphragm thickness about 7 μm , the perpendicular and parallel resistor obtained by microwave plasma etching p-type diamond film. The sensitivity of devices was investigated for pressure from 0 to 0.6 kgf/cm^2 using a quarter wheatstone bridge circuit. From the experiments, the resistor R_{p1} , R_{p2} , R_{L1} and R_{L2} show the sensitivity 0.53, 0.44, 0.25 and 0.20 $\mu\text{V/V-kgf/cm}^2$, respectively. Furthermore, the device's sensitivity was increased when applied with full wheatstone bridge circuit. In this experiment, the average sensitivity of device is 1.068 $\mu\text{V/V-kgf/cm}^2$.

กิตติกรรมประกาศ

การที่วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีนั้น ประกอบขึ้นด้วยความอนุเคราะห์และการช่วยเหลือจากบุคคลต่าง ๆ มากมายซึ่งผู้เขียนขอกล่าวคำขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ราช. สมศักดิ์ เขียวศิริกุล สำหรับแนวคิด คำปรึกษา เทคนิคและวิธีการแก้ปัญหาต่าง ๆ ขอบขอบพระคุณ ผศ.ดร. เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล สำหรับคำแนะนำและคำปรึกษาและขอบขอบพระคุณ ผศ. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษาและการแก้ปัญหาต่าง ๆ ด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณชาญเดช หรือนันต์ และ คุณการนต์ แซ่จอก นักวิจัยงานวิจัยกระบวนการผลิตสารกึ่งตัวนำ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ที่ได้ให้คำแนะนำ และคำปรึกษาการใช้เครื่องมือต่าง ๆ เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณอภิรักษ์ ฤกษ์รัตน์ นายช่างอิเล็กทรอนิกส์ประจำศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในการวัดผลการทดลองและขอบขอบพระคุณ อาจารย์ เจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์และนักศึกษาทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือต่าง ๆ

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัยที่อนุเคราะห์ทุนในการทำวิทยานิพนธ์
สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ พ่อและแม่ ที่คอยเป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในการศึกษาที่ดีตลอดมา

เอกราช รัตนอุดมพิสุทธิ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
รายการสัญลักษณ์	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎี	5
2.1 ฟิสิกส์เพอร์	5
2.1.1 ลักษณะโครงสร้างผลึกเพอร์	5
2.1.2 คุณสมบัติต่างๆ ของเพอร์	7
2.1.3 เทคนิคการสังเคราะห์ฟิล์มเพอร์	8
2.1.4 การสังเคราะห์ฟิล์มเพอร์	11
2.1.4.1 กระบวนการของก๊าซเฟส	11
2.1.4.2 การนิวเคลียชัน	13
2.1.4.3 การเตรียมฐานรอง	13
2.1.5 คุณภาพฟิล์มเพอร์	14
2.2 ทรานซิสเวออร์ความดันชนิดเพอร์	14
2.2.1 โครงสร้างทรานซิสเวออร์ความดันชนิดเพอร์แบบเปียโซรีซีฟทีป บนฟิล์มบางเพอร์	14
2.2.2 สัมประสิทธิ์เปียโซรีซีฟทีปตามยาวและสัมประสิทธิ์เปียโซรีซีฟทีปตามขวาง	16
2.2.3 ความเค้นตามยาวและความเค้นตามขวาง	18
2.2.4 ความเค้นและสัมประสิทธิ์เปียโซรีซีฟทีปในตัวต้านทาน	19
2.3 วงจรวีทสโตนบริดจ์ (Wheatstone Bridge Circuit)	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4 ความไวในการตอบสนอง	23
บทที่ 3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และการวัด	24
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติฟิล์มเพชร	24
3.1.1 จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM)	24
3.1.2 พูรีयरทรานสฟอร์เมอร์รามานสเปกโทรสโคปี (FT-Raman)	26
3.2 ชุดเครื่องมือที่ใช้ในการวัดและทดสอบความดัน	27
บทที่ 4 การออกแบบและการสร้าง	30
4.1 การออกแบบไดอะแฟรมฟิล์มบางเพชร	30
4.2 การออกแบบตัวต้านทานเปียโซรีซีฟทิป	31
4.3 การออกแบบทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเปียโซรีซีฟทิป	33
4.4 มาส์กและลำดับการสร้าง	36
4.4.1 การผลิตกระจกมาส์กดันแบบ	36
4.4.2 ขั้นตอนกระบวนการสร้าง	39
4.4.2.1 การสังเคราะห์ฟิล์มบางเพชรบนฐานรองซิลิคอน	39
4.4.2.2 กระบวนการสร้างทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดฟิล์มบางเพชร	40
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง	48
5.1 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชร	48
5.1.1 ผิวหน้าฐานรองซิลิคอน	50
5.1.2 ปริมาณไฮโดรเจนเอทิลแอลกอฮอล์	53
5.1.3 ระยะเวลาสูงได้ลดความร้อนถึงฐานรองซิลิคอน	54
5.1.4 ความดันในขณะที่ทำการสังเคราะห์	56
5.1.5 เวลาในการสังเคราะห์	57
5.2 การทดลองการกัดเพชรด้วยวิธีไมโครเวฟพลาสมา	58
5.3 การตรวจสอบค่าความต้านทานของทรานสดิวเซอร์ความดัน	60
5.4 การทดลองและผลการทดลองวัดค่าความไวต่อความดัน	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.4.1 ผลการทดลองวัดค่าความไวของตัวต้านทานในแนวตั้งฉากและในแนว	
ขนานขอบไดอะเฟรม	62
5.4.2 ผลการทดลองวัดค่าความไวของทรานสดิวเซอร์ความดัน	66

บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	69
--	----

เอกสารอ้างอิง	71
---------------------	----

ภาคผนวก	73
---------------	----

ประวัติผู้เขียน	74
-----------------------	----



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1	เทคนิคการตรวจวัดเซ็นเซอร์ทางกล 1
2.1	การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเพชรกับสารกึ่งตัวนำอื่น ๆ 7
2.2	การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์ของเพชรกับวัสดุอื่น ๆ 8
2.3	เทคนิคและเงื่อนไขในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD แบบต่าง ๆ 9
2.4	คุณสมบัติของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยวิธี CVD แบบต่าง ๆ 10
4.1	เงื่อนไขการสปีดเตอร์ริงกระเจิงมาสก์โครเมียม 37
4.2	อัตราส่วนสารละลายกัดโครเมียม 37
4.3	เงื่อนไขการสปีดเตอร์ริงซิลิคอนไดออกไซด์ 41
4.4	เงื่อนไขการกัดซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยเครื่อง RIE 42
4.5	เงื่อนไขการกัดโครงสร้างตัวต้านทานเพชรชนิด p 42
5.1	เงื่อนไขการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร 57
5.2	ค่าความต้านทานในแนวตั้งฉากและในแนวนอนของทรานซิสเตอร์ความดัน 60
5.3	สรุปการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานและความไวของตัวต้านทานในแนวตั้งฉากและ ในแนวนอน 66
5.4	ความไวของของทรานซิสเตอร์ความดันที่ค่าแรงดันอินพุตต่าง ๆ 68

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	ภาคตัดขวางเซนเซอร์ความดัน โครงสร้างแบบไดอะแฟรม 2
1.2	ภาคตัดขวางเซนเซอร์อัตราเร่ง โครงสร้างแบบคาน 2
2.1	แบบจำลองโครงสร้างผลึกเพชร 1 ยูนิตเซลล์ 5
2.2	ระนาบของฟิล์มเพชร 6
2.3	ภาพถ่ายฟิล์มเพชรด้วยกล้องจุลทรรศน์ (ก) ระนาบ (111) และ (ข) ระนาบ (100) 6
2.4	กระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นในรีแอคเตอร์ CVD ของเพชร 12
2.5	กระบวนการเกิดเกรไฟต์และเพชรขณะสังเคราะห์ 12
2.6	โครงสร้างทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดเพชรแบบเปียโซรีซีฟทีป (ก) ภาคตัดขวางทรานสดิวเซอร์ความดัน และ(ข) ซิปทรานสดิวเซอร์ความดันขนาด 3x3 มิลลิเมตร 15
2.7	ทิศทางของแรงที่มากระทำกับวัสดุที่ประกอบด้วย (ก) แรงดึงตามยาว และ (ข) แรงดึงตามขวาง 17
2.8	การกระจายค่าความเค้นในโดเมนชั้นเลสใน 1 ควอดแรน (Quadrant) ที่บริเวณต่าง ๆ กันบนไดอะแฟรมรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส 19
2.9	ตัวต้านทานทั้ง 4 ตัวบนไดอะแฟรม 20
2.10	วงจรวีทสโตนบริดจ์ 22
3.1	ส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่อง SEM 24
3.2	ภาพถ่ายเครื่อง SEM รุ่น JSM-6301F 26
3.3	การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานที่ทำให้เกิด Raman Scattering 27
3.4	ภาพถ่ายเครื่อง FT-Raman spectrometer 27
3.5	ดิจิตอลไมโครมิเตอร์ที่ใช้ทดสอบความดันให้กับทรานสดิวเซอร์ความดัน 28
3.6	วงจรขยายแรงดันไฟฟ้าเข้าที่พุท V_o จากวงจรวีทสโตนบริดจ์ 28
4.1	การกักขังอิเล็กตรอนแบบแอนไอโซโทรปิกด้วย EPD 30
4.2	โครงสร้างไดอะแฟรมฟิล์มบางเพชร 31
4.3	ขนาดโครงสร้างตัวต้านทานเพชรชนิด p บนไดอะแฟรมที่ประกอบด้วย (ก) ตัวต้านทานในแนวขนาน และ(ข) ตัวต้านทานในแนวตั้งฉาก 32
4.4	ต้นแบบทรานสดิวเซอร์ความดันที่ออกแบบด้วยโปรแกรม L-Edit 33
4.5	ทรานสดิวเซอร์ความดันทั้ง 4 ชั้นประกอบด้วย (ก) ชั้นไดอะแฟรม (ข) ชั้นตัวต้านทานเพชรชนิด p (ค) ชั้นรอยสัมผัสขั้วทองและ(ง) ชั้นลวดลายขั้วทอง 35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6	ภาพถ่ายเครื่องไครเรทไรท์สำหรับสร้างลวดลายลงบนกระจกมาสก์โครเมียม 36
4.7	ลำดับโครงสร้างกระจกมาสก์แผ่นที่ 1 ถึง 4 ซึ่งประกอบด้วย (ก) กระจกมาสก์ 1 ไดอะแฟรมฟิล์มเพชร (ข) กระจกมาสก์ 2 ตัวต้านทานเพชรทั้ง 4 บนไดอะแฟรม (ค) กระจกมาสก์ 3 รอยสัมผัสชั่วคราว และ (ง) กระจกมาสก์ 4 ลวดลายชั่วคราว 38
4.8	ลำดับกระบวนการสร้างทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดฟิล์มบางเพชรขั้นตอนต่าง ๆ 47
4.9	ทรานสดิวเซอร์ความดันต้นแบบชนิดฟิล์มบางเพชรสมบูรณ์ 47
4.10	ภาพถ่ายทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดฟิล์มบางเพชรที่เสร็จสมบูรณ์ 47
5.1	แผนภาพระบบสังเคราะห์ฟิล์มเพชร 49
5.2	ภาพถ่ายเครื่องต้นแบบระบบสังเคราะห์ฟิล์มเพชรแบบใส่ลวดความร้อน 49
5.3	ภาพถ่ายผิวหน้าซิลิคอนที่เตรียมผิวหน้าด้วยครีมเพชรเงื่อนไขต่าง ๆ (ก) 5 ไมครอน ขัด 30 นาที (ข) 5 ไมครอน ขัด 3 นาที และ 1 ไมครอน ขัด 5 นาที (ค) 1 ไมครอน ขัด 15 นาที และ(ง) 5 ไมครอนอัลตราโซนิก 2 ชั่วโมง 51
5.4	เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยรามานสเปกโทรสโกปี โดยการเตรียมผิวหน้าด้วยวิธี ขัดด้วยครีมเพชร ขนาด (ก) 5ไมครอน 30 นาที (ข) 5 ไมครอน 3 นาที และต่อด้วย 1 ไมครอน 5 นาที และ (ค) 1 ไมครอน 15 นาที 51
5.5	การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรโดยการเตรียมผิวหน้าด้วยวิธีอัลตราโซนิก 2 ชั่วโมง โดยวิธี เคราะห์ผลด้วย (ก) รามานสเปกโทรสโกปีและ (ข) ภาพถ่ายฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ ได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์ขยาย 1000 เท่า 52
5.6	เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยรามานสเปกโทรสโกปี ซึ่งใช้ก๊าซไฮโดรเจน 100 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ต่อปริมาณไฮดรอกซีเอทิลแอลกอฮอล์โดยปริมาตร (ก) 6% (ข) 4% และ(ค) 2% 53
5.7	กราฟความสัมพันธ์ของคุณภาพฟิล์มเพชรกับปริมาณไฮดรอกซีเอทิลแอลกอฮอล์ 54
5.8	ระยะความสูงใส่ลวดความร้อนถึงฐานรองซิลิคอน 55
5.9	ภาพถ่ายพื้นผิวฟิล์มเพชรด้วยเครื่อง SEM อัตราขยาย 3,500 เท่า โดยใช้ระยะห่าง ระหว่างใส่ลวดความร้อนกับฐานรองซิลิคอน (ก) 4.5 มิลลิเมตร (ข) 3.5 มิลลิเมตร และ(ค) 3 มิลลิเมตรตามลำดับ 55
5.10	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่ฟิล์มเพชรกับความดันในขณะ สังเคราะห์ 56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มเพชรกับเวลาในการสังเคราะห์	57
5.12 ภาพถ่ายภาพตัดขวางด้วยเครื่อง SEM อัตราขยาย 2000 เท่า	58
5.13 ไดอะแกรมเครื่องกัดเพชรด้วยวิธีไมโครเวฟพลาสมา	58
5.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความลึกการกัดกับเวลาที่ความดันค่าต่าง ๆ (ก) 6.5 ทอร์ (ข) 7.5 ทอร์ และ(ค) 8.5 ทอร์	59
5.15 ภาพถ่ายโครงสร้างตัวต้านทานเพชรด้วยกล้องจุลทรรศน์ขยาย 1000 เท่า โดยการ เปรียบเทียบตัวต้านทาน (ก) ก่อนการกัดและ(ข) หลังการกัด	60
5.16 ภาพถ่ายทรานสดิวเซอร์ความดันที่ถูกบรรจุอยู่ในภาชนะปิด	61
5.17 ภาพถ่ายการประกอบชุดวัดและทดสอบทรานสดิวเซอร์ความดัน	62
5.18 วงจรวิทสโตนบริดจ์แบบควอเตอร์บริดจ์สำหรับทดสอบความไวของตัวต้านทาน ตัวเดียว ๆ บนไดอะแฟรมทรานสดิวเซอร์ความดัน	62
5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่พ่วงกับความดันที่มีต่อตัวต้านทาน (ก) ในแนว ตั้งฉาก R_{p1} R_{p2} และ(ข) ในแนวขนาน R_{L1} R_{L2}	64
5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไป ΔR กับความดัน ที่ ประกอบด้วย (ก) ค่าความต้านทานในแนวตั้งฉากที่เปลี่ยนแปลงไป ΔR_{p1} ΔR_{p2} และ (ข) ค่าความต้านทานในแนวขนานที่เปลี่ยนแปลงไป ΔR_{L1} ΔR_{L2}	65
5.21 ตัวต้านทานทั้ง 4 ตัวของทรานสดิวเซอร์ความดันที่ต่อกันเป็นวงจรวิทสโตนบริดจ์ แบบฟูลบริดจ์	67
5.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเข้าที่พ่วงของวงจรบริดจ์กับความดันที่ค่าแหล่ง จ่ายแรงดันคงที่ต่าง ๆ กันคือ 5V 7.5V 10V และ 12.5 V ตามลำดับ	67

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
β	คุณภาพฟิล์มเพชร	---
D	ความเข้มสูงสุดของตำแหน่งยอดคลื่นรามานของเพชร	---
ND	ค่าเฉลี่ยความเข้มสูงสุดของตำแหน่งยอดคลื่นรามานที่ไม่ใช่เพชร ตั้งแต่ 1250-1650 cm^{-1}	---
σ_l	ความเค้นตามยาว	dyne/cm^2
σ_t	ความเค้นตามขวาง	dyne/cm^2
π_l	สัมประสิทธิ์เปียโซรีซีฟที่ไปตามยาว	cm^2/dyne
π_t	สัมประสิทธิ์เปียโซรีซีฟที่ไปตามขวาง	cm^2/dyne
$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_L$	อัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงความต้านทานในแนวขนาน	---
$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_P$	อัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงความต้านทานในแนวตั้งฉาก	---
$\sigma_{(x,y)}$	ตำแหน่งความเค้นบนไดอะแฟรม	---
$\bar{\sigma}_{(x,y)}$	ความเค้นโคเมนชันเลส	---
l	ขนาดความกว้างของไดอะแฟรม	μm
h	ความหนาของไดอะแฟรม	μm
p	ความดันที่ให้กับไดอะแฟรม	kgf/cm^2
$\bar{E}$	สนามไฟฟ้า	V/m
J	ความหนาแน่นกระแส	A/m^2
ρ_0	พิกัดความต้านทานเริ่มต้น	$\Omega\text{-cm}$
$\langle \pi_l \rangle$	สัมประสิทธิ์เปียโซรีซีฟที่ไปตามยาวเฉลี่ย	cm^2/dyne
$\langle \pi_t \rangle$	สัมประสิทธิ์เปียโซรีซีฟที่ไปตามขวางเฉลี่ย	cm^2/dyne
GF_l	เกจแฟกเตอร์ตามยาว	---
GF_t	เกจแฟกเตอร์ตามขวาง	---
$\langle Y \rangle$	ยังโมดูลัสเฉลี่ย	dyne/cm^2
ε_l	ความเครียด	---

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
S	ความไวในการตอบสนองต่อความดัน	$\mu\text{V/V}\cdot\text{kgf/cm}^2$
ΔV	การเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตของวงจรบริดจ์	mV
Δp	การเปลี่ยนแปลงความดัน	kgf/cm^2
V_i	แหล่งจ่ายแรงดันคงที่ของวงจรบริดจ์	V
E_0	แรงดันเอาต์พุตจากวงจรขยาย	mV
V_0	แรงดันเข้าที่พุทจากวงจรบริดจ์	mV
G	อัตราขยายแรงดัน	---
W_0	ความกว้างของมัลติคัมแบบ	μm
W_b	ความกว้างของไดอะแฟรมหลังการกัด	μm
d	ความลึกของการกัด	μm

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของการวิจัย

มนุษย์สามารถรับรู้สิ่งต่าง ๆ ที่อยู่รอบตัวเองได้เนื่องจากมนุษย์มีระบบประสาทสัมผัสทั้ง 5 คือ หูรับฟังเสียง ร่างกายรับการสัมผัส จมูกใช้ในการดมกลิ่น ลิ้นใช้ในการลิ้มรสและตาใช้ในการมองเห็น แต่การรับรู้ของมนุษย์นั้นมีขอบเขตจำกัด ซึ่งถ้าสิ่งที่รับรู้หรือสัมผัสมีปริมาณมากเกินไปจะทำให้เป็นอันตรายต่อร่างกาย แต่ถ้าน้อยเกินไปก็จะทำให้มนุษย์ไม่สามารถรับรู้การเปลี่ยนแปลงได้ ดังนั้นมนุษย์จึงพยายามคิดค้นประดิษฐ์อุปกรณ์ที่สามารถตรวจวัดได้โดยการแปลงสัญญาณที่ไม่ทำอันตรายต่อร่างกายโดยที่มนุษย์สามารถรับรู้ได้เช่น เครื่องตรวจจับแก๊สพิษในโรงงานด้วยการส่งสัญญาณเสียงเตือน การมองในที่มืดโดยใช้กล้องอินฟราเรดเป็นต้น การแปลงสัญญาณอย่างหนึ่งให้เป็นสัญญาณอีกอย่างหนึ่งเราเรียกว่า ทรานสดิวเซอร์ (Transducer) ซึ่งมีอยู่มากมายหลายชนิด เช่น ทรานสดิวเซอร์ความร้อน แสง แม่เหล็ก หรือทรานสดิวเซอร์ทางกล เป็นต้น โดยทรานสดิวเซอร์แต่ละชนิดจะอาศัยหลักการตรวจวัดที่แตกต่างกันไป ในส่วนของทรานสดิวเซอร์ทางกล การตรวจวัดทางกลและเทคนิคที่ใช้มีอยู่มากมายหลายชนิดแตกต่างกันไปดังตารางที่ 1

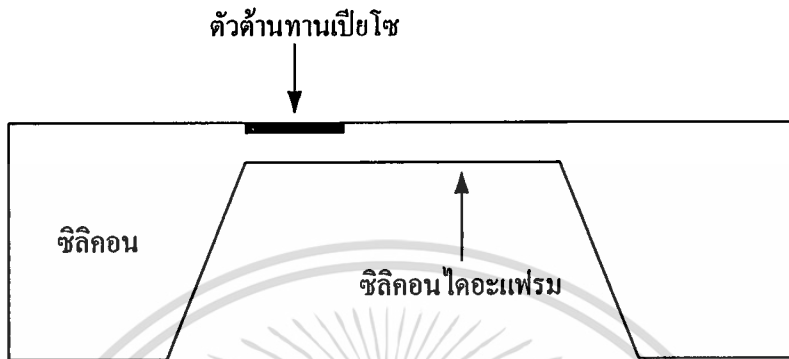
ตารางที่ 1 เทคนิคการตรวจวัดเซนเซอร์ทางกล[1]

เทคนิคการตรวจวัด	เซนเซอร์
เพียโซรีซิสทีฟ (Piezoresistive)	ความดันและอัตราเร่ง
คาปาซิทีฟ (Capacitive)	ความดันและอัตราเร่ง
เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric)	ความดันและอัตราเร่ง
ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ (Optoelectronic)	ตำแหน่งและความเร็ว
แมกเนติกส์ (Magnetic)	ตำแหน่ง ความเร็วและสนามแม่เหล็ก

เพียโซรีซิสทีฟ เป็นเทคนิคการตรวจวัดเซนเซอร์ทางกลที่ถูกค้นพบขึ้นในยุคแรก ๆ โดยจะอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานเมื่อมีแรงมากระทำ เซนเซอร์ทางกลที่อาศัยหลักการของเพียโซรีซิสทีฟนี้สามารถแบ่งตามโครงสร้างได้ 2 แบบคือโครงสร้างแบบไดอะแฟรมและโครงสร้างแบบคาน

1. โครงสร้างแบบโคอะเฟรม

เซนเซอร์ที่มีโครงสร้างแบบโคอะเฟรมนี้ คือเซนเซอร์ความดันซึ่งสามารถสร้างได้โดยการกัดซิลิคอนในบริเวณที่กำหนดไว้จนกระทั่งได้โคอะเฟรมที่มีความหนาตามต้องการ หลังจากนั้นจึงสร้างตัวต้านทานเปียโซให้อยู่บริเวณขอบของโคอะเฟรมนี้ ดังรูปที่ 1.1

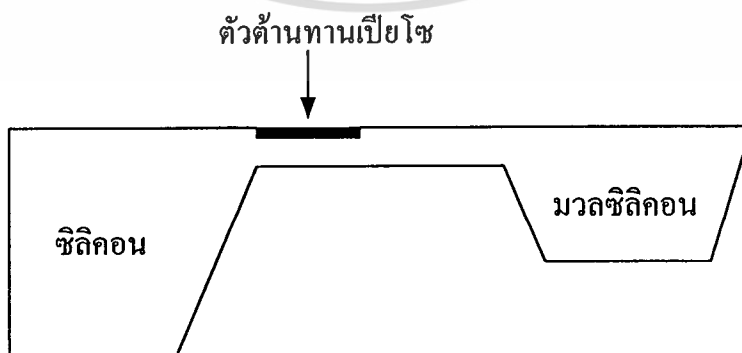


รูปที่ 1.1 ภาคตัดขวางเซนเซอร์ความดัน โครงสร้างแบบโคอะเฟรม

จากรูปที่ 1.1 เมื่อมีความดันมากกระทำกับเซนเซอร์นี้ โคอะเฟรมจะเกิดการโค้งขึ้นหรือลง ทำให้ตัวต้านทานเปียโซซึ่งถูกสร้างอยู่ที่บริเวณขอบของโคอะเฟรมมีความเค้นเกิดขึ้นจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานโดยจะมีความสัมพันธ์กับความดันที่มากระทำ

2. โครงสร้างแบบคาน

เซนเซอร์ที่มีโครงสร้างแบบคานนี้คือ เซนเซอร์อัตราเร่ง ซึ่งสามารถสร้างได้โดยการกัดซิลิคอนให้เป็นหลุมลึกและเหลือเป็นคานไว้ โดยจะต้องคำนวณเวลาและอัตราการกัดให้เหมาะสมเพื่อให้ปลายของคานมีมวลของซิลิคอนเหลือไว้ หลังจากนั้นจึงสร้างตัวต้านทานเปียโซ ให้อยู่ที่บริเวณขอบของคาน ดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 ภาคตัดขวางเซนเซอร์อัตราเร่ง โครงสร้างแบบคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 1.2 เมื่อมีความเร่งมากกระทำกับคานนี้จะทำให้คานเกิดการเบี่ยงเบน ตัวต้านทาน ซึ่งถูกสร้างอยู่ที่บริเวณขอบของคานจะเกิดความเค้นขึ้นมากที่สุด ทำให้ค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราเร่งที่มากกระทำกับคานนี้

จากโครงสร้างที่ 2 แบบ พบว่าโครงสร้างแบบโคอะแฟรมจะมีกระบวนการสร้างที่ไม่ซับซ้อนและสามารถควบคุมความหนาของโคอะแฟรมจากการกดซิลิคอนได้ไม่ยากนัก เมื่อเทียบกับโครงสร้างแบบคานแล้วจะต้องทำการคำนวณอัตราการกดและควบคุมเวลาในการกดให้เหมาะสม จึงจะทำให้ได้คานและน้ำหนักมวลที่ปลายคานตามที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งจะมีความยุ่งยากและซับซ้อนกว่ามาก ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาและสร้างเซนเซอร์ความดันที่มีโครงสร้างแบบโคอะแฟรมเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางเปียโซเมื่อได้รับความดัน และนอกจากนี้แล้วเซนเซอร์ความดันยังเป็นทรานสดิวเซอร์ทางกลที่นิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในการวัดปริมาณต่าง ๆ ได้อย่างมากมาย เช่น น้ำหนัก ความดัน ความเค้น และการสัมผัสเตือน เป็นต้น เซนเซอร์ความดันหรือทรานสดิวเซอร์ความดันส่วนใหญ่ที่พบเห็นจะมาจากวัสดุซิลิคอน ซึ่งจากงานค้นคว้าและวิจัยต่าง ๆ พบว่า ซิลิคอนนั้นไม่สามารถทนต่อปฏิกิริยาเคมี กรดและด่างได้ ไม่สามารถทำงานในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูงได้ ซึ่งจะทำให้ไม่สามารถควบคุมการทำงานและทำให้การทำงานผิดเพี้ยนไป ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นหาวัสดุอื่นมาแทนวัสดุเดิมที่มีอยู่ ต่อมาได้มีนักวิจัยสามารถสังเคราะห์ฟิล์มเพชรขึ้นได้เป็นผลสำเร็จ ซึ่งฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นนั้นมีคุณสมบัติเด่น ๆ ที่เหนือกว่าซิลิคอนหลายประการ เช่น สามารถทนต่อปฏิกิริยาได้ดี นำความร้อนได้ดี มีความแข็งที่สุดและมีค่ายังโมดูลัส (Young's Modulus) สูงกว่าซิลิคอน เป็นต้น จากคุณสมบัติดังกล่าวจึงได้มีการศึกษาและทดลองนำฟิล์มเพชรมาสร้างและพัฒนาอุปกรณ์ตรวจจับให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นเพื่อต้องการนำมาแทนวัสดุเดิมที่มีอยู่

1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาและวิจัย โดยการนำฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นมาสร้างเป็นทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดเพชร เพื่อศึกษาและทดลองถึงกระบวนการสร้างต่าง ๆ รวมทั้งศึกษาความไวในการตอบสนองต่อความดันของโคอะแฟรมฟิล์มเพชรโดยทำการออกแบบและสร้างทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดเพชรด้วยการสร้างตัวต้านทานเพชรชนิดเอ็กทรีนซิคชนิด p บนโคอะแฟรมฟิล์มบางเพชรชนิดอินทรีนซิค ซึ่งตัวต้านทานเพชรบนโคอะแฟรมนี้จะถูกต่อกันเป็นวงจรบริดจ์ และเมื่อให้ความดันกับโคอะแฟรมนี้ โคอะแฟรมจะเกิดการแอ่นตัวทำให้ค่าความต้านทานเกิดการเปลี่ยนแปลง วงจรบริดจ์จะไม่สมดุลย์เป็นผลให้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรบริดจ์เกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้จะเป็นสัดส่วนกับความดันที่ป้อนให้ โดยในการสร้างทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดเพชรนี้จะเริ่มจากการศึกษาการศึกษาการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรทั้งทางด้านกายภาพ และทางด้านฟิสิกส์โดยการวิเคราะห์ผลด้วยรามานสเปกโทรสโกปีและกล้องจุลทรรศน์

อิเล็กทรอนิกส์เพื่อให้ฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้มีคุณภาพดีก่อนนำไปสร้างเป็นทรานซิสเตอร์ความดัน โดยทำการศึกษาเงื่อนไขตัวแปรต่าง ๆ ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร เช่น การเตรียมผิวหน้าฐานรอง ซิลิคอน ปริมาณไฮโดรเจนเททราเอทิลแอลกอฮอล์ ความดันในขณะสังเคราะห์ ระยะความสูง ระหว่างไส้หลอดความร้อนกับฐานรองซิลิคอน และเวลาในการสร้าง เป็นต้น ฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นจะถูกนำไปสร้างเป็นทรานซิสเตอร์ความดันโดยจะทำการศึกษาค่าความไวในการตอบสนองต่อความดันของตัวต้านทานตัวเดียว ๆ ทุกตัวบนไดอะแฟรมโดยใช้วงจรวิทสตโนบริดจ์ แบบฮาฟบริดจ์ ซึ่งจะช่วยให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานทุกตัวบนไดอะแฟรมที่ความดันค่าต่าง ๆ นอกจากนี้ยังทำการศึกษาค่าความไวของทรานซิสเตอร์นี้โดยใช้วงจรวิทสตโนบริดจ์แบบฟูลบริดจ์ เพื่อทำการเปรียบเทียบและสรุปความไวของทรานซิสเตอร์ความดันนี้



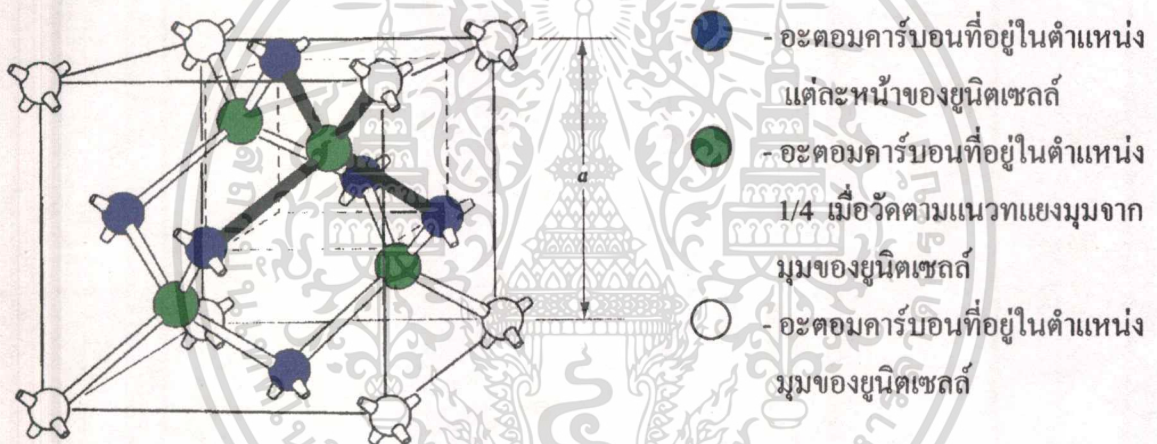
บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ฟิล์มเพชร

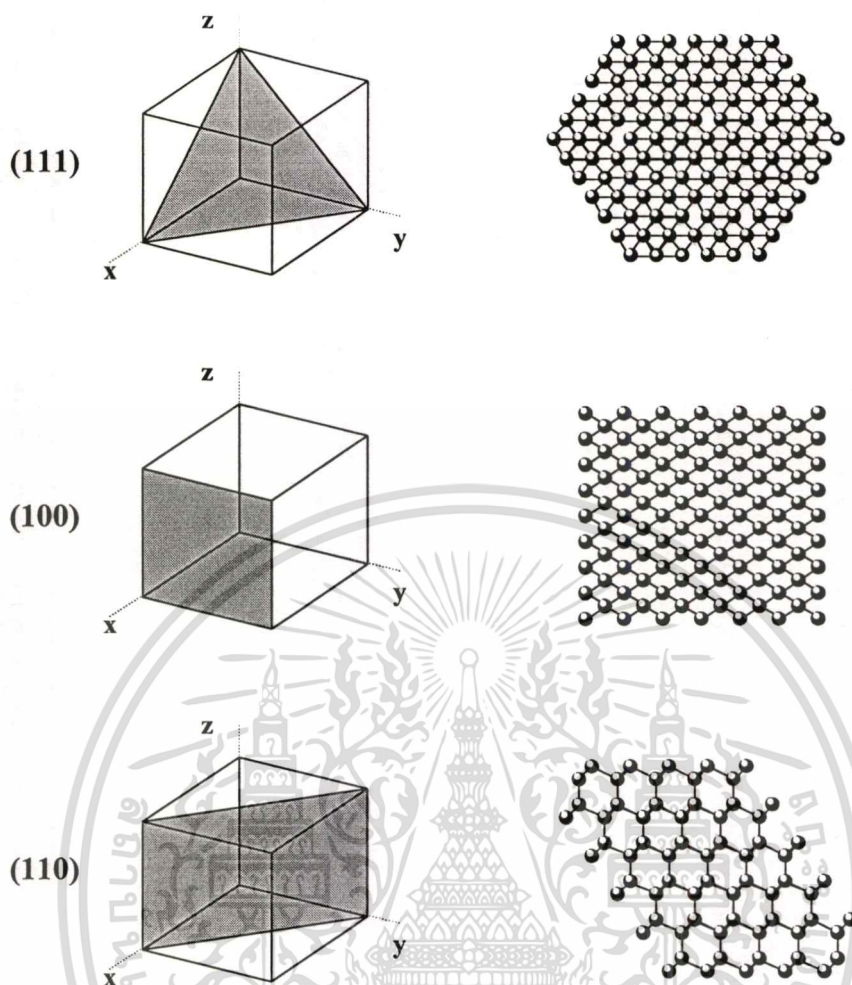
2.1.1 ลักษณะโครงสร้างผลึกเพชร[2]

โครงสร้างของผลึกเพชรจะมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ Face-center cubic อะตอมคาร์บอนแต่ละอะตอมจะจับตัวแบบ tetrahedral กับอะตอมคาร์บอนทั้งสี่ตัวที่อยู่รอบ ๆ ตัวมันเองด้วยพันธะโควาเลนต์ ซึ่งในหนึ่งเซลล์ (Unit Cell) นั้นจะประกอบได้ด้วยเนื้ออะตอมคาร์บอน 8 อะตอม โดย 1/8 ของอะตอมจะอยู่ที่มุมทั้งแปด 1/2 อะตอมจะอยู่ที่แต่ละหน้าของยูนิตเซลล์และอีก 4 อะตอมจะอยู่ในตำแหน่ง 1/4 เมื่อวัดตามแนวทแยงมุมจากมุมของยูนิตเซลล์ ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แบบจำลองโครงสร้างผลึกเพชร 1 ยูนิตเซลล์

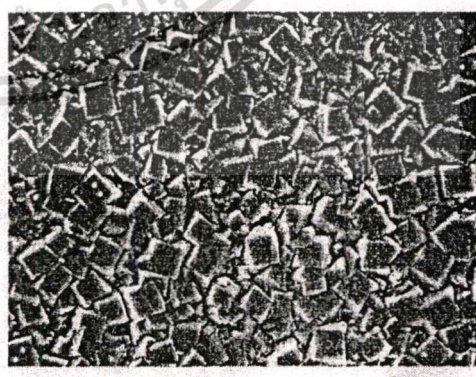
เมื่อพิจารณาระนาบของผลึกเพชรพบว่าสามารถเกิดการเรียงตัวได้หลายระนาบ เช่น ฟิล์มเพชรในระนาบ (111) อะตอมคาร์บอนในระนาบเดียวกันจะเรียงตัวกันเป็นสามเหลี่ยม และฟิล์มเพชรระนาบ (100) อะตอมคาร์บอนในระนาบเดียวกันจะเรียงตัวกันเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ส่วนระนาบ (110) อะตอมคาร์บอนในระนาบเดียวกันจะเรียงตัวเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังรูปที่ 2.2 ส่วนในรูปที่ 2.3 เป็นตัวอย่างภาพถ่ายฟิล์มเพชรด้วยกล้องจุลทรรศน์ ซึ่งเป็นฟิล์มเพชรในระนาบ (111) และ (100) โดยการเกิดระนาบใด ๆ ของฟิล์มเพชรนั้นจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการสังเคราะห์ขณะนั้นว่าเหมาะสมที่จะเกิดในระนาบใด



รูปที่ 2.2 ระนาบของฟิล์มเพชร



(ก) ระนาบ (111)



(ข) ระนาบ (100)

รูปที่ 2.3 ภาพถ่ายฟิล์มเพชรด้วยกล้องจุลทรรศน์ (ก) ระนาบ (111) และ (ข) ระนาบ (100)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 คุณสมบัติต่าง ๆ ของเพชร

เพชรเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษหลายอย่าง เช่น มีความแข็งที่สุด ทนต่อการกัดกร่อนของปฏิกิริยาเคมีเช่น กรดและด่างได้ดี สามารถตอบสนองต่อความยาวคลื่นได้ดีในช่วงตั้งแต่ 220 นาโนเมตร ในย่าน UV ถึงย่านอินฟราเรด และสามารถนำความร้อนได้ดี เป็นต้น คุณสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้ไม่ว่าจะเป็นทางด้านกลศาสตร์ ความร้อน แสงและทางเคมี ได้ถูกรวบรวมอยู่ในตัวมันเอง ซึ่งไม่มีอยู่ในวัสดุอื่นทั่วไป เพชรยังถูกจัดให้เป็นสารกึ่งตัวนำอีกชนิดหนึ่ง เนื่องจากเพชรอยู่ในรูปองค์ประกอบหนึ่งของคาร์บอนซึ่งเป็นธาตุในหมู่ 4 เช่นเดียวกับซิลิคอนและเยอรมันเนียม โดยสารกึ่งตัวนำเพชรจะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีกว่าซิลิคอน และสารกึ่งตัวนำอื่น ๆ หลายประการดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเพชรกับสารกึ่งตัวนำอื่น ๆ[3]

คุณสมบัติ	เพชร	ซิลิคอน	แกเลียมอาร์เซไนด์	เยอรมันเนียม
Thermal conductivity (W/cm-k)	20	1.5	0.455	0.28
Electron mobility ($\text{cm}^2/\text{V-s}$)	2,000	1,500	8,800	3,900
Hole mobility ($\text{cm}^2/\text{V-s}$)	1,800	600	400	1,900
Electron saturated velocity (cm/s)	2.7×10^7	1×10^7	1.2×10^7	5×10^6
Hole saturated velocity (cm/s)	1.05×10^7	9×10^6	1×10^7	4×10^6
Density of states effective mass				
Electron	0.57	1.1	0.068	0.55
Hole	1.2	0.8	0.5	0.37
Effective density of states				
Conduction band (cm^{-3})	1×10^{19}	2.8×10^{19}	4.7×10^{17}	1.04×10^{19}
Valence band (cm^{-3})	3×10^{19}	1×10^{19}	7×10^{18}	6.0×10^{18}
Breakdown field (V/cm)	10^7	5×10^6	3×10^5	10^4
Resistivity ($\Omega \cdot \text{cm}$)	10^{16}	10^3	10^8	10
Dielectric constant (ϵ)	5.7	11	12.5	15.8
Energy gap (eV)	5.45	1.1	1.42	0.72

นอกจากนี้เพชรยังเป็นวัสดุที่จะถูกนำมาพิจารณาเป็นอันดับต้น ๆ ในการสร้างเป็นอุปกรณ์จำพวก Micromechanics และ Sensor and Actuator เนื่องจากมีคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์ที่ดีกว่าวัสดุอื่นหลายประการดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์ของเพชรกับวัสดุอื่น ๆ[4]

Matrial	Yield Strength (10 ⁻¹⁰ dynes/cm ²)	Knoop Hardness (kg/mm ²)	Young's Modulus (10 ¹² dynes/cm ²)	Density (gm/cm ³)
Daimond*	53	7000	10.35	3.5
SiC*	21	2480	7.0	3.2
TiC*	20	2470	4.97	4.9
Al ₂ O ₃	15.4	2100	5.3	4.0
Si ₃ N ₄ *	14	3486	3.85	3.1
Iron	12.6	400	1.96	7.8
SiO ₂	8.4	820	0.73	2.5
Si*	7.0	850	1.9	2.3
Steel	4.2	1500	2.1	7.9
W	4.0	485	4.1	19.3
Stainless Steel	2.1	660	2.0	7.9
Mo	2.1	275	3.43	10.3
Al	0.17	130	0.70	2.7
* Single Crystal				

2.1.3 เทคนิคการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

ในปัจจุบันการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรสามารถกระทำได้ที่ความดันและอุณหภูมิต่ำ โดยการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรนั้นจะใช้วิธี CVD (Chemical Vapour Deposition) ซึ่งมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน[4] เช่น แบบไส้หลอดความร้อน (Hot-filament CVD) แบบพลาสมา (plasma CVD) แบบพลาสมาทอร์ช (Plasma Torch CVD) และแบบคอมบัสชัน (Combustion CVD) เป็นต้น ซึ่งในแต่ละแบบของการสังเคราะห์จะมีเงื่อนไขแตกต่างกันไป รวมทั้งคุณสมบัติของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นก็แตกต่างกันด้วยเช่นกัน โดยสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.3 และ 2.4 แต่อย่างไรก็ตามวิธีการทั้งหมดที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร ลักษณะรูปร่างของฟิล์ม และลักษณะสเปกตรัมของ Raman จะมีลักษณะคล้ายกัน

ตารางที่ 2.3 เทคนิคและเงื่อนไขในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD แบบต่าง ๆ [5]

รูปแบบ พลังงาน	ประเภท	เงื่อนไขการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรบนฐานรองรับซิลิคอน โดยใช้ก๊าซมีเทน (CH ₄)					
		อุณหภูมิฐานรองรับ (องศาเซลเซียส)	ความดัน (ทอร์)	อัตราไหลก๊าซ ไฮโดรเจน (ลิตรต่อนาที)	ปริมาณ คาร์บอน:ไฮโดรเจน	ก๊าซเฉื่อย (ลิตรต่อนาที)	
Hot filament	W , Rh, Pt ,Ta	<1000	10 – 100	0.1 – 1	<1%		
Plasma	DC	<1000	10 – 50	0.1 – 1	<1%		
	RF	<1000	1 – 10	0.1 – 1			
	Microwave	<1000	100	0.1 – 1			
	ECR	400 – 600	<10	0.1 – 1			
Plasma Torch	DC arc jet RF Microwave	≅1000	500 – 760	1 – 5	5 – 15%	>10	
combustion	C ₂ H ₂ + O ₂	≅1300	760	O ₂ 5 (ลิตรต่อนาที)	C/O 97%	1 - 2	

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยวิธี CVD แบบต่าง ๆ [5]

รูปแบบ พลังงาน	ประเภท	คุณสมบัติจากการสร้างด้วยวิธี CVD แบบต่าง ๆ						
		อัตราการเกิด (ไมครอน/ชั่วโมง)	ขนาดของฟิล์มที่ สังเคราะห์ได้ (เซนติเมตร)	คุณภาพของฟิล์ม (วิเคราะห์ด้วยรามาน)	ความสม่ำเสมอ (Uniformity)	ลักษณะ ความหนา ฟิล์ม	การทำลายพื้น ผิวฟิล์ม	แหล่ง กำเนิด พลังงาน
Hot Filament	W , Rh , Pt , Ta	1 - 5	≥10	ดีถึงดีมาก	ดี	ได้ฟิล์มบาง ถึงหนา	อุณหภูมิ	Filament
Plasma	DC RF Microwave ECR	<1 1 1 - 5	≥10 1 - 2 2 - 5 ไม่ปรากฏ	ต่ำ ดี ดีถึงดีมาก ต่ำ	ดี พอใช้ พอใช้ ไม่ปรากฏ	ได้ฟิล์มบาง ถึงหนา	อิเล็กตรอน และไอออน	Electrode, Walls
Plasma Touch	DC arc RF Microwave	60	1 - 2 1 - 2 1 - 2	ดีมาก ดี ดี	พอใช้ ต่ำ ต่ำ	ได้ฟิล์มหนา	อิเล็กตรอน และไอออน	Electrode, Walls
Combustion	C ₂ H ₂ + O ₂	20	1 - 2	ดีถึงดีมาก	พอใช้	ได้ฟิล์มหนา	อุณหภูมิ	Nozzle, ambient

2.1.4 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรไม่ว่าจะใช้เทคนิคใดหรือมีวิธีการสังเคราะห์ต่างกันอย่างไรก็ตาม จะต้องมียุทธศาสตร์พื้นฐานที่สำคัญเหมือนกันดังนี้

1. ในระบบจะต้องมีอะตอมของไฮโดรเจน
2. ต้องมีการกระตุ้นก๊าซที่มีอนุภาคของคาร์บอน
3. อุณหภูมิฐานรองต้องมีความเหมาะสม
4. ต้องมีการเตรียมพื้นผิวของฐานรอง

การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธีการ CVD จะต้องอาศัยหลักการพื้นฐานทั้ง 4 ข้อดังกล่าว และจำเป็นต้องควบคุมเงื่อนไขการสังเคราะห์ให้เหมาะสมเพื่อให้ฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้มีคุณภาพดี และมีอัตราการเกิดฟิล์มเพชรสูง การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD แบบใช้ความร้อนเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ถูกค้นพบในยุคแรก ๆ ของการสังเคราะห์ที่ความดันและอุณหภูมิต่ำ และเป็นวิธีที่นิยมถูกนำมาใช้ในการสังเคราะห์ เนื่องจากเป็นวิธีการสังเคราะห์ที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และมีต้นทุนต่ำ นอกจากนี้ฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ยังมีคุณภาพสูง และอัตราการก่อตัวสูงพอสมควร

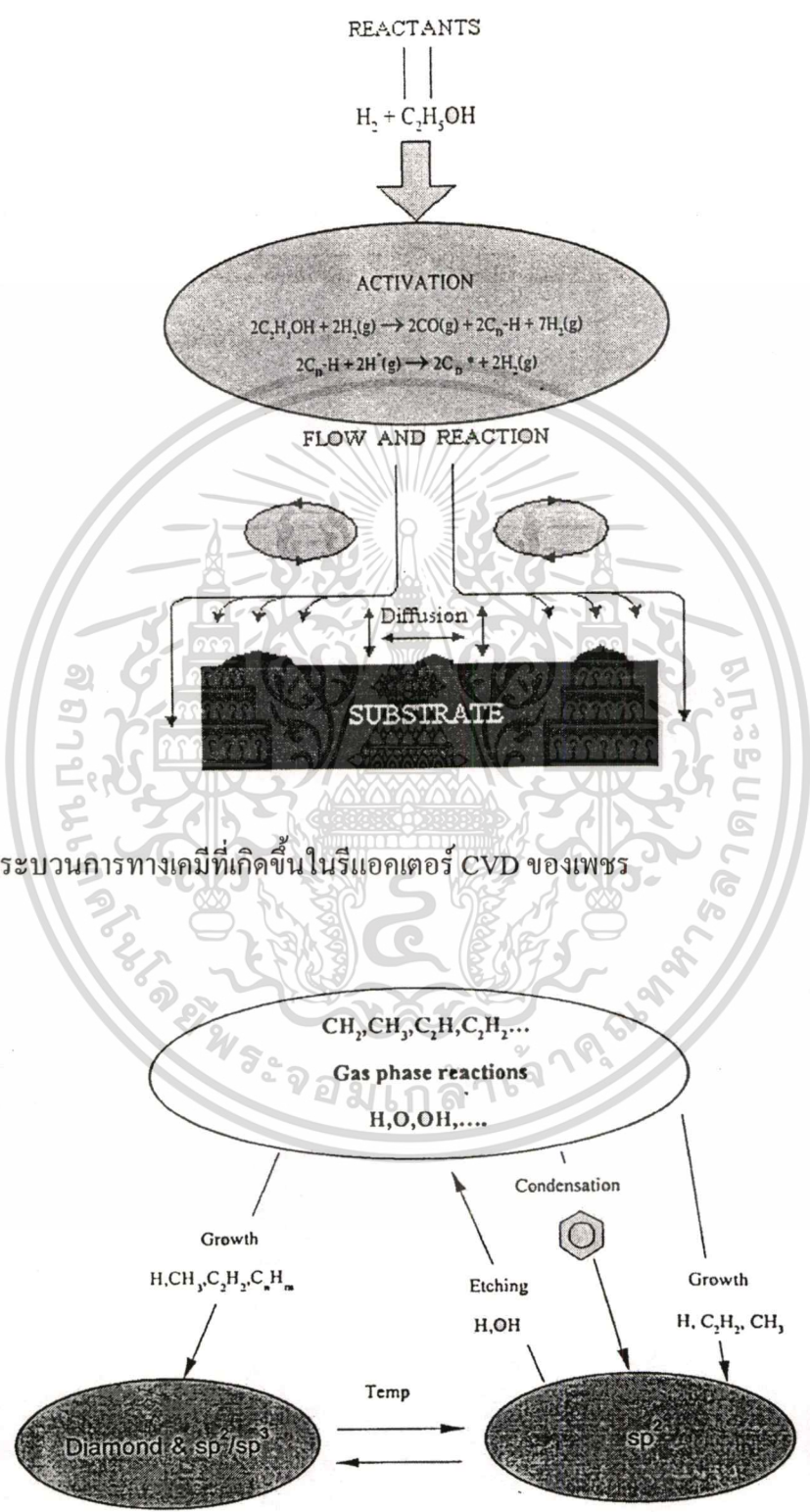
2.1.4.1 กระบวนการของก๊าซเฟส

กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธีการ CVD มีหลักการพื้นฐานก็เพื่อต้องการกระตุ้นก๊าซเฟสด้วยพลังงานสถานะสูงโดยมีวัตถุประสงค์ที่สำคัญ 2 ประการคือ

1. การทำให้ก๊าซไฮโดรคาร์บอนแตกตัวเป็นโมเลกุล และพร้อมที่จะเกิดปฏิกิริยาการก่อตัวที่พื้นผิว
2. การแยกโมเลกุลไฮโดรเจน เพื่อสร้างสมดุลของความหนาแน่นสูงของก๊าซเฟสของอะตอมไฮโดรเจน

จากแผนภาพในรูปที่ 2.4 แสดงถึงกระบวนการที่เกิดขึ้นในรีแอกเตอร์ CVD โดยใช้ก๊าซผสมระหว่าง มีเทน (CH_4) และ ไฮโดรเจน (H_2) เป็นรีแอกแตนต์ เมื่อให้พลังงานและอุณหภูมิสูงเช่น พลาสมา ได้ลวดความร้อน หรือคอมบัสชันเฟรม รีแอกแตนต์ที่อยู่ในบริเวณนี้จะถูกกระตุ้น โดยปฏิกิริยาเคมีจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลไฮโดรเจนแตกตัวเป็นไฮโดรเจนอะตอม หลังจากนั้นจะเกิดการชนกันของก๊าซและเกิดปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ขึ้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเหล่านี้จะถูกส่งผ่านโดยการไหล การแพร่ และการพาไปยังฐานรอง จนในที่สุดที่บริเวณใกล้กับฐานรองการแพร่จะเข้าสู่บริเวณที่มีการไหลหยุดนิ่งซึ่งเรียกว่า “Boundary Layer” ที่บริเวณพื้นผิวของฐานรองนี้จะมีกระบวนการหลายอย่างเกิดขึ้นเช่น การดูดกลืนความร้อน การคายความร้อน และการแพร่บริเวณผิวและในเนื้อสาร ปฏิกิริยาต่างๆที่เกิดขึ้นมีความสำคัญต่อการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร โดยจะเป็นปัจจัยหลักในการนิเวศิชั่น การปลูกผลึก และการได้มาซึ่งความสมบูรณ์ของผลึก ทั้งนี้จะต้อง

ควบคุมเงื่อนไขตัวแปรต่าง ๆ ให้เหมาะสมดังที่ได้กล่าวไปแล้ว เพื่อให้ได้มาซึ่งการเกิดเฟสของเพชรขึ้น



รูปที่ 2.4 กระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นในรีแอกเตอร์ CVD ของเพชร

รูปที่ 2.5 กระบวนการเกิดแกรไฟต์และเพชรขณะสังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD คาร์บอนสามารถมีพันธะได้หลายรูปขึ้นอยู่กับว่าการ Hybridization เป็นแบบ sp^1 sp^2 หรือ sp^3 ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งแสดงถึงกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรที่คาร์บอนสามารถเป็นได้ทั้งเพชร (sp^3) หรือกราไฟต์ (sp^2) โดยสามารถเปลี่ยนพันธะไปมาระหว่าง sp^2 ไป sp^3 หรือ sp^3 ไป sp^2 ได้ ในการกำจัดการบอนรูปอื่นที่ไม่ใช่เพชร การกำหนดอัตราการก่อตัว และคุณภาพในการเกิดเพชร จะขึ้นอยู่กับปัจจัยเงื่อนไขในการสังเคราะห์เช่น อุณหภูมิ ความดัน วิธีการกระตุ้นก๊าซ และความเข้มข้นของก๊าซที่ใช้ เป็นต้น

2.1.4.2 การนิวคลีเอชัน

การนิวคลีเอชันเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นต่อจากกระบวนการของก๊าซเฟสซึ่งเป็นกระบวนการก่อตัวของผลึกเพชรเริ่มต้นที่บริเวณผิวหน้าฐานรอง โดยเริ่มจากอนุภาคนิวเคลียสของก๊าซเฟสที่แพร่ไปบนพื้นผิวฐานรองจะก่อตัวด้วยพันธะ sp^2 อะตอมคาร์บอนจะแพร่เข้าไปสู่ฐานรองจนถึงค่า ๆ หนึ่ง การแพร่ของอะตอมคาร์บอนจะไม่สามารถเกิดขึ้นได้อีก อะตอมคาร์บอนที่แพร่เข้าไปนี้จะทำปฏิกิริยากับอะตอมของฐานรองทำให้เกิดเป็นชั้นบาง ๆ ขึ้นเรียกว่า “Intermediate Layer” เมื่ออะตอมคาร์บอนเกาะตัวกันมากพอ จะเกิดขึ้นตอนการเกิดเพชรขึ้นโดยจะเป็นการเปลี่ยนพันธะ sp^2 ไปเป็นพันธะ sp^3 โดยใช้ไฮโดรเจนเป็นตัวช่วย และการนิวคลีเอชันจะหยุดลงขณะที่เกิดผลึก หลังจากที่เกิดผลึกเพชรแล้ว พื้นผิวฐานรองจะถูกปกคลุมไปด้วยผลึกและเกิดการฟอร์มตัวเป็นผลึกเพชรหลายรูปต่อไป ขนาดและรูปร่างของผลึกจะถูกจำกัดด้วยผลึกซึ่งกันและกันเอง ฟิล์มเพชรที่เกิดขึ้นจะมีขนาดผลึกที่เล็กแต่จะมีความหนาแน่นสูง

ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรมีความจำเป็นที่จะต้องควบคุมการเกิดนิวคลีเอชันเพื่อให้ได้ขนาดผลึก ระบาย และคุณสมบัติอื่น ๆ ที่ต้องการจะนำไปประยุกต์ใช้กับงานที่เหมาะสม เช่น ความเรียบของฟิล์มที่เป็นผลึกรวมเพื่อใช้งานทางด้านแสงจึงต้องการความหนาแน่นของนิวคลีเอชันสูง ๆ และขนาดของผลึกที่เท่ากันหมดตลอดฐานรอง จากการศึกษพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดนิวคลีเอชันคือ อุณหภูมิ ไล่ลดความร้อนหรือพลาสมา องค์ประกอบของก๊าซ ความอึดตัวของอะตอมคาร์บอนกับไฮโดรเจน และอัตราการไหลของก๊าซ นอกจากนี้ปัจจัยดังกล่าวยังมีผลต่ออัตราการเกิด และลักษณะรูปร่างของผลึกอีกด้วย

2.1.4.3 การเตรียมฐานรอง

การเตรียมฐานรองจะมีอิทธิอย่างมากต่อการนิวคลีเอชัน และการก่อตัวของผลึกบนฐานรอง การเตรียมฐานรองสามารถเตรียมได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น การไบอัสด้วยไฟฟ้า การขัดผิวหน้าหรืออุลตราโซนิก และการชุบด้วยผงเพชร เป็นต้น โดยในแต่ละวิธีจะให้ความหนาแน่นและอัตราการเกิดฟิล์มเพชรต่างกัน ดังนั้นในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรจึงควรเตรียมผิวหน้าฐานรองเพื่อเป็นการเพิ่มความหนาแน่นของการนิวคลีเอชัน ซึ่งจะเป็นการกระตุ้นให้เกิดการฟอร์มตัวเป็นผลึกเพชรที่ฐานรองได้ง่ายขึ้น

2.1.5 คุณภาพฟิล์มเพชร

คุณภาพของฟิล์มเพชรเป็นตัวแปรหนึ่งที่จะบอกให้ทราบถึงฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นมีความเป็นเพชรมากน้อยอย่างไร โดยใช้ผลการวิเคราะห์ผลจากรามานสเปกโทสโกปีมาคำนวณหาว่าคุณภาพของฟิล์มเพชรได้ดังสมการที่ 2.1[6]

$$\beta = \frac{D}{D + ND} \quad (2.1)$$

เมื่อ β คือ คุณภาพของฟิล์มเพชร

D คือ ความเข้มสูงสุดของตำแหน่งยอดคลื่นรามานของเพชร

ND คือ ค่าเฉลี่ยความเข้มสูงสุดของตำแหน่งยอดคลื่นรามานที่ไม่ใช่เพชรตั้งแต่ 1250 – 1650 cm^{-1}

ในการคำนวณคุณภาพของฟิล์มเพชร ค่าที่คำนวณได้จะอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 ซึ่งค่าของคุณภาพฟิล์มเพชรที่คำนวณได้เมื่อมีค่าเข้าใกล้ 1 จะหมายถึงฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้มีความเป็นเพชรสูง ในทางตรงข้ามถ้าคุณภาพของฟิล์มเพชรมีค่าเข้าใกล้ 0 จะหมายถึงฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้นั้นมีความเป็นเพชรต่ำ เนื่องจากมีการบดกรรไกรไฟท์ หรือการบดอะมอฟสในปริมาณสูง ทำให้ฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้นั้นไม่สามารถนำมาสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ ดังนั้นในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรจึงควรทดลองและหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดเพื่อให้สามารถนำฟิล์มเพชรที่มีคุณภาพดีไปประยุกต์ใช้งานได้

2.2 ทรานสดีวเซอร์ความดันชนิดเพชร

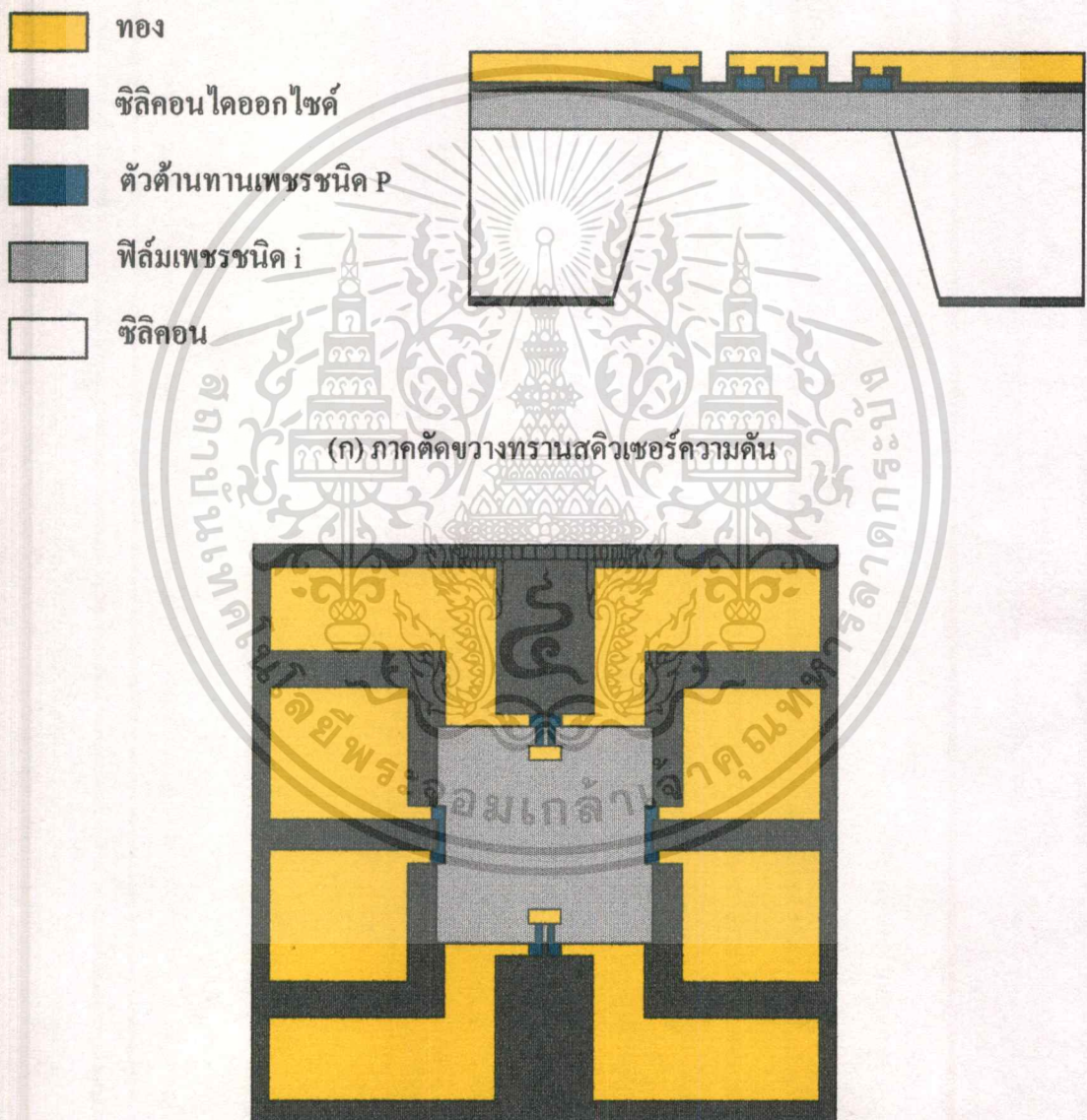
2.2.1 โครงสร้างทรานสดีวเซอร์ความดันชนิดเพชรแบบเปียโซรีซีฟที่ปบนฟิล์มบางเพชร

ทรานสดีวเซอร์ความดันชนิดเพชรแบบเปียโซรีซีฟที่ปบนฟิล์มบางเพชรมีหลักการทำงานโดยอาศัยปรากฏการณ์ของเปียโซรีซีฟที่ป ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ค่าความต้านทานของเนื้อสารเปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีความเค้นเกิดขึ้น โครงสร้างของทรานสดีวเซอร์ความดันชนิดนี้มีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน คือ ฟิล์มเพชร ไดอะแฟรมและตัวต้านทาน ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.6 ฟิล์มเพชรจะถูกสังเคราะห์บนฐานรองซิลิคอนระนาบ (100) ด้วยวิธี CVD แบบไล่ลดความร้อนที่ความดันต่ำ โดยการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิด i (อินทรินซิก) และต่อด้วยชนิด p (เอ็กทรินซิก) ด้วยการเติมอะตอมสารเจือชนิดโบรอน ไดอะแฟรมรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสสามารถสร้างได้โดยการใช้เทคนิคการกัดซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic) ซึ่งมีซิลิคอนไดออกไซด์เป็นหน้าฉากป้องกันการกัดในบริเวณที่ไม่ต้องการให้กัด ส่วนตัวต้านทานเพชรที่อยู่ภายในบริเวณไดอะแฟรมนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถสร้างได้โดยการกัดชั้นฟิล์มเพชรชนิด p ถึงชั้นฟิล์มเพชรชนิด i ด้วยวิธีการกัดแบบไมโครเวฟพลาสมา (Microwave Plasma) โดยมีซิลิคอนไดออกไซด์เป็นหน้ากากป้องกันการกัด

ตัวต้านทานเพชรชนิด p ที่อยู่ภายในบริเวณขอบของไดอะแฟรมนั้นจะถูกนำมาต่อกันเป็นวงจรบริดจ์ ขณะที่ให้แรงดันไฟฟ้าแก่วงจรบริดจ์โดยที่ยังไม่ให้ความดัน แรงดันไฟฟ้าเข้าที่พุทของวงจรบริดจ์จะมีค่าเป็น 0 โวลต์ เนื่องจากวงจรบริดจ์อยู่ในสถานะสมดุลและหลังจากที่ให้ความดันกับทรานสดิวเซอร์นี้ ไดอะแฟรมจะเกิดการแอ่นตัวทำให้ตัวต้านทานเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเข้าที่พุทนี้จะเป็นสัดส่วนกันกับความดันที่ป้อนให้



(ข) ชิปทรานสดิวเซอร์ความดันขนาด 3x3 มิลลิเมตร

รูปที่ 2.6 โครงสร้างทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดเพชรแบบเย็บโซ่ชิฟท์ (ก) ภาคตัดขวางทรานสดิวเซอร์ความดัน และ (ข) ชิปทรานสดิวเซอร์ความดันขนาด 3x3 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 สัมประสิทธิ์เพียโซรีซีฟที่ปตามยาวและสัมประสิทธิ์เพียโซรีซีฟที่ปตามขวาง[7,8]

เมื่อมีแรงใด ๆ มากระทำกับวัสดุแล้วทำให้วัสดุนั้นมีความเค้นเกิดขึ้น พบว่าสนามไฟฟ้า ($\vec{E}$) จะมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นกระแส (J) และ ความเค้น (σ) ดังสมการที่ 2.2

$$\vec{E} = \rho J + \pi J \sigma \quad (2.2)$$

เมื่อ ρ คือ พิกัดความต้านทาน

π คือ สัมประสิทธิ์เพียโซรีซีฟที่ปเทนเซอร์

สำหรับสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในทิศทางใด ๆ ในโครงสร้าง เมื่อพิจารณาจากสมการที่ 2.2 แล้ว จะสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\vec{E}_1 = \rho_0 J_1 + \pi_1 \rho_0 J_1 \sigma_1 \quad (2.3)$$

เมื่อ ρ_0 คือ พิกัดความต้านทานเริ่มต้น

π_1 คือ สัมประสิทธิ์เพียโซรีซีฟที่ปตามยาว (Longitudinal Piezoresistive Coefficient)

จากกฎของโอห์ม สนามไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์กับพิกัดความต้านทานและความหนาแน่นกระแสดังสมการที่ 2.4

$$\vec{E} = \rho J \quad (2.4)$$

เมื่อแทนค่าจากสมการที่ 2.4 ลงในสมการที่ 2.3 จะได้ว่า

$$\rho_1 J_1 = \rho_0 J_1 + \pi_1 \rho_0 J_1 \sigma_1 \quad (2.5)$$

หรือ

$$\rho_1 = \rho_0 + \pi_1 \rho_0 \sigma_1 \quad (2.6)$$

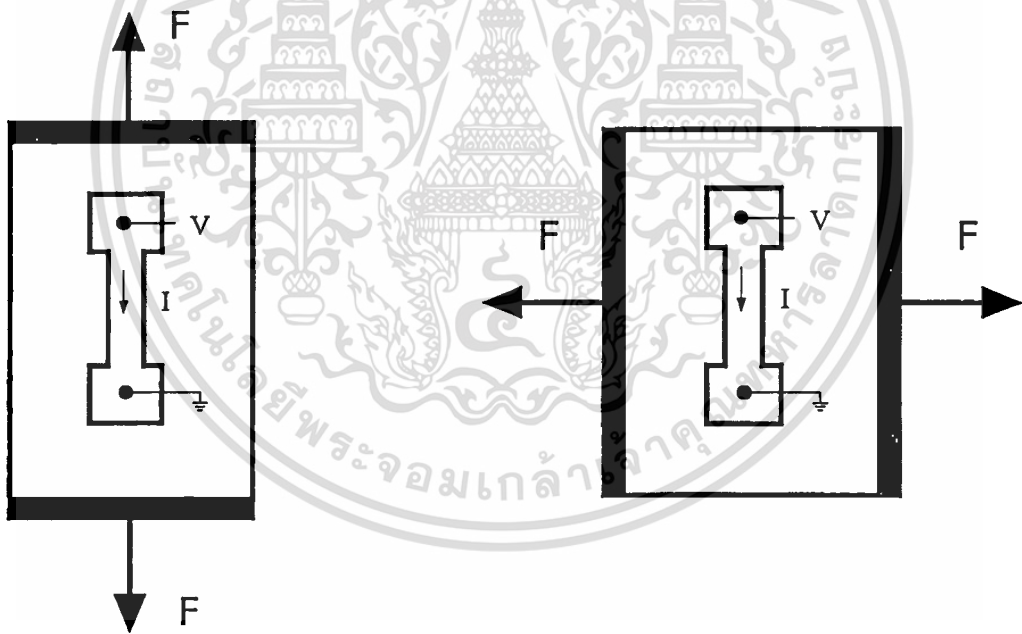
$$\frac{\rho_1 - \rho_0}{\rho_0} = \pi_1 \sigma_1 \quad (2.7)$$

$$\frac{\Delta \rho}{\rho_0} = \pi_1 \sigma_1 \quad (2.8)$$

ในทำนองเดียวกันเมื่อกำหนดให้ π , คือ สัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสฟิฟตามขวาง (Transverse Piezoresistive Coefficient) ดังนั้นจากสมการที่ 2.3 ถึง 2.8 จะได้ว่า

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} = \pi_1 \sigma_1 \quad (2.9)$$

จากสมการที่ 2.8 และ 2.9 พบว่าทั้งสัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสฟิฟตามยาวและสัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสฟิฟตามขวาง เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำกับวัสดุแล้วทำให้มีความเค้นเกิดขึ้นโดยสัมพันธ์กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของพิคคความต้านทานในวัสดุ ซึ่งขึ้นอยู่กับทิศทางของแรงที่มากระทำ โดยสัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสฟิฟตามยาวนี้จะเกิดขึ้นเมื่อมีแรงดึงตามยาวมากระทำกับวัสดุดังรูปที่ 2.7 (ก) ส่วนสัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสฟิฟตามขวางจะเกิดขึ้นเมื่อมีแรงดึงตามขวางมากระทำกับวัสดุดังรูปที่ 2.7 (ข)



(ก) แรงดึงตามยาว

(ข) แรงดึงตามขวาง

รูปที่ 2.7 ทิศทางของแรงที่มากระทำกับวัสดุที่ประกอบด้วย (ก) แรงดึงตามยาว และ(ข) แรงดึงตามขวาง

2.2.3 ความเค้นตามยาวและความเค้นตามขวาง[9]

เมื่อให้ความดันกับไดอะแฟรม ไดอะแฟรมจะเกิดการแอ่นตัวทำให้เกิดความเค้นขึ้นในตัวด้านทานซึ่งประกอบด้วยความเค้นตามยาว (σ_x) และความเค้นตามขวาง (σ_y) โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.10

$$\sigma_{(x,y)} = \bar{\sigma}_{(x,y)} \left(\frac{l}{h} \right)^2 p \quad (2.10)$$

เมื่อ $\sigma_{(x,y)}$ คือ ตำแหน่งความเค้นบนไดอะแฟรม

$\bar{\sigma}_{(x,y)}$ คือ ความเค้นไดเมนชันเลส (Dimensionless Stress)

l คือ ขนาดความกว้างของไดอะแฟรม

h คือ ความหนาของไดอะแฟรม

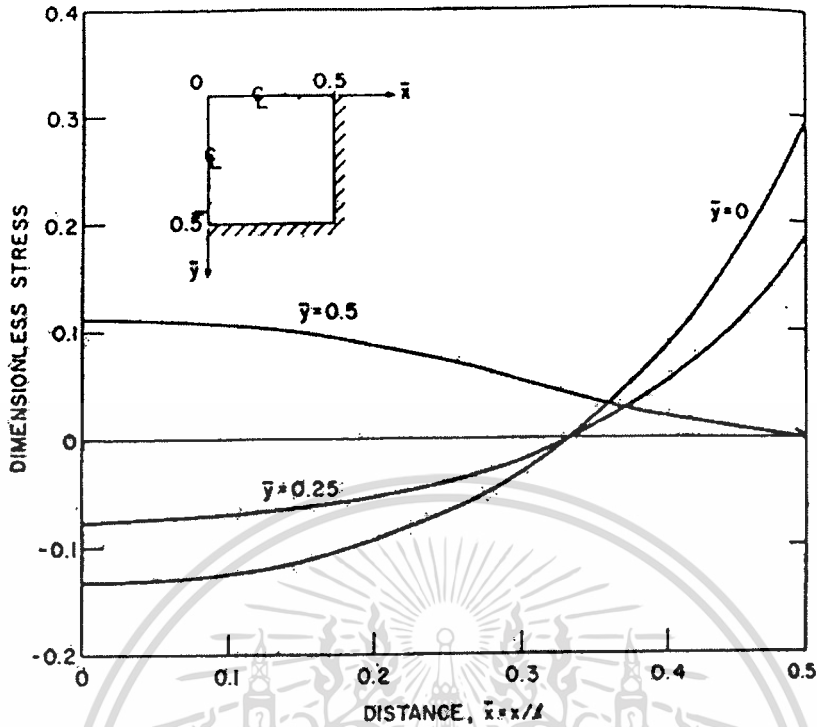
p คือ ความดันที่ให้กับไดอะแฟรม

จากสมการที่ 2.10 จะเห็นว่าความเค้นที่เกิดขึ้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับขนาดความกว้างของไดอะแฟรม ความหนาของไดอะแฟรม และความดันที่ป้อนให้กับไดอะแฟรมแล้วยังขึ้นอยู่กับความเค้นไดเมนชันเลสเป็นสำคัญอีกด้วยซึ่งค่าของความเค้นไดเมนชันเลสนี้จะมีค่าแตกต่างกันไปตามตำแหน่งของการวางตัวด้านทานบนไดอะแฟรมดังรูปที่ 2.8

จากรูปที่ 2.8 เป็นกราฟแสดงการกระจายค่าความเค้นไดเมนชันเลสใน 1 ควอดแรนต์ที่บริเวณต่าง ๆ กันบนไดอะแฟรมรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ความเค้นไดเมนชันเลสจะมีค่ามากที่สุดที่บริเวณตำแหน่งขอบของไดอะแฟรมทั้ง 2 ด้าน ดังนั้นเมื่อป้อนความดันให้กับไดอะแฟรมจะทำให้ความเค้นตามยาวและความเค้นตามขวางเกิดการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด โดยที่ความเค้นตามยาวจะเกิดการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดที่ตำแหน่ง $\bar{x} = 0$, $\bar{y} = 0.5$ บนไดอะแฟรมและความเค้นตามขวางอยู่จะที่ตำแหน่ง $\bar{x} = 0.5$, $\bar{y} = 0$ บนไดอะแฟรม และเมื่อแทนค่าความเค้นไดเมนชันเลสที่ตำแหน่งดังกล่าวลงในสมการที่ 2.10 จะทำให้สามารถคำนวณหาความเค้นตามยาวและความเค้นตามขวางได้ดังสมการที่ 2.11 และ 2.12 ดังนี้

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sigma(0,0.5) \\ &= 0.155 \left(\frac{l}{h} \right)^2 p \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} \sigma_y &= \sigma(0.5,0) \\ &= 0.294 \left(\frac{l}{h} \right)^2 p \end{aligned} \quad (2.12)$$

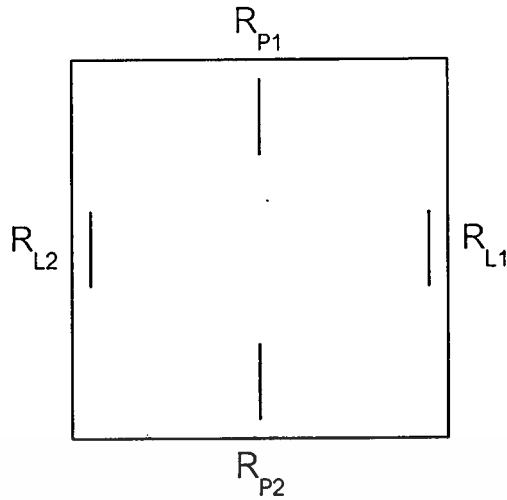


รูปที่ 2.8 การกระจายค่าความเค้นโคโมเมนต์ใน 1 ควอดแรนต์ (Quadrant) ที่บริเวณต่าง ๆ กันบน โคอะแฟรมรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

เมื่อให้ความดันกับโคอะแฟรม โคอะแฟรมจะเกิดการแอ่นตัว ทำให้มีความเค้นขึ้นซึ่งที่บริเวณตำแหน่งขอบของโคอะแฟรมจะมีความเค้นเกิดขึ้นมากที่สุดดังสมการที่ 2.11 และ 2.12 ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการออกแบบการวางตำแหน่งของตัวต้านทานบนโคอะแฟรมจึงควรออกแบบให้ตัวต้านทานอยู่ชิดขอบโคอะแฟรมเพื่อให้เกิดความเค้นขึ้นในตัวต้านทานมากที่สุด

2.2.4 ความเค้นและสัมประสิทธิ์เพียโซรีซีฟที่ป็นตัวต้านทาน [10,11]

การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทั้ง 4 ตัวบนโคอะแฟรมรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสจะประกอบไปด้วยตัวต้านทานในแนวขนานขอบโคอะแฟรม (Parallel Resistor) 2 ตัวคือ R_{L1} , R_{L2} และตัวต้านทานในแนวตั้งฉาก (Perpendicular Resistor) 2 ตัวคือ R_{P1} , R_{P2} ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทั้งในแนวขนานและในแนวตั้งฉากจะให้ความดันกับโคอะแฟรมนี้ จะมีความสัมพันธ์กับความเค้นที่เกิดขึ้นและสัมประสิทธิ์เพียโซรีซีฟที่ป็นดังสมการที่ 2.13 และ 2.14 ตามลำดับ



รูปที่ 2.9 ตัวต้านทานทั้ง 4 ตัวบนไดอะแฟรม

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_L = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t \quad (2.13)$$

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_P = \pi_l \sigma_t + \pi_t \sigma_l \quad (2.14)$$

เมื่อ $\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_L$ คือ อัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานในแนวขนาน

$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_P$ คือ อัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานในแนวตั้งฉาก

π_l คือ สัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีฟที่ปตามยาว (Longitudinal Piezoresistive Coefficient)

π_t คือ สัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีฟที่ปตามขวาง (Transverse Piezoresistive Coefficient)

σ_l คือ ความเค้นตามยาว (Longitudinal Stress)

σ_t คือ ความเค้นตามขวาง (Transverse Stress)

ฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นบนฐานรองซิลิคอนด้วยวิธี CVD จะมีลักษณะไม่เป็นผลึกเดี่ยว แต่จะเป็นผลึกแบบหลายรูป (Polycrystalline) ซึ่งมีทั้งระนาบ (100) และ ระนาบ (111) ดังนั้นตัวต้านทานเพชรชนิด p ซึ่งถูกสร้างอยู่บนไดอะแฟรมฟิล์มบางเพชรจึงมีค่าสัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีฟที่ปตามยาวและสัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีฟที่ปตามขวางเป็นค่าเฉลี่ยโดยจะไม่สามารถพิจารณา ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีฟที่ปได้เหมือนกับโครงผลึกรูปเดี่ยว (Single Crystal) ดังเช่น ซิลิคอนได้ ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์เพียโซรีซิสทีฟของเพชรนี้จะสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของเกจแฟคเตอร์ (Gauge Factor) และค่าของยังโมดูลัส (Young's modulus) ดังสมการที่ 2.15 และ 2.16 ดังนี้

$$\langle \pi_l \rangle = \frac{GF_l}{\langle Y \rangle} \quad (2.15)$$

$$\langle \pi_t \rangle = \frac{GF_t}{\langle Y \rangle} \quad (2.16)$$

เมื่อ $\langle \pi_l \rangle$ คือ ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์เปียโซรีซีฟที่ไปตามยาว

$\langle \pi_t \rangle$ คือ ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์เปียโซรีซีฟที่ไปตามขวาง

$\langle Y \rangle$ คือ ยางโมดูลัสเฉลี่ยของฟิล์มเพชร

GF_l คือ เกจแฟกเตอร์ตามยาว (Longitudinal Gage Factor)

GF_t คือ เกจแฟกเตอร์ตามขวาง (Transverse Gage Factor)

จากการค้นพบของฮุก (Hook) พบว่า ในวัสดุหลาย ๆ ชนิดที่มีขนาดจำกัด อัตราส่วนระหว่างความเค้นและความเครียดจะมีค่าคงที่ ซึ่งค่าคงที่ตามกฎของฮุก (Hook's Law) นี้เรียกว่าดัชนีการยืดหดตัวของวัสดุหรือโมดูลัสของวัสดุ (Modulus of elastic of material) ดังสมการที่ 2.17

$$Y = \frac{\text{Stress}}{\text{Strain}} = \frac{F/A}{\Delta l/l} = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2.17)$$

ค่าของยังโมดูลัสในแต่ละวัสดุจะมีค่าไม่เท่ากัน และแตกต่างกันไปดังแสดงในตารางที่ 2.2 และสำหรับฟิล์มเพชรก็เช่นเดียวกันจากการศึกษาและวิจัยพบว่า ฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นซึ่งเป็นผลึกแบบหลายรูปจะมีค่ายังโมดูลัสเฉลี่ยเท่ากับ $11.43 \times 10^{12} \text{ dyne/cm}^2$ [12]

สำหรับเกจแฟกเตอร์ตามยาวและเกจแฟกเตอร์ตามขวางในสมการที่ 2.15 และ 2.16 จะสามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงพิคัดความต้านทานกับความเครียดที่เกิดขึ้นดังสมการที่ 2.18 และ 2.19 ดังนี้

$$GF_l = \frac{\Delta \rho}{\rho_0} \frac{1}{\epsilon_l} \quad (2.18)$$

$$GF_t = \frac{\Delta \rho}{\rho_0} \frac{1}{\epsilon_t} - 1 \quad (2.19)$$

เมื่อ ϵ_l คือ ความเครียด (Strain) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมต่อความยาวเดิมก่อนถูกแรงกระทำดังสมการที่ 2.20

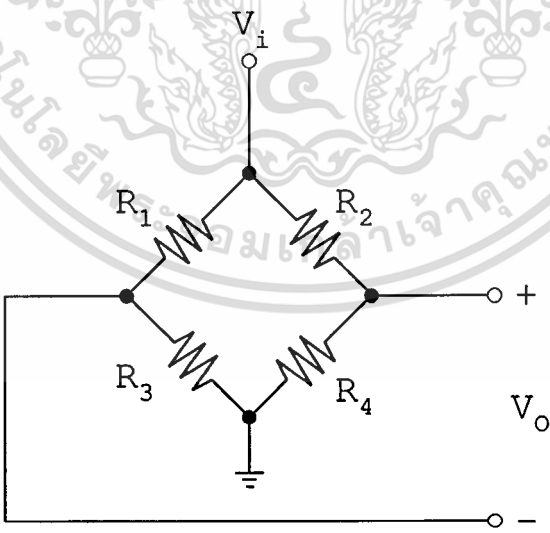
$$\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l} \tag{2.20}$$

ค่าเกจแฟกเตอร์นี้ในแต่ละวัสดุจะมีค่าไม่เท่ากันซึ่งค่าของเกจแฟกเตอร์นี้จะเป็นตัวแปรที่บอกถึงความไวของเกจ เช่นถ้าเกจแฟกเตอร์มีค่าสูงจะหมายถึงเกจนั้นมีความไวในการเปลี่ยนแปลงสูง เป็นต้น

2.3 วงจรวิทสโตนบริดจ์ (Wheatstone Bridge Circuit) [13,14]

วงจรวิทสโตนบริดจ์จะถูกนำมาใช้กับทรานสดิวเซอร์ความดันเพื่อใช้ในการแปรค่าจากความดันไปสู่สัญญาณแรงดันไฟฟ้าซึ่งจะทำให้สามารถทราบถึงปริมาณความดันที่เปลี่ยนแปลงไป โดยพิจารณาได้จากปริมาณแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น วงจรวิทสโตนบริดจ์ชนิดพาสซีฟเป็นวงจรที่ประกอบด้วยตัวต้านทาน 4 ตัวต่อกันเป็นรูปดังรูปที่ 2.10 ซึ่งเมื่ วงจรบริดจ์อยู่ในสภาวะสมดุล แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต V_o จะมีค่าเท่ากับ 0 โวลต์และจะได้อัตราส่วนค่าความต้านทาน ดังสมการที่ 2.21

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4} \tag{2.21}$$



รูปที่ 2.10 วงจรวิทสโตนบริดจ์

เมื่อความต้านทานในวงจรบริดจ์เกิดการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลง วงจรบริดจ์จะอยู่ในสภาวะไม่สมดุลทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมเอาต์พุต V_o ขึ้น ซึ่งสามารถคำนวณหา V_o ได้ดังสมการที่ 2.22

$$V_o = V_i \times \frac{\Delta R}{R} \quad (2.22)$$

2.4 ความไวในการตอบสนอง [8]

เซนเซอร์ทุกชนิดสิ่งแรกที่จะต้องคำนึง คือ ค่าความไว (Sensitivity) ซึ่งเซนเซอร์ที่ดีนั้นควรจะมีค่าความไวสูงและคงที่นั่นหมายความว่าเซนเซอร์นั้นจะมีการตอบสนองต่ออินพุตที่มากกระทำได้อีก ความไวในการตอบสนองจะเป็นอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงสัญญาณเอาต์พุตที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสัญญาณทางอินพุต เมื่อให้ y เป็นเอาต์พุตที่มีความสัมพันธ์กับ x ซึ่งเป็นอินพุตโดยเป็นไปตามฟังก์ชัน $y = f(x)$ ดังนั้นสมการความไว S ที่จุด x_a ใดๆ จะสามารถเขียนได้ดังนี้

$$S(x_a) = \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=x_a} \quad (2.23)$$

สำหรับทรานสดิวเซอร์ความดันนั้น ความไวในการตอบสนองต่อความดันสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.24 ซึ่งเป็นอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุตต่อการเปลี่ยนแปลงความดันที่มีต่อแหล่งจ่ายแรงดันคงที่ของวงจรวิทสโตนบริดจ์

$$S = \frac{\Delta V}{V_i \Delta P} \quad (2.24)$$

เมื่อ S คือ ความไวของทรานสดิวเซอร์ความดัน

ΔV คือ การเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตของวงจรวิทสโตนบริดจ์

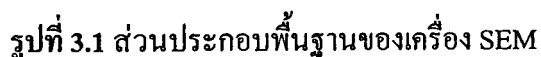
ΔP คือ การเปลี่ยนแปลงความดัน

V_i คือ แหล่งจ่ายแรงดันคงที่ของวงจรวิทสโตนบริดจ์

3.1.1 จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM)

1. สามารถให้ภาพที่มีความคมชัดลึกสูง (High Depth of Field)
2. สามารถให้กำลังแยกแยะเชิงระยะสูง (High Spatial Resolution)

ดังนั้น จากคุณสมบัติดังกล่าวจึงได้นำเทคนิคนี้มาใช้ในการพิจารณาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ โดยมีส่วนประกอบและลักษณะการทำงานพื้นฐานของเครื่อง SEM ดังรูปที่ 3.1

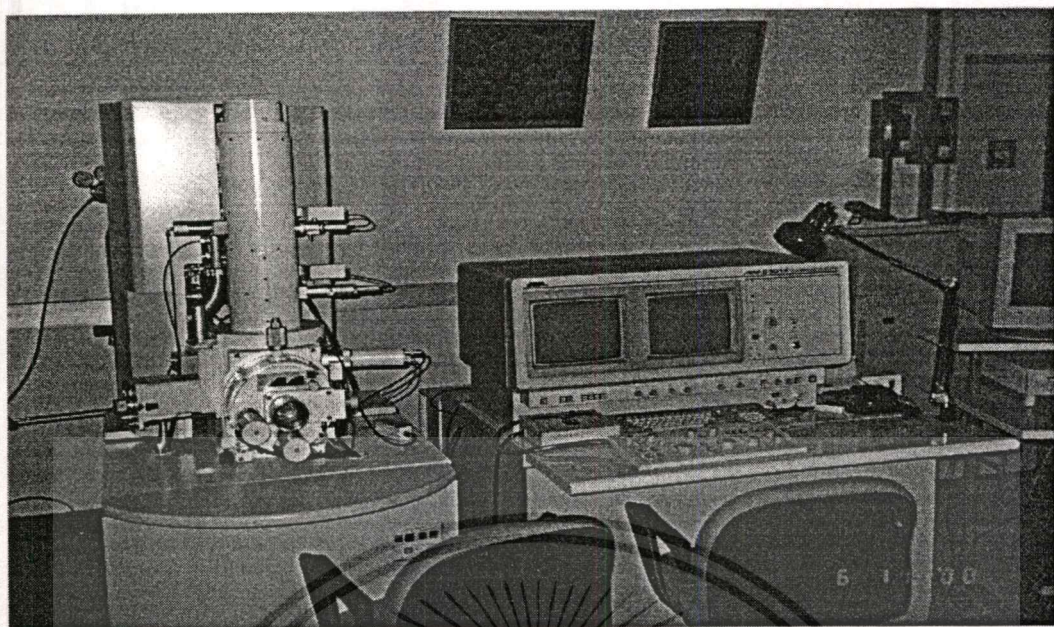


ในส่วนบนสุดจะเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนหรือปืนอิเล็กตรอน (Electron Gun) ซึ่งเป็นส่วนที่มีความสำคัญที่สุดของเครื่อง SEM โดยจะทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่สามารถผลิตกระแสจำนวนมากโดยตัววัสดุเองจะต้องมีความเสถียรภาพและภาคตัดขวางของลำอิเล็กตรอนที่ส่งออกไปจะต้องเป็นจุดเล็ก ๆ ซึ่งปืนอิเล็กตรอนที่นิยมใช้ในปัจจุบันมี 4 ประเภทคือ

1. แบบหลอดทั้งสเดน เป็นปืนอิเล็กตรอนที่นิยมใช้มากที่สุดเนื่องจากมีราคาถูกและไม่ต้องการสภาพสุญญากาศมากนัก
2. แบบผลึก LaB_6 (Lanthanum Hexaboride Crystal) เป็นปืนอิเล็กตรอนที่ให้ความสว่างสูงกว่าแบบหลอดทั้งสเดนประมาณ 10 เท่า มีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าและต้องการสภาพสุญญากาศ
3. แบบโวลต์ฟิลด์อิมิชัน (Cold Field Emission Source) เป็นปืนอิเล็กตรอนที่ให้ความสว่างสูงกว่าแบบหลอดทั้งสเดนและแบบผลึก LaB_6 นอกจากนี้ยังสามารถทำงานได้ในอุณหภูมิห้อง
4. แบบช็อตคีย์ฟิลด์อิมิชัน (Schottky Field Emission Source) เป็นปืนอิเล็กตรอนที่คล้ายกับแบบโวลต์ฟิลด์อิมิชันแต่ต่างกันตรงที่จะต้องทำงานที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1800 เคลวิน

อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนนี้จะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงตามคอลัมน์ด้วยความต่างศักย์ในช่วง 1-50 kV ดังรูปที่ 3.1 โดยมีเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Lens) ทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนให้ผ่านไปที่ช่องเปิดที่มีขนาดต่าง ๆ กันด้วยแอฟเพอร์เจอร์ (Aperture) เพื่อควบคุมปริมาณของอิเล็กตรอน หลังจากนั้นคอนเดนเซอร์เลนส์ (Condenser Lens) จะทำการบีบลำอิเล็กตรอนให้มีพื้นที่หน้าตัดเล็กลงและใช้เลนส์วัตถุ (Objective Lens) ซึ่งเป็นเลนส์อันสุดท้ายทำการโฟกัสลำอิเล็กตรอนไปตกกระทบกับผิวของวัตถุ โดยมีคอยล์กวาดภาพ (Scan Coil) ทำหน้าที่กวาดลำอิเล็กตรอนบนผิววัตถุในกรอบสี่เหลี่ยม เมื่อลำอิเล็กตรอนไปตกกระทบกับผิวของวัตถุจะเกิดอันตรกิริยาขึ้นภายในวัสดุ และจะให้สัญญาณต่าง ๆ ออกมาซึ่งจะถูกตรวจจับและถูกนำไปแสดงผลในที่ดู

สำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดที่ใช้เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรในงานวิจัยนี้เป็นเครื่อง SEM รุ่น JSM-6301F ดังรูปที่ 3.2 โดยใช้กล้องที่เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบโวลต์ฟิลด์อิมิชัน ซึ่งจะให้ความสว่างสูงและกำลังแยกแยะสูงมากในระดับ 1.4 nm ที่ 30 kV นอกจากนี้ยังมีกำลังขยายสูงสุดถึง 200,000 เท่า

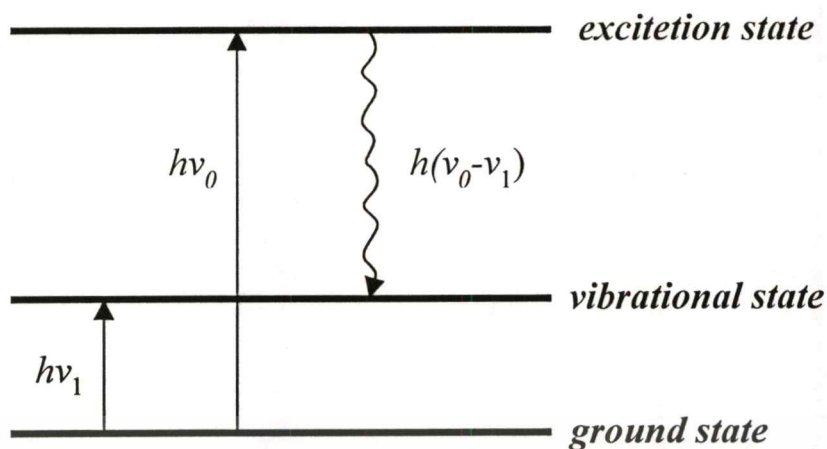


รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายเครื่อง SEM รุ่น JSM-6301F

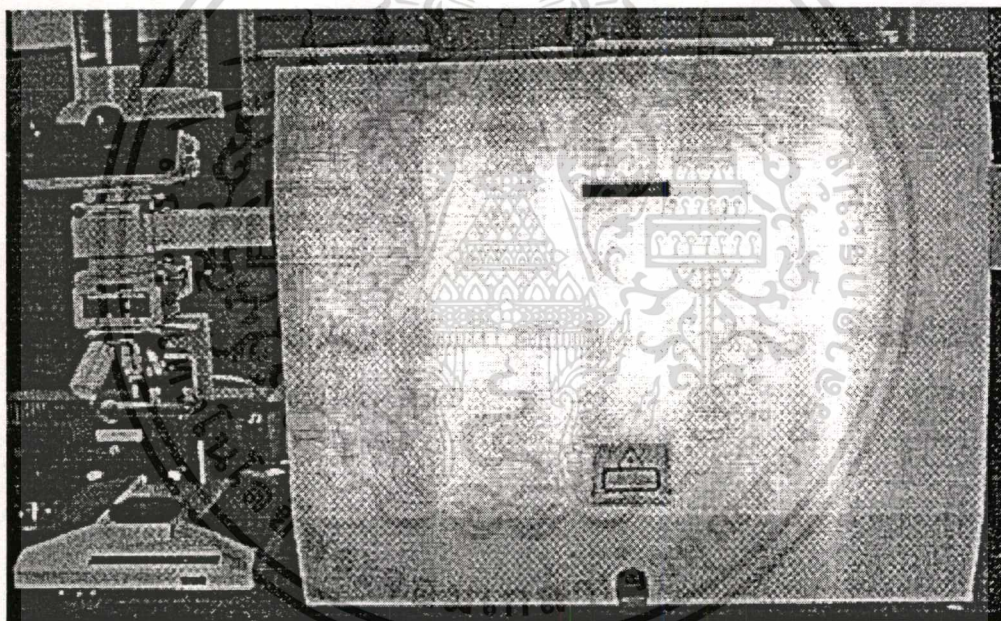
3.1.2 พูเรียทรานสฟอร์มาเนียนสเปกโทรสโกปี (FT-Raman)

เป็นวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อศึกษาเกี่ยวกับอะตอมของวัสดุ โดยใช้หลักการเปรียบเทียบกับสเปกตรัมแสงของวัสดุตัวอย่างมาตรฐาน ซึ่งสเปกตรัมของวัสดุชนิดเดียวกันจะต้องมีลักษณะที่เหมือนกันทุกประการ สเปกตรัมของแสงที่เกิดขึ้นจะเกิดจากการยิงลำแสงโมโนโครมาติกที่มีความเข้มสูง เช่น ลำแสงเลเซอร์ ผ่านเข้าไปยังวัสดุตัวอย่าง พลังงานโฟตอน $h\nu_0$ จากแสงเลเซอร์ที่ผ่านเข้าไปในอะตอมของวัสดุตัวอย่างจะเกิดอันตรกิริยาขึ้น โดยมีการดูดพลังงานเข้าไปทำให้อิเล็กตรอนกระโดดขึ้นไปสู่สถานะกระตุ้น (Excitation State) แต่เนื่องจากเป็นสถานะที่ไม่เสถียรดังนั้นอิเล็กตรอนจึงตกกลับลงมาพร้อมทั้งมีการคายพลังงานออกมาเท่ากับ $h(\nu_0 - \nu_1)$ ดังรูปที่ 3.3 โดยเกิดพลังงานสูญเสียขึ้นเท่ากับ $h\nu_1$ ที่ทำให้เกิดการสั่นของอะตอมในโครงผลึก ดังนั้นพลังงาน $h(\nu_0 - \nu_1)$ จึงเป็นพลังงานโฟตอนของแสงที่กระเจิงออกมาโดยมีความถี่ที่เปลี่ยนแปลงลดลงไปจากความถี่เดิม และเรียกปรากฏการณ์ในลักษณะเช่นนี้ว่า Raman Scattering

สำหรับฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นที่ความดันต่ำในงานวิจัยนี้จะถูกนำมาวิเคราะห์ถึงความเป็นเพชรด้วยเครื่องฟูเรียทรานสฟอร์มาเนียนสเปกโตรมิเตอร์ (FT-Raman Spectrometer) ของ Renishaw รุ่น System 2000 ซึ่งสามารถทำการวิเคราะห์ได้ในช่วงสเปกตรัมตั้งแต่ $200 - 4000 \text{ cm}^{-1}$ ดังรูปที่ 3.4 โดยฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นจะต้องมียอดสเปกตรัมเท่ากับหรือใกล้เคียงกับตำแหน่งยอดคลื่นรามานที่ 1332 cm^{-1} ซึ่งจะตรงกับสเปกตรัมของเพชรธรรมชาติจึงจะทำให้ทราบถึงฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นมีความเป็นเพชรจริง



รูปที่ 3.3 การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานที่ทำให้เกิด Raman Scattering

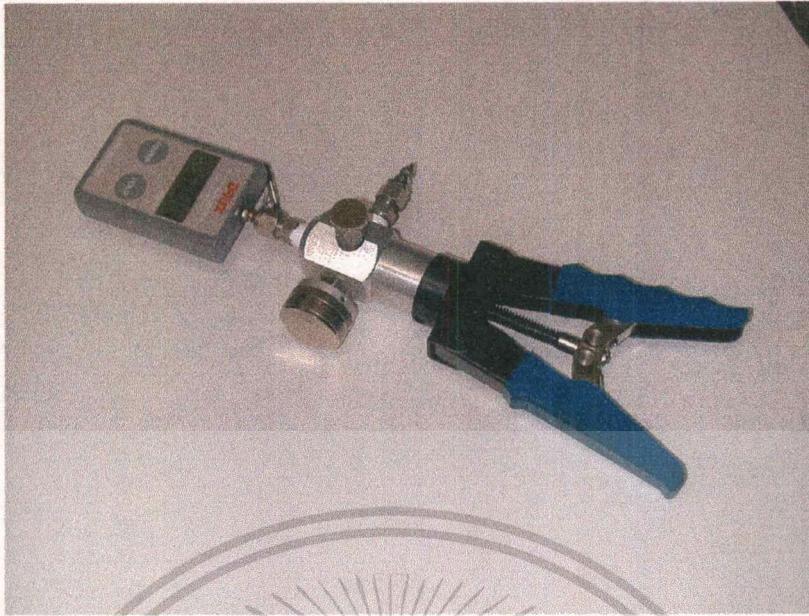


รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายเครื่อง FT-Raman spectrometer

3.2 ชุดเครื่องมือที่ใช้ในการวัดและทดสอบความดัน

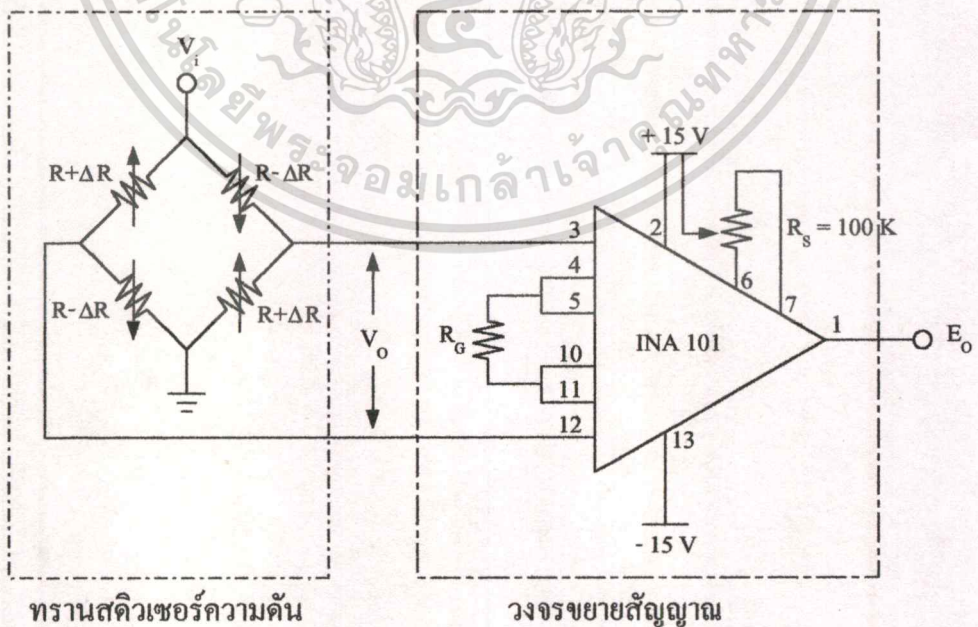
เครื่องมือที่จะนำมาทดสอบกับชิปทรานสดิวเซอร์ความดันนี้ คือ ดิจิตอลมานิเตอร์ (Digital Manometer) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดความดันโดยประกอบด้วยก้านวัดความดันที่สามารถวัดความดันได้ตั้งแต่ 0 – 9.9 kgf/cm² และมีวาล์วปรับละเอียดที่สามารถปรับละเอียดได้ 0.01 kgf/cm² นอกจากนี้ยังมีวาล์วคลายแรงอัดเพื่อให้สามารถวัดความดันได้ใหม่ดังรูปที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ดิจิตอลมาโนมิเตอร์ที่ใช้ทดสอบความดันให้กับทรานสดิวเซอร์ความดัน

เมื่ออัดความดันให้กับทรานสดิวเซอร์นี้ โคอะแฟรมจะเกิดการแอ่นตัว ตัวต้านทานบนโคอะแฟรมซึ่งถูกต่อกันเป็นวงจรบริดจ์จะเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมเอาต์พุต V_o ของวงจรบริดจ์แต่แรงดันเอาต์พุตนี้จะมีค่าน้อยมากดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้วงจรขยายแรงดันเพื่อให้สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุต V_o ได้ ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การต่อวงจรขยายแรงดันเอาต์พุต V_o จากวงจรบริดจ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.6 IC เบอร์ INA101 เป็น OP-AMP ชนิด Instrumentation Amplifier[16] ทำหน้าที่ขยายสัญญาณแรงดันความแตกต่างของแรงดันอินพุตโดย Op-Amp ชนิดนี้มีคุณสมบัติที่เห็นได้ชัดคือ มีความเที่ยงตรงสูงในการขยายสัญญาณ สามารถคำนวณและกำหนดอัตราขยายได้เองจากความต้านทานภายนอกที่ต่ออยู่ และมีสัญญาณรบกวนต่ำ นอกจากนี้ยังนิยมนำไปใช้ขยายสัญญาณแรงดันเอาต์พุตจากอุปกรณ์จำพวกสเตรนเกจ (Strain Gauge) เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) และอาร์ทีดี (RTDs) เป็นต้น ดังนั้นจากคุณสมบัติดังกล่าวจึงได้นำมาใช้ขยายสัญญาณให้กับทรานสดิวเซอร์ความดันนี้ โดยแรงดันเอาต์พุต V_o จากวงจรบริดจ์จะถูกต่อเข้ากับขา 3 และขา 12 ของ IC INA101 และจะขยายสัญญาณออกทางขา 1 (E_o) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1

$$E_o = GV_o \quad (3.1)$$

เมื่อ E_o คือ แรงดันเอาต์พุตจากวงจรขยาย

V_o คือ แรงดันเอาต์พุตจากวงจรบริดจ์

G คือ อัตราการขยายแรงดัน

อัตราการขยายแรงดันนี้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.2

$$G = 1 + \frac{40K\Omega}{R_G} \quad (3.2)$$

จากสมการที่ 3.2 R_G คือ ตัวต้านทานสำหรับกำหนดอัตราขยาย สำหรับในงานวิจัยนี้ได้กำหนดอัตราขยายแรงดันไว้ 100 เท่าก็เพื่อให้สามารถวัดการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุต V_o จากวงจรบริดจ์ได้ ดังนั้นเมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 3.2 จะได้ค่า R_G 400 Ω

บทที่ 4

การออกแบบและการสร้าง

4.1 การออกแบบไดอะแฟรมฟิล์มบางเพชร

ฟิล์มเพชรที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นบนฐานรองซิลิคอนจะถูกนำมาสร้างเป็นไดอะแฟรม ซึ่งเป็นส่วนสำคัญหลักในโครงสร้างของทรานซิสเตอร์ความดัน โดยสามารถสร้างได้ด้วยการกัดฐานรองซิลิคอนระนาบ (100) ในสารละลาย Ethylenediamine ผสมกับ Pyrocatechol ในน้ำ DI หรือที่เรียกว่า อีพีดี (EPD) ด้วยอัตราส่วน E : P : D เท่ากับ 150 cc : 24 g : 48 cc โดยมีอัตราการกัด 1 ไมครอน ต่อนาที ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ซึ่งจะมีคุณสมบัติการกัดเป็นแบบแอนไอโซโทรปิก ดังรูปที่ 4.1 และมีสมการที่ใช้ในการออกแบบดังนี้ [17]

$$W_b = W_0 - 2d \cot 57.74^\circ \quad (4.1)$$

หรือมีค่าประมาณ

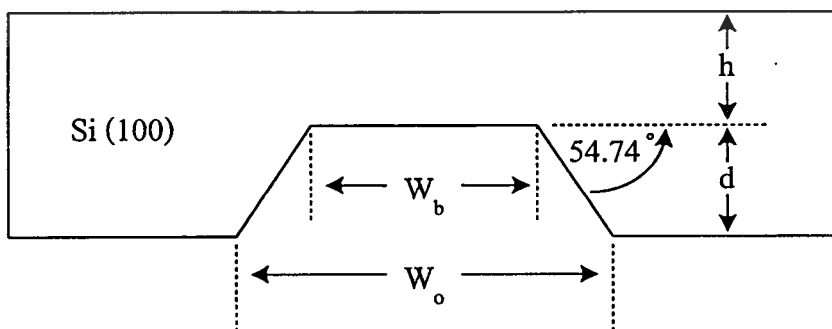
$$W_b \approx W_0 - \sqrt{2}d \quad (4.2)$$

เมื่อ W_0 คือ ความกว้างของมาส์กต้นแบบ (ไมครอน)

W_b คือ ความกว้างของไดอะแฟรมหลังการกัด (ไมครอน)

d คือ ความลึกของการกัด (ไมครอน)

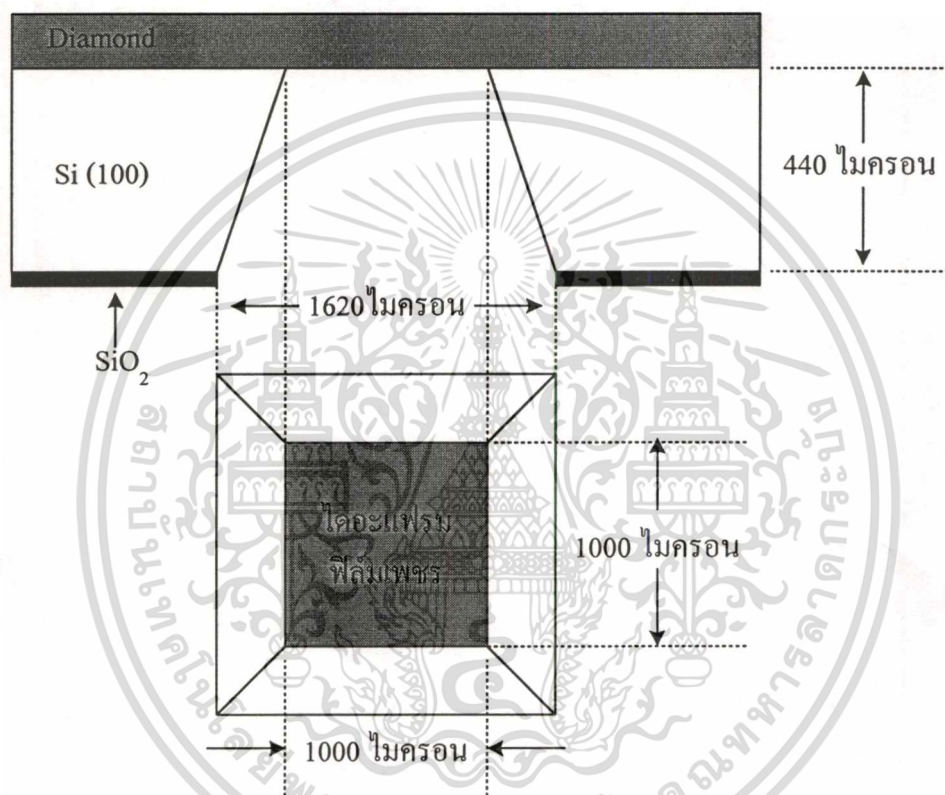
h คือ ความหนาของไดอะแฟรม (ไมครอน)



รูปที่ 4.1 การกัดซิลิคอนแบบแอนไอโซโทรปิกด้วย EPD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้กำหนดให้ไดอะแฟรมฟิล์มบางเพชรหลังการกัดมีความกว้าง 1000 ไมครอน และใช้ฐานรองซิลิคอนระนาบ (100) หนาประมาณ 440 ไมครอน ส่วนความหนาของไดอะแฟรมนั้นเป็นความหนาของฟิล์มเพชร ซึ่งขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการสังเคราะห์ ดังนั้นเมื่อแทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ 4.2 จะได้ค่าความกว้างของมาสก์ดินแบบ (w_0) รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสยาวด้านละ 1620 ไมครอน โดยมีซิลิคอนไดออกไซด์หนาประมาณ 7000 อังสตรอมเป็นหน้าฉากป้องกันการกัดดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 โครงสร้างไดอะแฟรมฟิล์มบางเพชร

4.2 การออกแบบตัวต้านทานเปียกซีฟิฟิปป

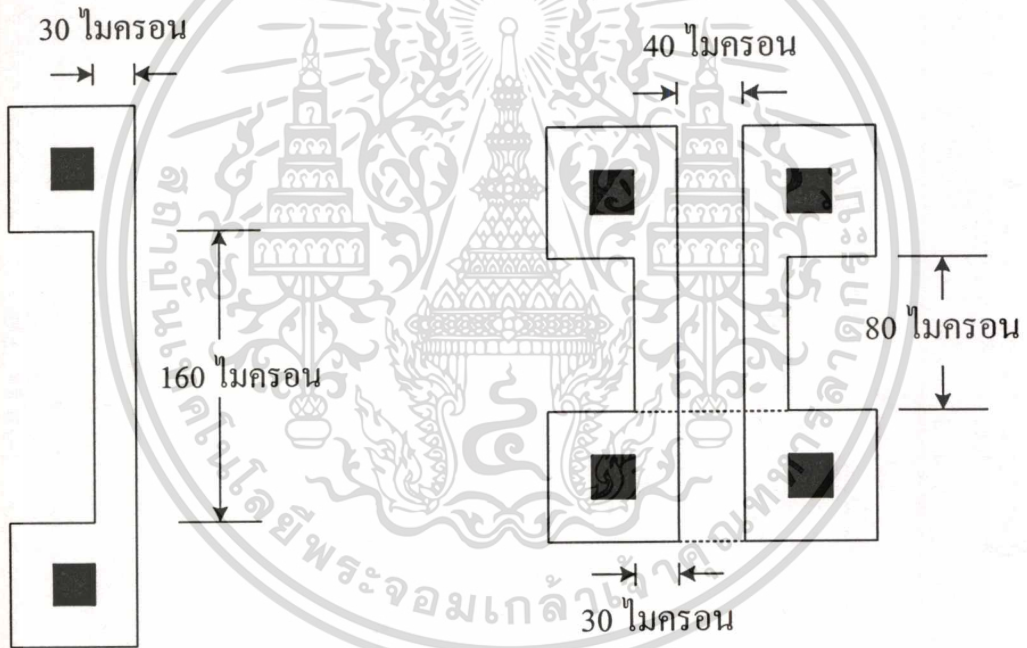
ตัวต้านทานเพชรชนิด p บนไดอะแฟรมบางฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิกจะมีอยู่ 2 แบบคือตัวต้านทานในแนวตั้งฉาก และตัวต้านทานในแนวขนาน โดยการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิด p จะใช้ไอระเหยเอทิลแอลกอฮอล์ผสมกับสารละลายโบรอนไตรออกไซด์ในอัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอน 10,000 ppm (วิธีการคำนวณอัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอนแสดงในภาคผนวก) ซึ่งจะได้พิสัยความต้านทานประมาณ 5×10^{-2} โอห์ม-เซนติเมตร [18,19] และสามารถคำนวณค่าความต้านทานได้จากสมการที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R = \rho \frac{l}{wt} \quad (4.3)$$

- เมื่อ R คือ ค่าความต้านทาน (โอห์ม)
 ρ คือ พิกัดความต้านทาน (โอห์ม-เซนติเมตร)
 l คือ ความยาวของตัวต้านทาน (ไมครอน)
 w คือ ความกว้างของตัวต้านทาน (ไมครอน)
 t คือ ความหนาของฟิล์มเพชรชนิด p (ไมครอน)

ในการออกแบบตัวต้านทานเพชรชนิด p ทั้งในแนวตั้งฉากและในแนวนอนกำหนดให้ตัวต้านทานมีความยาว 160 ไมครอน กว้าง 30 ไมครอน และหนา 1.3 ไมครอน ดังรูปที่ 4.3 (ก) และ (ข) ตามลำดับ เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 4.3 จะได้ค่าความต้านทานประมาณ 2 k Ω



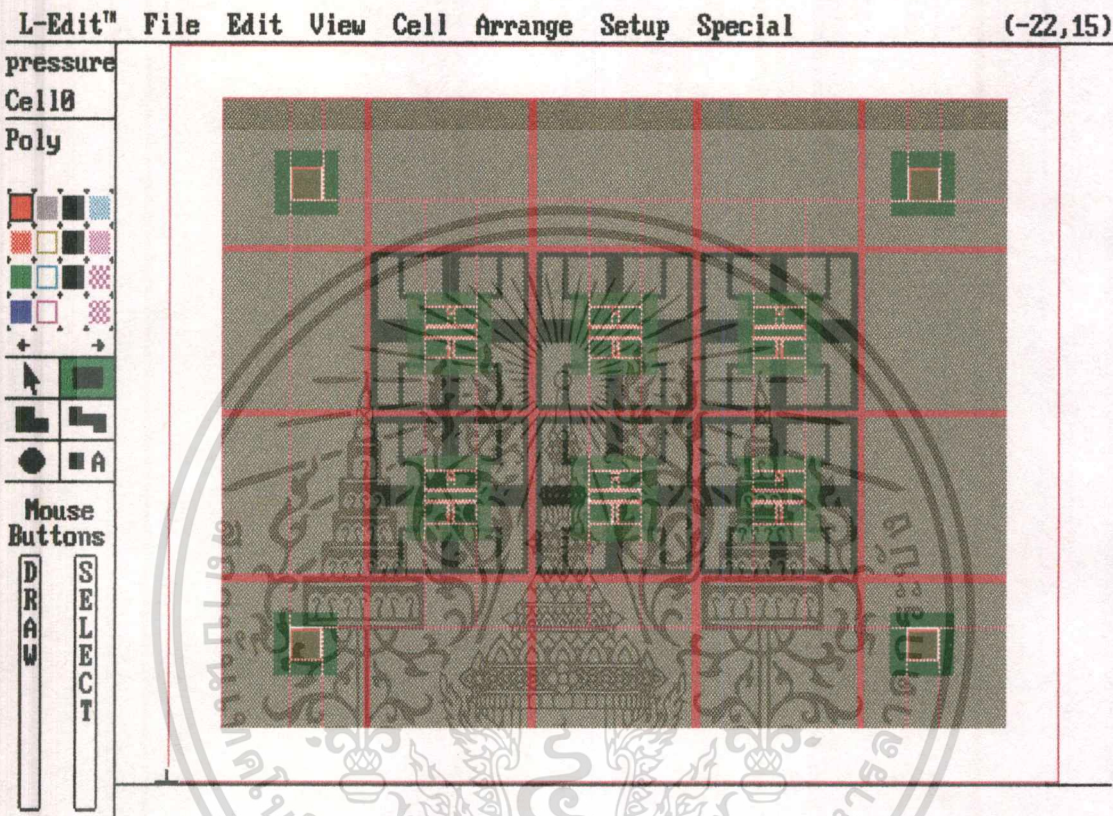
(ก) ตัวต้านทานในแนวนอน

(ข) ตัวต้านทานในแนวตั้งฉาก

รูปที่ 4.3 ขนาดโครงสร้างตัวต้านทานเพชรชนิด p บนไดอะแฟรมที่ประกอบด้วย (ก) ตัวต้านทานในแนวนอน และ(ข) ตัวต้านทานในแนวตั้งฉาก

4.3 การออกแบบทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเป็ยโซริซิฟทิป

ต้นแบบทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเป็ยโซริซิฟทิปทั้ง 6 ตัว ที่อยู่บนพื้นที่ฟิล์มเพชรขนาด 1.2 x 1.5 เซนติเมตร จะถูกนำมาเขียนลวดลายต่าง ๆ ที่ได้ออกแบบไว้ด้วยโปรแกรม L-Edit โดยจะเขียนให้เรียงซ้อนกันไปเป็นชั้น ๆ ดังรูปที่ 4.4

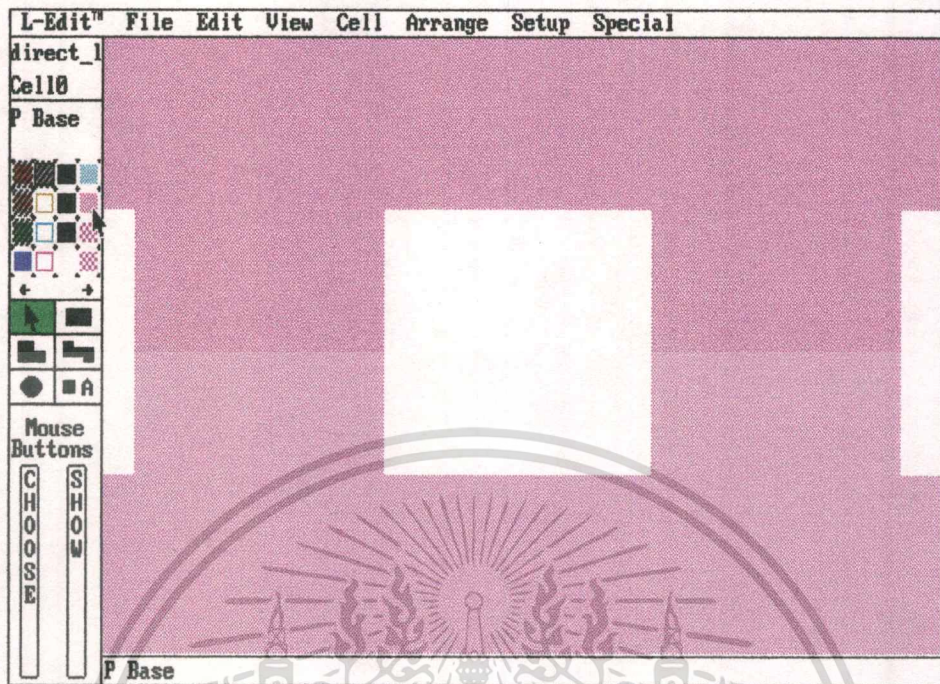


รูปที่ 4.4 ต้นแบบทรานสดิวเซอร์ความดันที่ออกแบบด้วยโปรแกรม L-Edit

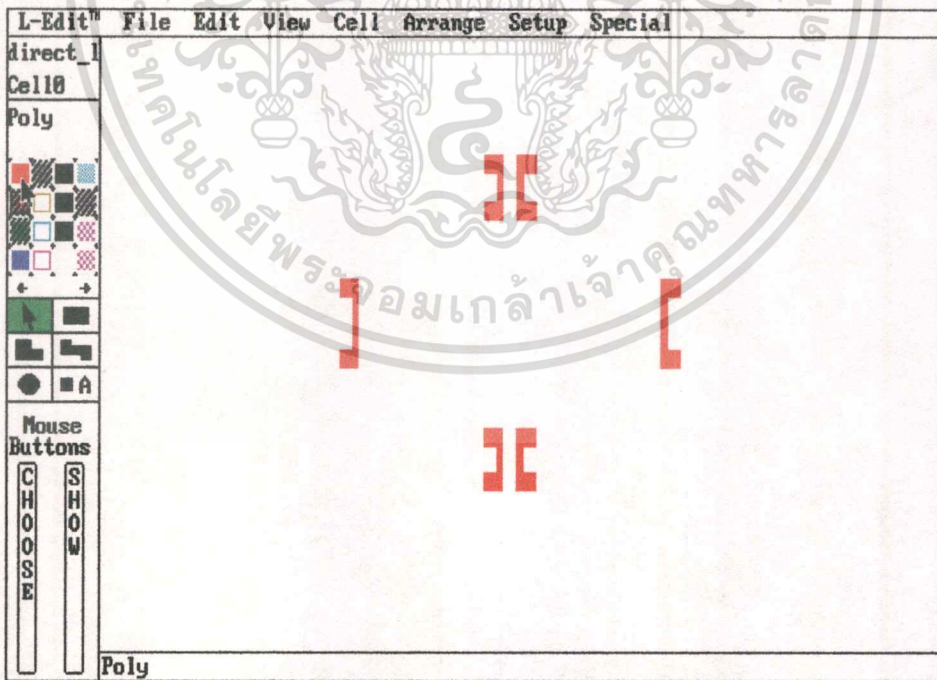
ทรานสดิวเซอร์ความดันแบบเป็ยโซริซิฟทิปนี้จะประกอบไปด้วยชั้นต่าง ๆ ทั้งหมด 4 ชั้น ดังนี้

- ชั้นที่ 1 ชื่อ CBA เป็นชั้นไดอะแฟรมฟิล์มบางเพชร
- ชั้นที่ 2 ชื่อ CPG เป็นชั้นตัวต้านทานเพชรชนิด p
- ชั้นที่ 3 ชื่อ CEL เป็นชั้นรอยสัผัสขั้วทอง
- ชั้นที่ 4 ชื่อ CMS เป็นชั้นลวดลายขั้วทอง

ดังรูปที่ 4.5 (ก) ถึง (ง) ตั้งแต่ชั้นที่ 1 ถึง 4

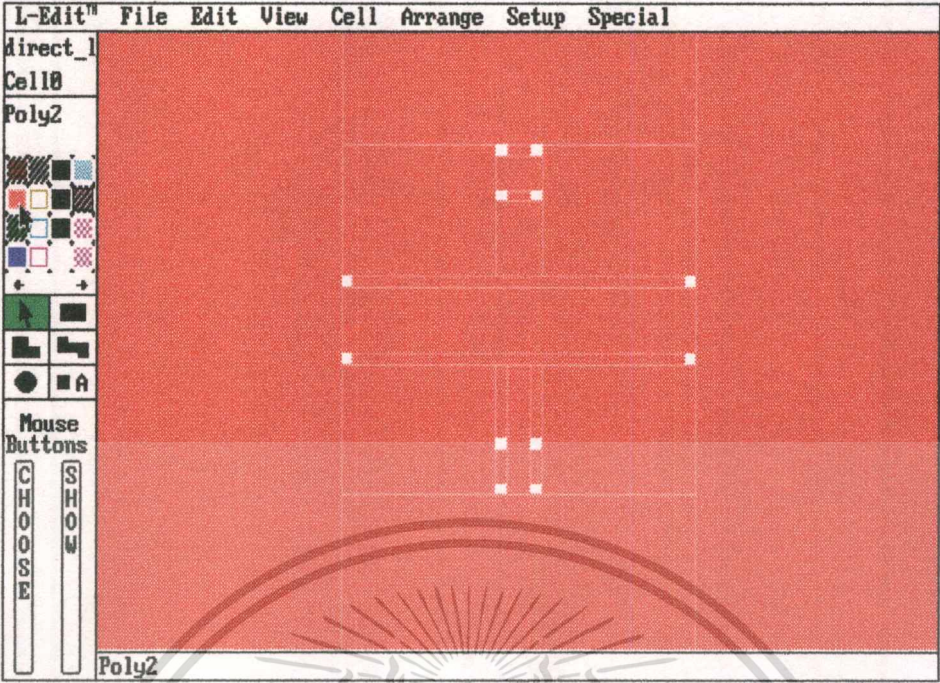


(ก) ชั้นไคอะแฟรม

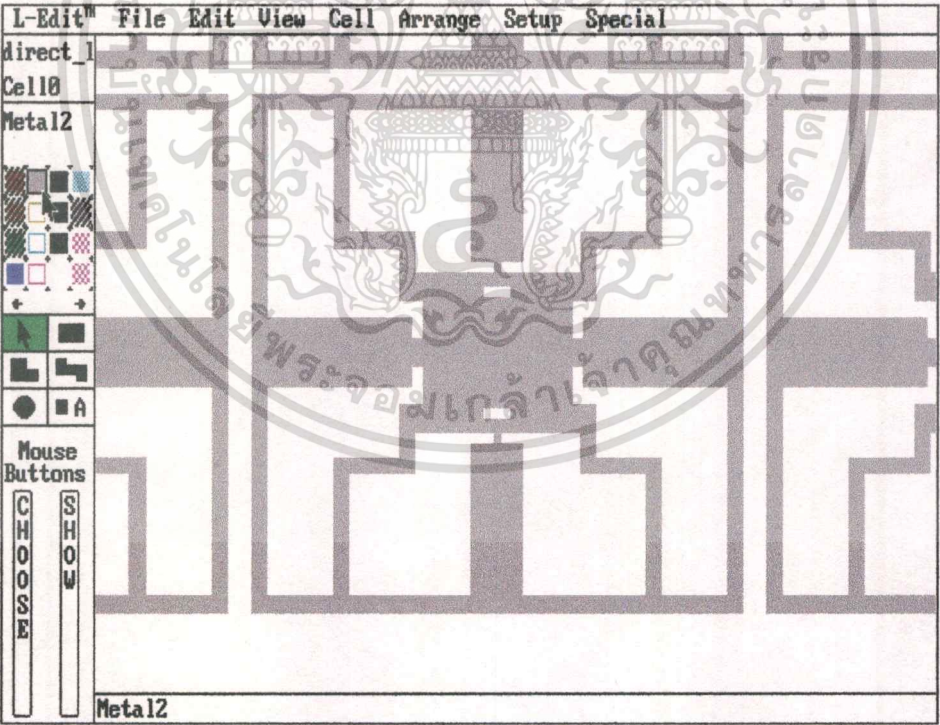


(ข) ชั้นตัวด้านทานเพชรชนิด p

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) ชั้นรอยสัณผัสข้าวทอง

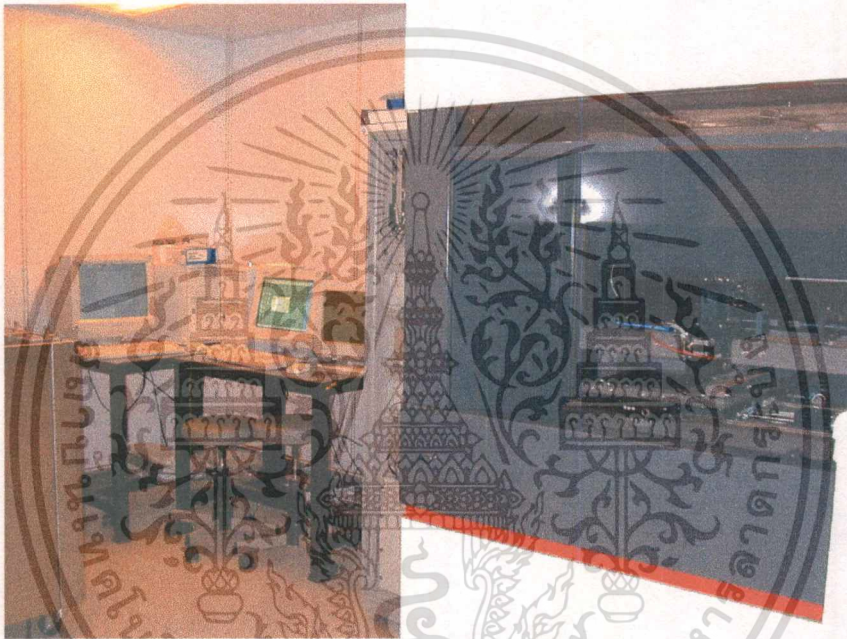


(ง) ชั้นลวดลายข้าวทอง

รูปที่ 4.5 ทรานสคิวเซอร์ความดันทั้ง 4 ชั้นประกอบด้วย (ก) ชั้นโคอะเฟรม (ข) ชั้นตัวต้านทาน
เพอร์ซินิก p (ค) ชั้นรอยสัณผัสข้าวทองและ(ง) ชั้นลวดลายข้าวทอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อของชั้นต่าง ๆ ทั้ง 4 ชั้นนี้สามารถตรวจสอบได้โดยใช้โปรแกรม Text Editor หรือ Notepad โดยจะทำให้ทราบถึงชื่อของชั้นแต่ละชั้นได้ ซึ่งจะมีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อกระบวนการผลิตกระจกมาส์กต้นแบบ เนื่องจากเครื่อง Laser Pattern Generator DWL 200 หรือเรียกสั้น ๆ ว่า ไคเรกไรท์ (Direct Write) ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งเป็นเครื่องสร้างลวดลายด้วยความละเอียดสูงบนกระจกมาส์กโครเมียมจะสามารถแยกแยะแต่ละชั้นได้จากชื่อของชั้นเท่านั้น ซึ่งผู้ใช้งานจะต้องป้อนชื่อชั้นเพื่อสั่งให้เครื่องไคเรกไรท์สร้างลวดลายเฉพาะชั้นนั้น ๆ ลงบนกระจกมาส์กโครเมียม จึงจะทำให้ได้กระจกมาส์กต้นแบบในแต่ละชั้นนั้น ๆ ตามที่ต้องการได้



รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายเครื่องไคเรกไรท์สำหรับสร้างลวดลายลงบนกระจกมาส์กโครเมียม

4.4 มาส์กและลำดับการสร้าง

4.4.1 การผลิตกระจกมาส์กต้นแบบ

กระจกมาส์กต้นแบบเป็นกระจกขนาด 3×3 นิ้วที่มีฟิล์มโครเมียมเคลือบอยู่ ซึ่งการเคลือบฟิล์มโครเมียมลงบนกระจกนี้จะใช้วิธีซี-สปีดเตอร์ริง โดยมีเงื่อนไขการสปีดเตอร์ริงดังตารางที่ 4.1 และจะได้ฟิล์มโครเมียมหนา 1000 อังสตรอม โดยวัดด้วยเครื่องวัดความหนา Step Profile

ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขการสปีดเตอร์ริงกระจกมาสักโครเมียม

แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	2000 โวลท์
อัตราการไหลก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์	9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที
ความดันก๊าซในระบบ	6×10^{-2} ทอร์
อุณหภูมิฐานรอง	300 องศาเซลเซียส
เวลาในการสร้าง	5 นาที

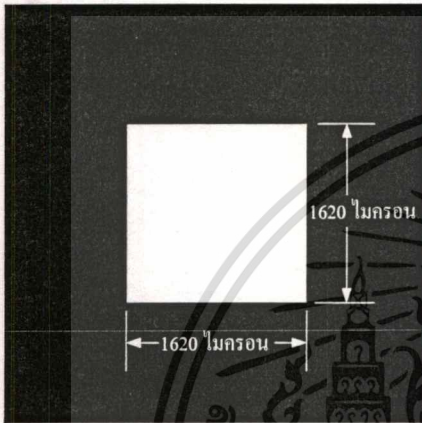
ต้นแบบของทรานสดิวเซอร์ความดันที่ได้ออกแบบไว้มีทั้งหมด 4 ชั้นโดยที่ลวดลายต่าง ๆ ในแต่ละชั้นจะถูกนำมาสร้างลงบนกระจกมาสักโครเมียมทั้งหมด 4 แผ่นด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

- อบแผ่นกระจกมาสักโครเมียมด้วยอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที เพื่อไล่ความชื้น
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ 6112 ลงบนกระจกมาสักโครเมียมด้วยเครื่องสปินเนอร์ ความเร็ว 2000 รอบต่อนาที
- อบฟิล์มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส 8 นาที
- สร้างลวดลายตามชั้นที่ต้องการลงบนกระจกมาสักโครเมียมด้วยเครื่องไดเรกไวท์โดยใช้พลังงาน 20 มิลลิจูล
- จุ่มในน้ำยา Az developer 50 วินาที
- ล้างด้วยน้ำ DI
- เป่าแห้ง
- อบฟิล์มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส 8 นาที
- กัดโครเมียมในสารละลายตามอัตราส่วนดังตารางที่ 4.2 ซึ่งจะมีอัตราการกัดโดยประมาณ 1000 อังสตรอมต่อนาที

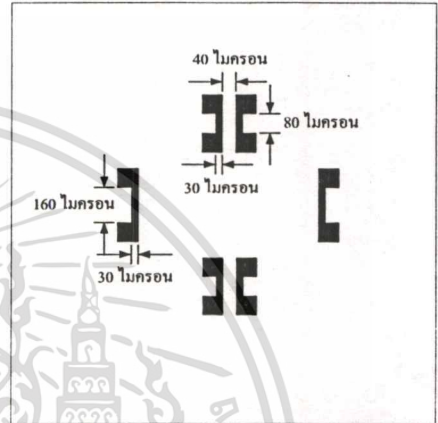
ตารางที่ 4.2 อัตราส่วนสารละลายกัดโครเมียม

สารละลาย	อัตราส่วน
Amonium Cerium Nitride ($\text{Ce}(\text{NH}_4)_2(\text{NO}_3)_6$)	100 กรัม
Perchloric (HClO_4)	26 ลูกบาศก์เซนติเมตร
DI	440 ลูกบาศก์เซนติเมตร

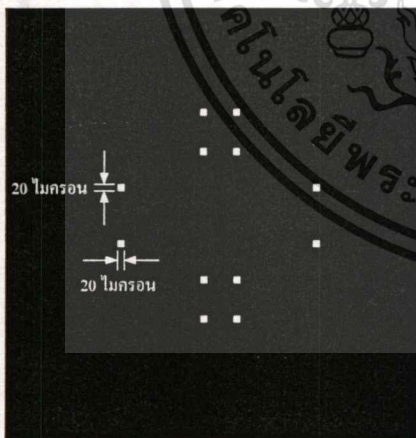
- ล้างด้วยน้ำ DI
- เป่าแห้ง
- ละลายฟิล์มน้ำยาไวแสงชนิดบวกด้วยอะซิโตน
- ล้างด้วยน้ำ DI
- เป่าแห้ง
- อบแผ่นกระจกมาส์กโครเมียมด้วยอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อไล่ความชื้น



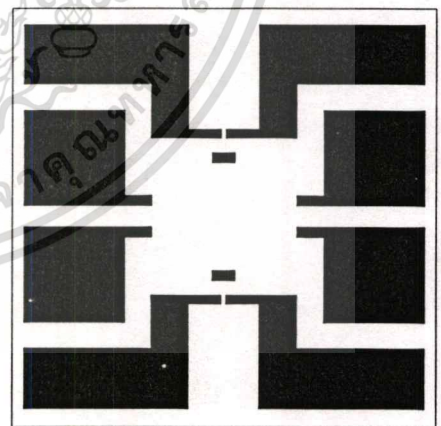
(ก) กระจกมาส์ก 1 ไคอะแฟรมฟิล์มเพชร



(ข) กระจกมาส์ก 2 (ภาพถ่าย) ตัวด้าน
ทานเพชรทั้ง 4 บนไคอะแฟรม



(ค) กระจกมาส์ก 3 (ภาพถ่าย) รอยสัมผัสขั้วทอง



(ง) กระจกมาส์ก 4 ลวดลายขั้วทอง

รูปที่ 4.7 ลำดับโครงสร้างกระจกมาส์กแผ่นที่ 1 ถึง 4 ซึ่งประกอบด้วย (ก) กระจกมาส์ก 1 ไคอะแฟรมฟิล์มเพชร (ข) กระจกมาส์ก 2 ตัวด้านทานเพชรทั้ง 4 บนไคอะแฟรม (ค) กระจกมาส์ก 3 รอยสัมผัสขั้วทอง และ (ง) กระจกมาส์ก 4 ลวดลายขั้วทอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างทรานสดิวเซอร์ความดันจะกำหนดขั้นตอนตามกระจกมาสักดันแบบ ซึ่งมีขั้นตอนโดยรวม 4 มาส์กดังนี้

กระจกมาสักแผ่นที่ 1 สำหรับเจาะช่องออกไซด์ด้านหลังของแผ่นซิลิกอนระนาบ (100) เพื่อกำหนดบริเวณที่ต้องการกัดด้วยสารละลาย EPD ให้เป็นโครงสร้างไดอะแฟรมฟิล์มบางเพชร

กระจกมาสักแผ่นที่ 2 สำหรับกัดฟิล์มเพชรชนิด p ถึงชั้นฟิล์มเพชรชนิด i เพื่อให้ได้โครงสร้างตัวต้านทานเพชรชนิด p โดยมีซิลิกอนไดออกไซด์เป็นหน้ากากป้องกันการกัด

กระจกมาสักแผ่นที่ 3 สำหรับสร้างรอยสัมผัสขั้วทอง

กระจกมาสักแผ่นที่ 4 สำหรับสร้างลวดลายขั้วทอง

ดังรูปที่ 4.7 (ก) ถึง (ง) ซึ่งเป็นรูปโครงสร้างของมาสักต่าง ๆ

4.4.2 ขั้นตอนกระบวนการสร้าง

4.4.2.1 การสังเคราะห์ฟิล์มบางเพชรบนฐานรองซิลิกอน

1. เลือกแผ่นผลึกเริ่มต้นโดยใช้แผ่นซิลิกอนระนาบ (100) ชนิด p ความหนาประมาณ 440 ไมครอน

2. ตัดแผ่นผลึกซิลิกอนให้ได้ขนาด 1.2×1.5 เซนติเมตรและทำความสะอาดแผ่นผลึกซิลิกอนซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

- ล้างแผ่นผลึกด้วยน้ำ DI ในเครื่องสั่นความถี่สูง 5 นาที
- ดั้มในกรดไนตริก 5 นาที เพื่อกำจัดเศษ โลหะที่ผิวหน้าออก
- ล้างด้วยน้ำ DI
- ดั้มในน้ำ DI 2 แก้ว แก้วละ 5 นาที
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ดั้มในไตรคลอโรเอทิลีน 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกประเภทไขมัน
- ล้างด้วยอะซิโตนในเครื่องสั่นความถี่สูง 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำ DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

3. สร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์หนาประมาณ 7000 อังสตรอม โดยการออกซิเดชันแบบแห้งที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศออกซิเจนแห้งด้วยอัตราการไหล 1200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ต่อเนื่องด้วยการออกซิเดชันแบบชื้น 4 ชั่วโมง และแบบแห้งอีก 2 ชั่วโมง

4. ลอกซิลิกอนไดออกไซด์ด้านหลังของแผ่นซิลิกอนออกโดยมีขั้นตอน

ดังนี้
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทาหน้ายาไวแสงชนิดบวก AZ 1350 ที่ด้านหลังแผ่นซิลิคอน
- อบฟิล์มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส 30 นาที
- ลอกชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ออกด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ HF:NH_4 (1:6)
- ล้างด้วยน้ำ DI
- ละลายฟิล์มหน้ายาไวแสงชนิดบวกด้วยอะซิโตน
- ล้างด้วยน้ำ DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

5. นำแผ่นผลึกซิลิคอนมาขัดผิวหน้าด้วยครีมเพชร ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นเส้นและรอยขีดข่วนขึ้นที่บริเวณผิวหน้า หลังจากนั้นทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นซิลิคอนโดยการล้างด้วยอะซิโตนในเครื่องสั่นความถี่สูง 5 นาทีและล้างด้วยน้ำ DI แล้วจึงเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

6. นำแผ่นผลึกซิลิคอนที่เตรียมผิวหน้าเรียบร้อยแล้วมาทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิกด้วยไอระเหยเอทิลแอลกอฮอล์ โดยใช้เวลาในการสร้าง 3 ชั่วโมง และเอ็กทริกซิกซึ่งใช้ไอระเหยเอทิลแอลกอฮอล์ผสมกับสารละลายโบรอนไดรอกไซด์ในอัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอน 10,000 ppm อีก 30 นาที ดังรูปที่ 4.8 (ก) โดยการสังเคราะห์ด้วยวิธี CVD แบบไล่ลดความร้อนที่ความดันต่ำ[20]

4.4.2.2 กระบวนการสร้างทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดฟิล์มบางเพชร

1. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี 1 เปิดช่องออกไซด์ด้านหลังเพื่อกำหนดบริเวณที่ต้องการกัดให้เป็นโครงสร้างไดอะแฟรมฟิล์มบางเพชรซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส 30 นาที เพื่อไล่ความชื้น
- เคลือบหน้ายาไวแสงชนิดบวก AZ 1350 ด้วยเครื่องสปินเนอร์ ที่ด้านหลังแผ่นซิลิคอน ความเร็ว 5000 รอบต่อนาที
- อบฟิล์มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส 30 นาที
- ถ่ายแบบด้วยเครื่อง mask alinger โดยการซ้อนทับแบบด้วยกระจกมาสก์ที่ 1 และฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต 10 วินาที
- ล้างในน้ำยา AZ developer 2 แก้ว แก้วละ 15 วินาที และน้ำ DI 1 แก้ว
- เป่าแห้ง
- อบฟิล์มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส 15 นาที

2. กระบวนการกัดซิลิคอนไดออกไซด์ ทำการกัดซิลิคอนไดออกไซด์ เพื่อเปิดช่องสำหรับกัดซิลิคอนด้วยสารละลาย EPD โดยมีขั้นตอนดังนี้

- กัดซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายบัฟเฟอร์
- ล้างด้วยน้ำ DI
- ละลายฟิล์มน้ำยาไวแสงชนิดบวกด้วยอะซิโตน
- ล้างด้วยน้ำ DI
- เป่าแห้ง

3. กัดซิลิคอนให้ได้เป็นโครงสร้างโคอะแฟรมฟิล์มบางเพชรด้วยละลาย EPD ในอัตราส่วน E : P : D เท่ากับ 150 cc : 24 g : 48 cc มาคัมและกวนสารละลายตลอดเวลาด้วย แท่งกวนแม่เหล็ก โดยควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 95 องศาเซลเซียส ซึ่งใช้เวลาประมาณ 30 นาที หลังจากนั้นนำแผ่นซิลิคอนไปกัด โดยใช้เวลาในการกัดซิลิคอนให้เป็นโครงสร้างโคอะแฟรมฟิล์มบาง เพชรประมาณ 8 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.8 (ข)

4. ทำความสะอาดหลังการกัดโดยการราดด้วยเอทิลแอลกอฮอล์และล้าง ด้วยน้ำ DI แล้วจึงเป่าแห้ง

5. สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บนฟิล์มบางเพชร (ครั้งที่ 1) ด้วยเครื่อง อาร์เอฟ-สปีดเตอริง โดยใช้เงื่อนไขดังตารางที่ 4.3 ซึ่งจะได้ออกซิลิคอนไดออกไซด์หนาประมาณ 3000 อังสตรอม

ตารางที่ 4.3 เงื่อนไขการสปีดเตอริงซิลิคอนไดออกไซด์

พลังงาน	170 วัตต์
อัตราการไหลก๊าซอาร์กอน	9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที
ความดันในระบบ	8×10^{-3} ทอร์
เวลาในการสร้าง	2 ชั่วโมง

6. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี 2 ใช้กระจกมาสก์ที่ 2 เปิดช่องออกไซด์ ดังรูปที่ 4.8 (ค) ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

- อบแผ่นที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส 30 นาที เพื่อไล่ ความชื้น
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ 4620 ด้วยเครื่องสปินเนอร์ ความเร็ว 4800 รอบต่อนาที
- อบฟิล์มที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส 30 นาที

- ถ่ายแบบด้วยเครื่อง mask alinger โดยการซ้อนทับแบบด้วยกระจกมาส์กที่ 2 และฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต 50 วินาที
- ล้างในน้ำยา AZ developer 2 แก้ว แก้วละ 1 นาที และน้ำ DI 1 แก้ว
- เป่าแห้ง
- อบฟิล์มที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส 30 นาที

7. กระบวนการกัดซึลิกอนไดออกไซด์ ทำการกัดซึลิกอนไดออกไซด์ ดังรูปที่ 4.8 (ง) เพื่อเปิดช่องสำหรับกัดฟิล์มเพชรด้วยเครื่องไมโครเวฟพลาสมา โดยมีขั้นตอนดังนี้

- กัดซึลิกอนไดออกไซด์ด้วยเครื่อง RIE โดยใช้เงื่อนไขดังตารางที่ 4.4 ซึ่งมีอัตราการกัด 280 อังสตรอมต่อนาที

ตารางที่ 4.4 เงื่อนไขการกัดซึลิกอนไดออกไซด์ด้วยเครื่อง RIE

พลังงาน RF	250 วัตต์
อัตราส่วนก๊าซผสม Ar : CHF ₃ : O ₂	55% : 43% : 2%
ความดันในระบบ	200 มิลลิทอร์
เวลาในการกัด	ประมาณ 11 นาที

- ละลายฟิล์มน้ำยาไวแสงชนิดบวกด้วยอะซิโตน
- ล้างด้วยน้ำ DI
- เป่าแห้ง

8. กัดชั้นฟิล์มเพชรชนิด p ถึงชั้นฟิล์มเพชรชนิด i ด้วยวิธีไมโครเวฟพลาสมาโดยใช้เงื่อนไขดังตารางที่ 4.5 เพื่อกัดให้เป็นโครงสร้างตัวต้านทานเพชรชนิดพี ดังรูปที่ 4.8 (จ)

ตารางที่ 4.5 เงื่อนไขการกัดโครงสร้างตัวต้านทานเพชรชนิด p

พลังงาน	750 วัตต์
อัตราส่วนก๊าซผสม Ar : O ₂	50% : 50%
อัตราการไหลของก๊าซ	50 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที
ความดันในระบบ	8.5 ทอร์
เวลาในการกัด	ประมาณ 7 นาที

9. ลอกชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บนฟิล์มเพชร (ครั้งที่ 1) ออกด้วยสารละลายบัฟและล้างด้วยน้ำ DI ดังรูปที่ 4.8 (ฉ)

10. การทำความสะอาดผิวฟิล์มเพชรหลังการกัด โดยมีขั้นตอนดังนี้

- กัดด้วยสารละลายอิมตัวของโครเมียมไดออกไซด์ (CrO_3) ในกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที เพื่อกำจัดคราไฟท์ที่ผิวหน้า
- ล้างด้วยสารละลายดัดเม็ดของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) กับแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) ในอัตราส่วน 1:1
- ล้างด้วยน้ำ DI
- เป่าแห้ง

11. สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บนฟิล์มเพชร (ครั้งที่ 2) โดยมีขั้นตอนเหมือนข้อที่ 5

12. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี 3 ใช้กระจกมาสก์ที่ 3 เปิดช่องออกไซด์ ดังรูปที่ 4.8 (ซ) เพื่อกำหนดบริเวณที่ต้องการกัดให้เป็นรอยสัมผัสขั้วทองของตัวต้านทาน ซึ่งมีขั้นตอนเหมือนข้อที่ 6

13. กัดซิลิคอนไดออกไซด์ ทำการกัดซิลิคอนไดออกไซด์ เพื่อเปิดช่องสำหรับสร้างรอยสัมผัสขั้วทองและลวดลายขั้วทองโดยเครื่องเคลือบระบบสูญญากาศ (Evaporation) ซึ่งมีขั้นตอนเหมือนข้อที่ 7 ดังรูปที่ 4.8 (ซ)

14. ทำการเคลือบทองโดยเครื่องเคลือบระบบสูญญากาศ

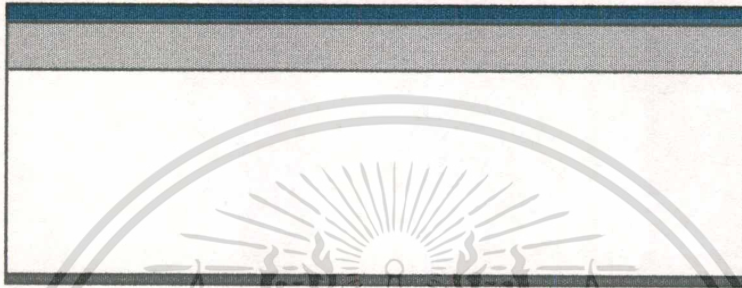
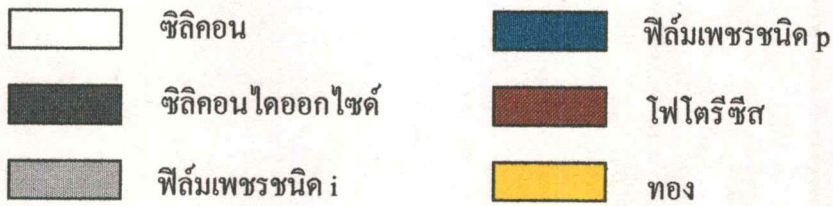
15. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี 4 ใช้กระจกมาสก์ที่ 4 เปิดช่องเพื่อกำหนดบริเวณที่ต้องการกัดทองให้เป็นลวดลายดังรูปที่ 4.8 (ฅ) สำหรับต่อขั้วไฟฟ้า ซึ่งมีขั้นตอนเหมือนข้อที่ 6

16. การกัดทองด้วยสารละลาย เพื่อให้เกิดเป็นลวดลายสำหรับต่อขั้วไฟฟ้าดังรูปที่ 4.8 (ญ) ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

- กัดทองด้วยสารละลาย โพแทสเซียม (KI) ผสมกับไอโอดีน (I_2) ในน้ำ DI ในอัตราส่วน KI : I_2 : DI เท่ากับ 90 g : 60 g : 480 cc ตามลำดับ โดยใช้เวลาในการกัด 3 วินาที
- ล้าง AZ ออกด้วยอะซิโตน
- ล้างน้ำ DI
- เป่าแห้ง

17. การซินเตอร์িং ทำการซินเตอร์িংที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้เกิดเป็นรอยต่อโอห์มมิกที่ดี

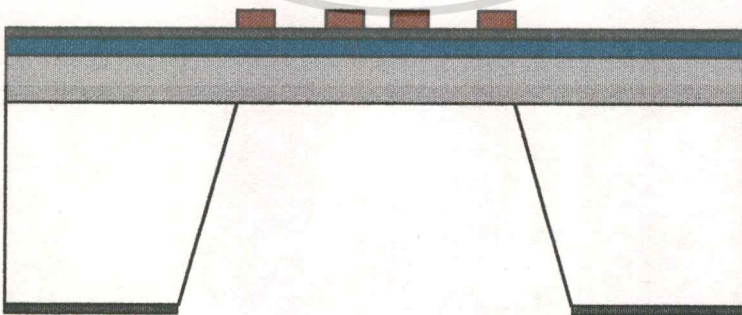
จากกระบวนการสร้างต่าง ๆ ตามลำดับจะทำให้ได้ทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดฟิล์มบาง
เพชรที่เสร็จสมบูรณ์ดังรูปที่ 4.10



(ก) - ตั้งเครื่องฟิล์มเพชรชนิด i และต่อด้วยฟิล์มเพชรชนิด p บนฐานรองซิลิกอน



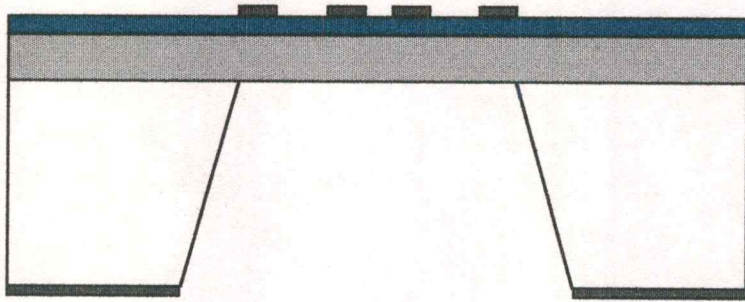
(ข) - เปิดช่องออกไซด์ด้านหลังและกัดซิลิกอนด้วยสารละลาย EPD เพื่อให้เป็นโครงสร้างไดอะแฟรมฟิล์มเพชร



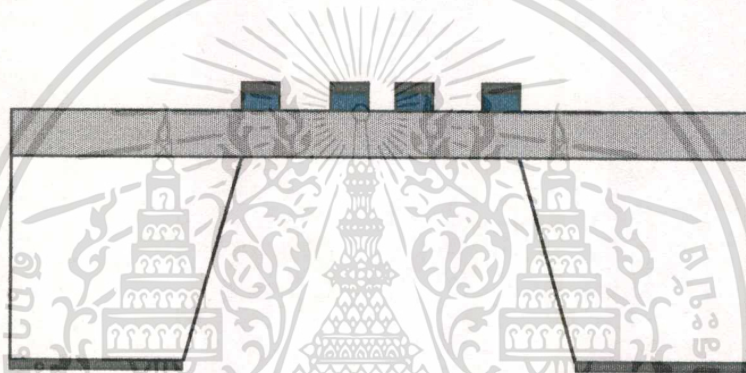
(ค) - สร้างชั้นออกไซด์บนฟิล์มเพชรด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอร์ริง

- เปิดช่องออกไซด์ด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี โดยใช้กระจกมาสก์ 2

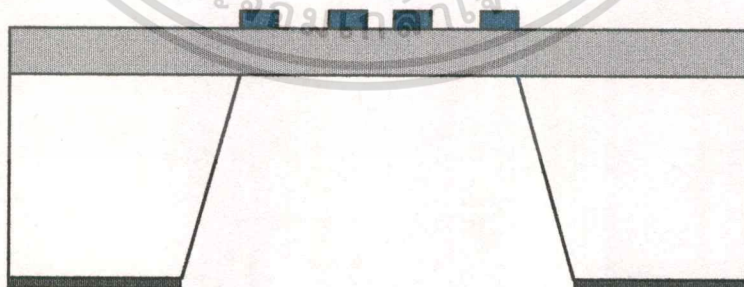
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- (ง) - กัดออกไซด์ด้วยเครื่อง RIE โดยมีโฟโตรีซิสเป็นส่วนป้องกันในบริเวณที่ไม่ต้องการให้กัด
- ลอกโฟโตรีซิสออกด้วยอะซิโตน

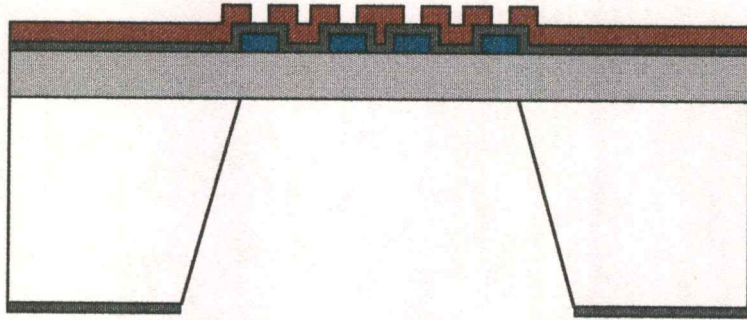


- (จ) - กัดชั้นฟิล์มเพชรชนิด p ถึงชั้นฟิล์มเพชรชนิด i ด้วยวิธีไมโครเวฟพลาสมาโดยมีออกไซด์เป็นส่วนป้องกันในบริเวณที่ไม่ต้องการให้กัด



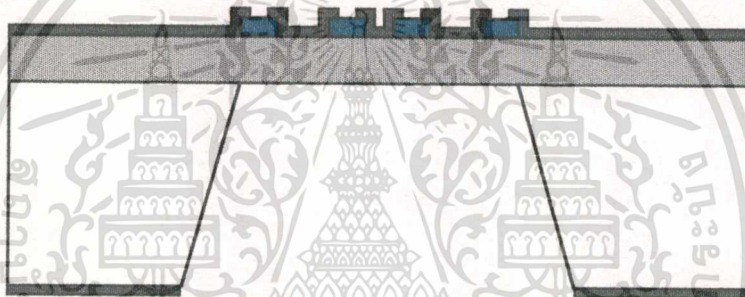
- (ฉ) - ลอกชั้นออกไซด์ออกจะได้โครงสร้างตัวต้านทานเพชรชนิด p บนไดอะแฟรมฟิล์มบางเพชรชนิด i

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



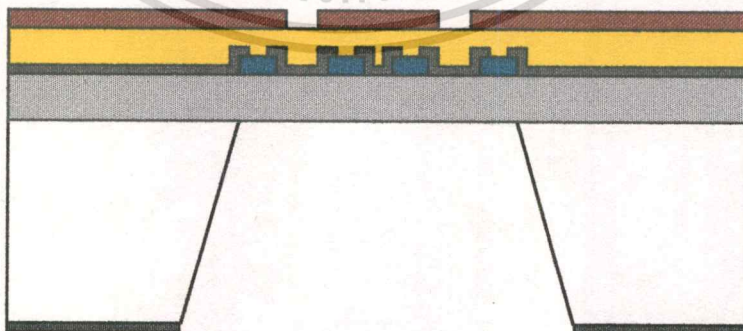
(ข) - สร้างชั้นออกไซด์บนฟิล์มเพชรด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอร์ริง

- เปิดช่องออกไซด์บนฟิล์มเพชรชนิด p ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีโดยใช้กระจกมาสก์ 3



(ค) - กัดออกไซด์ด้วยเครื่อง RIE โดยมีโฟโตรีซิสเป็นส่วนป้องกันในบริเวณที่ไม่ต้องการให้กัด

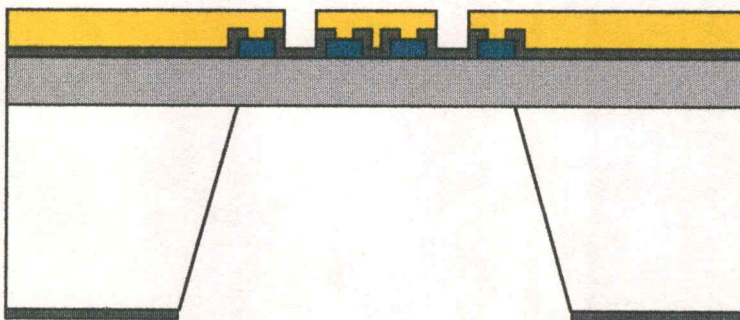
- ลอกโฟโตรีซิสออกด้วยอะซิโตน



(ง) - เคลือบทองด้วยเครื่องเคลือบสุญญากาศ

- เปิดช่องก่อนนำไปกัดทองเพื่อสร้างขั้วไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



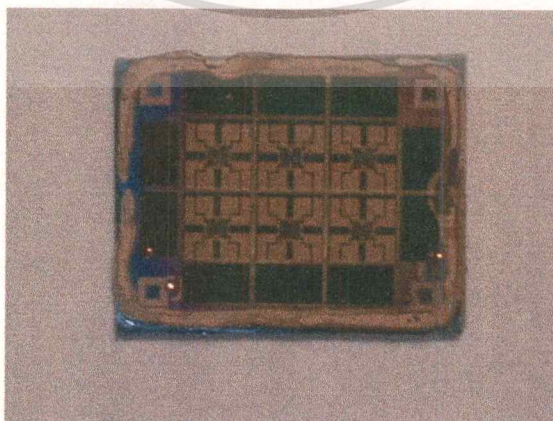
(ญ) - กัดทองด้วยสารละลายโพแทสเซียมผสมกับไฮโดรเจนในน้ำ DI โดยมีโฟโตรีซิสเป็นส่วนป้องกันในบริเวณที่ไม่ต้องการให้กัด

- ลอกโฟโตรีซิสออกด้วยอะซิโตน
- นำไปขึ้นเตอริง

รูปที่ 4.8 ลำดับกระบวนการสร้างทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดฟิล์มบางเพชรชั้นตอนต่าง ๆ



รูปที่ 4.9 ทรานสดิวเซอร์ความดันแบบชนิดฟิล์มบางเพชรที่สมบูรณ์



รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดฟิล์มบางเพชรที่เสร็จสมบูรณ์

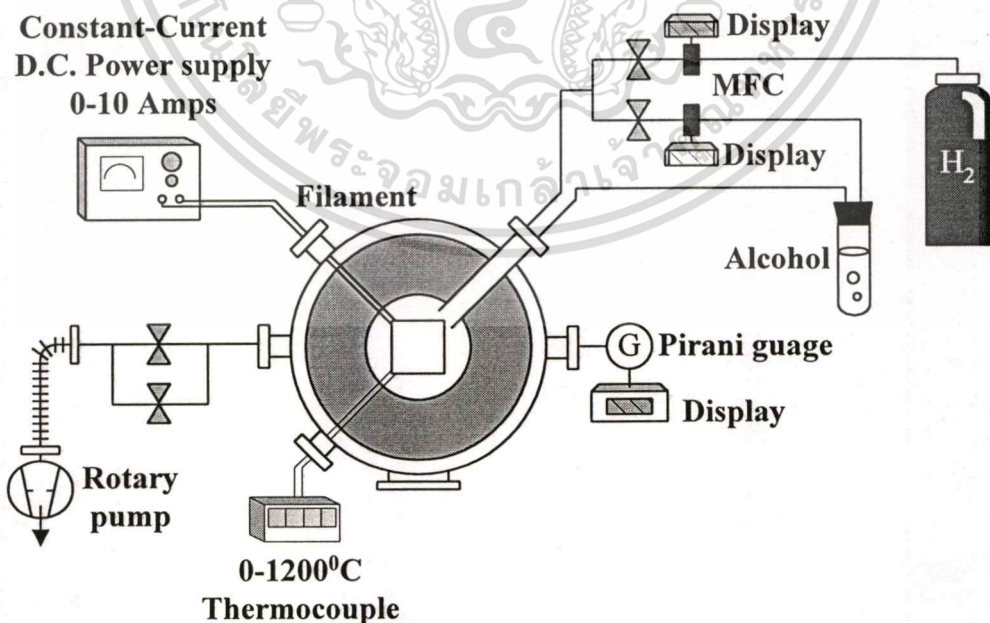
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาและข้อมูลทั้งหมดไว้ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองและผลการทดลอง

5.1 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

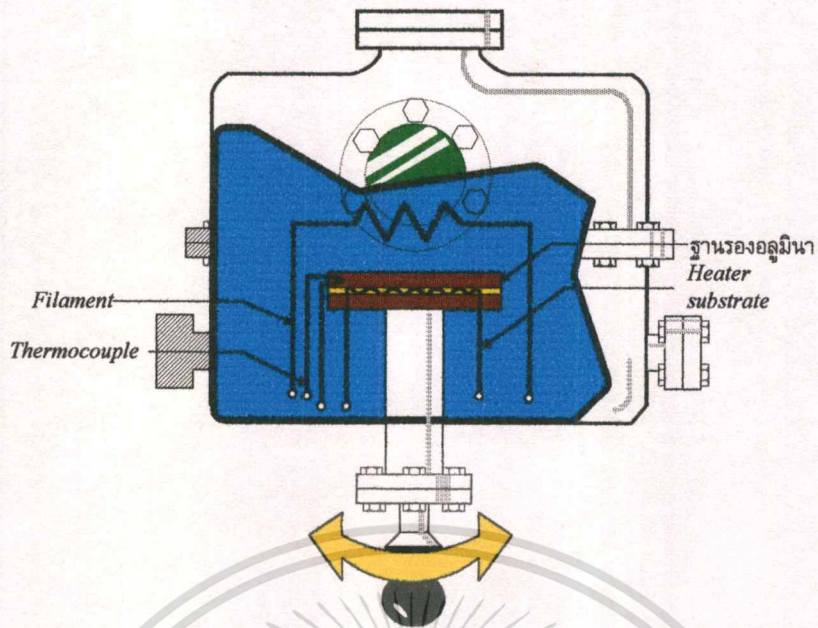
การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรสำหรับในงานวิจัยนี้ จะใช้วิธี CVD แบบลวดความร้อนที่ความดันต่ำดังรูปที่ 5.1 (ก) ซึ่งเป็นไดอะแกรมของระบบเครื่องสังเคราะห์ฟิล์มเพชรที่ความดันต่ำ โดยประกอบด้วยส่วนสำคัญต่าง ๆ ดังนี้

1. โรตารีปั๊ม (Rotary Pump) เป็นปั๊มสูญญากาศ ทำหน้าที่ปั๊มฟออากาศภายในระบบเครื่องสังเคราะห์ฟิล์มเพชรให้มีความดันต่ำโดยมีวาล์วควบคุมความดันเพื่อควบคุมความดันภายในระบบขณะสังเคราะห์
2. พิรานิกเกจ (Piranigauge) เป็นเกจหัววัดความดันภายในระบบ
3. MFC (Mass Flow Controller) ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนและไอระเหยเอทิลแอลกอฮอล์ให้มีอัตราการไหลตามต้องการและคงที่
4. แหล่งจ่ายกระแสตรงที่ (Constant-Current D.C. Power Supply) ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสตรงให้กับไส้ลวดความร้อนดังรูป 5.1 (ข)
5. เทอร์โมคัปเปิ้ล (Thermocouple) ทำหน้าที่วัดอุณหภูมิที่ฐานรอง

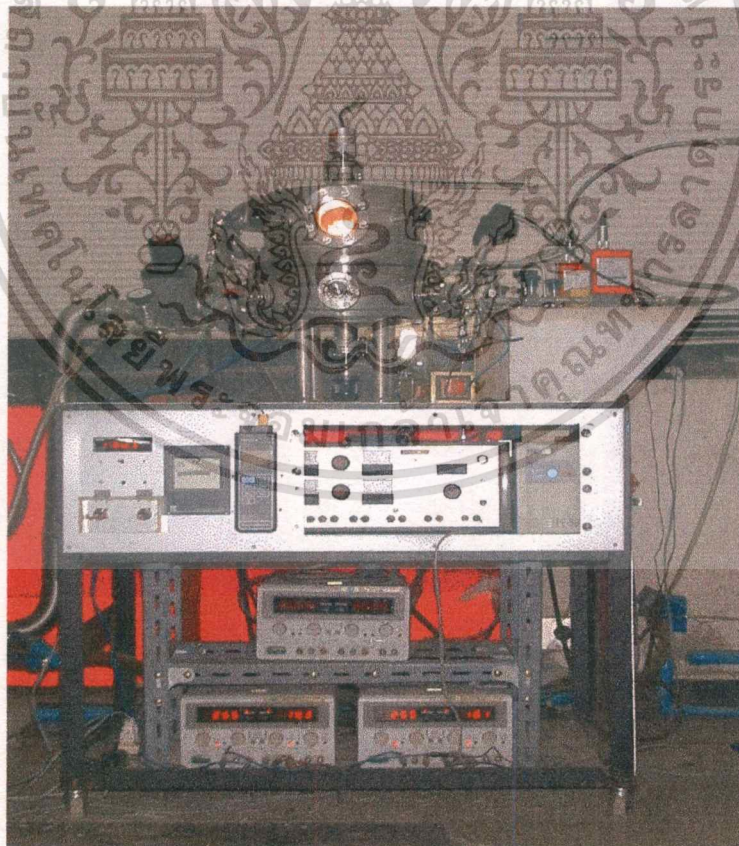


(ก) ไดอะแกรมของระบบสังเคราะห์ฟิล์มเพชรแบบไส้ลวดความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) ภาพตัดขวางภายในระบบสังเคราะห์ฟิล์มเพชรแบบได้ลดความร้อน
รูปที่ 5.1 แผนภาพระบบสังเคราะห์ฟิล์มเพชร



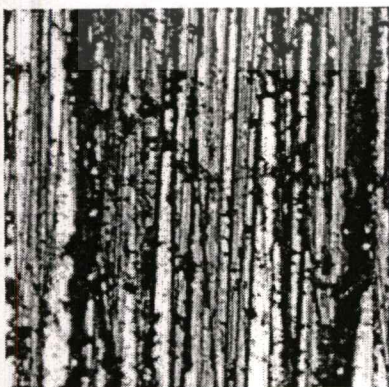
รูปที่ 5.2 ภาพถ่ายเครื่องต้นแบบระบบสังเคราะห์ฟิล์มเพชรแบบได้ลดความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

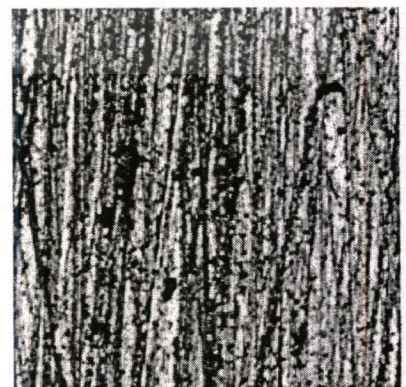
ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรจะทำการสังเคราะห์บนฐานรองซิลิคอนโดยใช้ไอระเหยเอทิลแอลกอฮอล์ เพื่อสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิกหรือฟิล์มเพชรชนิด i และใช้ไอระเหยเอทิลแอลกอฮอล์ผสมกับโบรอนไตรออกไซด์ เพื่อสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดเอ็กทรินซิกหรือฟิล์มเพชรชนิด p โดยมีเงื่อนไขในการสังเคราะห์ต่าง ๆ กัน เช่น ปริมาณไอระเหยเอทิลแอลกอฮอล์ ลักษณะผิวหน้าฐานรองซิลิคอน ระยะความสูงระหว่างไส้หลอดความร้อนถึงฐานรองซิลิคอนรวม ทั้งความดันและเวลาในขณะทำการสังเคราะห์ เป็นต้น เงื่อนไขต่าง ๆ เหล่านี้ล้วนแล้วแต่มีผลต่อการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรแทบทั้งสิ้น ดังนั้นเพื่อให้สามารถสรุปหาเงื่อนไขการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรให้มีคุณภาพดีก่อนนำไปสร้างเป็นทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดเพชร จึงได้ทำการศึกษาเงื่อนไขการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรจากเงื่อนไขต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

5.1.1 ผิวหน้าฐานรองซิลิคอน

ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรบนฐานรองซิลิคอนจำเป็นจะต้องทำการขัดผิวหน้า (Scratch) ฐานรองซิลิคอนเพื่อให้ง่ายต่อการเกิดนิวเคลียสของผลึกเพชร โดยจะเริ่มเกิดตามรอยขีดแล้วค่อย ๆ ขยายตัวกว้างขึ้นเรื่อย ๆ และจากการทดลองเมื่อนำครีมเพชรขนาด 5 ไมครอน ขัดเป็นเวลา 30 นาที พบว่าผิวหน้าฐานรองซิลิคอนจะมีลักษณะผิวขรุขระเป็นรอยขีดข่วนและมีเส้นลึกจำนวนมาก ดังรูปที่ 5.3 (ก) และเมื่อใช้ครีมเพชรขนาด 5 ไมครอน ขัดเป็นเวลา 3 นาทีและทำการขัดต่อด้วยครีมเพชรขนาด 1 ไมครอน อีก 5 นาที พบว่าผิวหน้ามีรอยขีดข่วนและขนาดของเส้นมีความลึกน้อยลงดังรูปที่ 5.3 (ข) นอกจากนี้ยังพบอีกว่าผิวหน้าฐานรองซิลิคอนจะมีลายเส้นขนาดเล็กและสม่ำเสมอเมื่อใช้ครีมเพชรขนาด 1 ไมครอน ขัดเป็นเวลา 15 นาที ดังรูปที่ 5.3 (ค) ส่วนในรูปที่ 5.3 (ง) นั้นจะเป็นผิวหน้าจากการหลุดรื้อโซนิกด้วยผงเพชรขนาด 5 ไมครอน ในเอทิลแอลกอฮอล์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าผิวหน้าจะมีลักษณะเกิดเป็นจุดเล็ก ๆ กระจายไม่สม่ำเสมอ



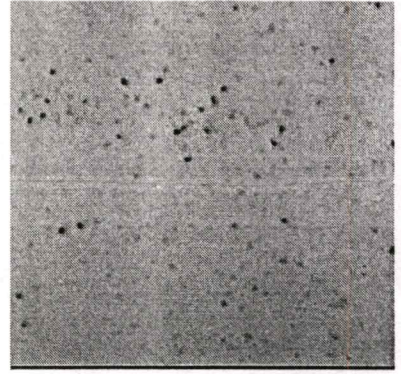
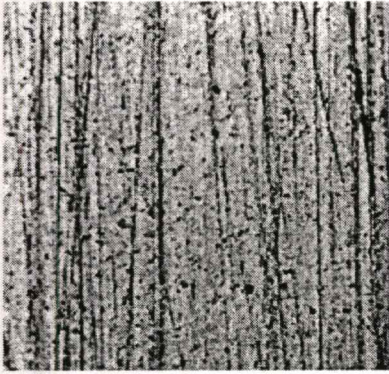
(ก) 5 ไมครอน ขัด 30 นาที



(ข) 5 ไมครอน ขัด 3 นาที และ

1 ไมครอน ขัด 5 นาที

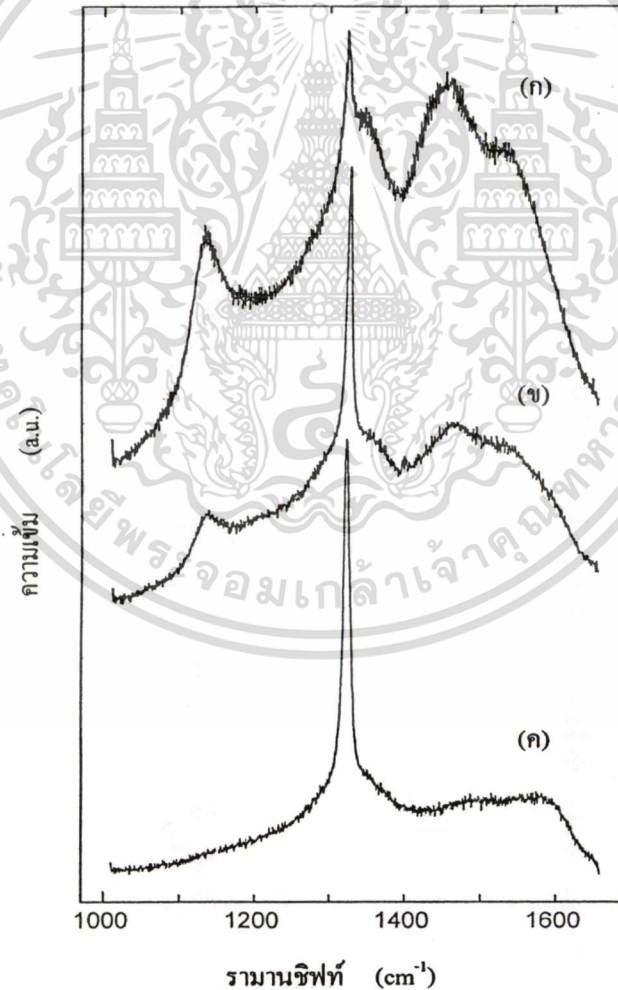
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อยู่ภายใต้เงื่อนไขของลิขสิทธิ์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) 1 ไมครอน ชัด 15 นาที

(ง) 5 ไมครอน อัลตราโซนิก 2 ชั่วโมง

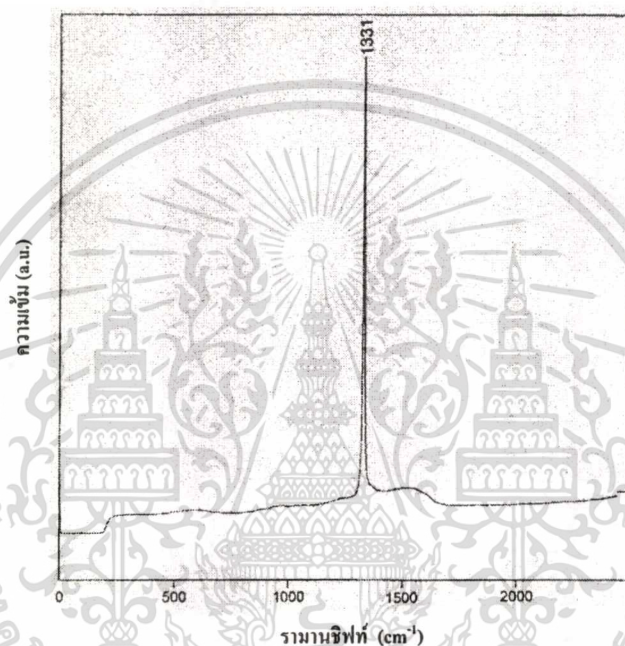
รูปที่ 5.3 ภาพถ่ายผิวหน้าซิลิคอนที่เตรียมผิวหน้าด้วยครีมเพชรเงาต่าง ๆ (ก) 5 ไมครอน ชัด 30 นาที (ข) 5 ไมครอน ชัด 3 นาที และ 1 ไมครอน ชัด 5 นาที (ค) 1 ไมครอน ชัด 15 นาที และ (ง) 5 ไมครอน อัลตราโซนิก 2 ชั่วโมง



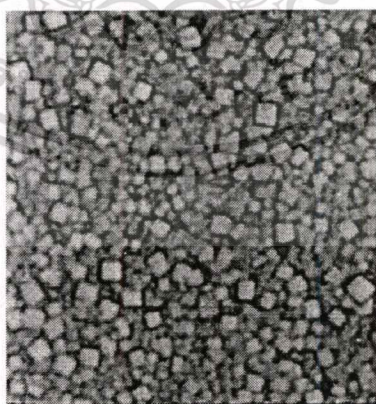
รูปที่ 5.4 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยรามานสเปกโทรสโกปี โดยการเตรียมผิวหน้าด้วยวิธีขัดด้วยครีมเพชรขนาด (ก) 5 ไมครอน 30 นาที (ข) 5 ไมครอน 3 นาที และต่อด้วย 1 ไมครอน 5 นาที และ (ค) 1 ไมครอน 15 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการเตรียมผิวหน้าฐานรองซิลิคอนด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ เมื่อนำมาสังเคราะห์ฟิล์มเพชร โดยใช้ไอระเหยเอทิลแอลกอฮอล์ 4% ต่อปริมาตรในก๊าซไฮโดรเจน 100 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อ นาที พบว่าเมื่อใช้ครีมเพชรที่มีขนาดเล็กกลงและใช้เวลาในการขัดผิวหน้าซิลิคอนน้อยลงจะทำให้ ตำแหน่งยอดคลื่นรามานของเพชรที่ตำแหน่ง 1332 cm^{-1} มีความเข้มสูงขึ้น ในขณะที่ความเข้มของ คาร์บอนกราฟไฟท์ที่ตำแหน่ง 1480 cm^{-1} จะมีขนาดลดลงดังรูปที่ 5.4 (ก) (ข) และ (ค) โดยคุณภาพ ของฟิล์มเพชร (β) ที่คำนวณได้จะมีเพิ่มขึ้นซึ่งมีค่า β เท่ากับ 0.52 0.623 และ 0.702 ตามลำดับ จากคุณภาพของฟิล์มเพชรที่ได้ทำให้สามารถสรุปได้ว่า ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรให้ได้คุณภาพดี



(ก) รามานสเปกโทรสโกปี



(ข) ภาพถ่ายฟิล์มเพชรด้วยกล้องจุลทรรศน์ขยาย 1000 เท่า

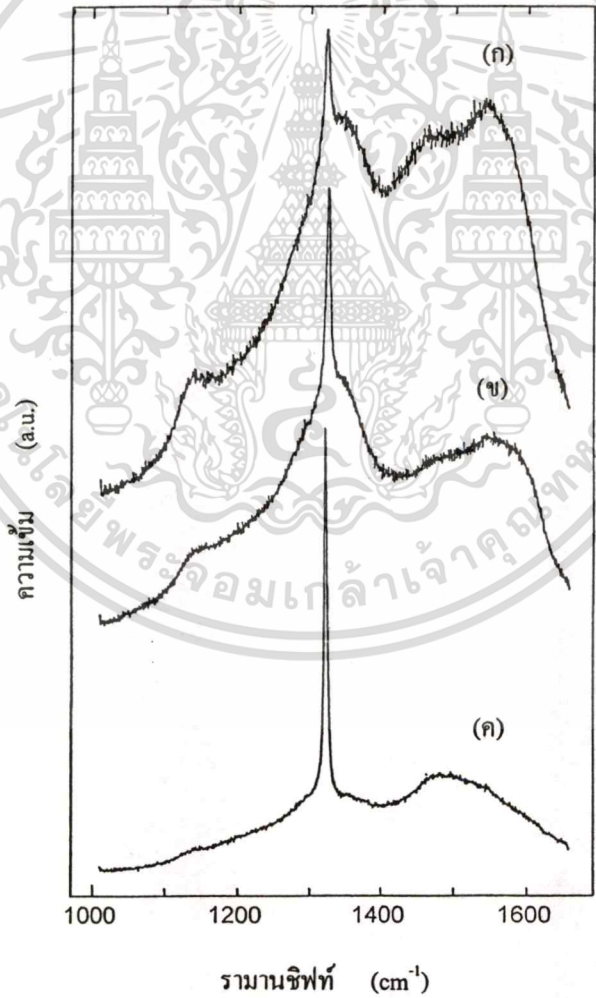
รูปที่ 5.5 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชร โดยการเตรียมผิวหน้าด้วยวิธีอัลตราโซนิก 2 ชั่วโมง โดยการ วิเคราะห์ผลด้วย (ก) รามานสเปกโทรสโกปี และ(ข) ภาพถ่ายฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ ด้วยกล้องจุลทรรศน์ขยาย 1000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั้นควรใช้ครีมเพชรที่มีขนาดเล็กขัดผิวหน้าฐานรองซิลิคอน ซึ่งจะทำให้ฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้มีคุณภาพดี ส่วนการทดลองสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยการเตรียมผิวหน้าโดยวิธีอัลตราโซนิก 2 ชั่วโมง พบว่าฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นเมื่อนำไปวิเคราะห์ผลด้วยรามานสเปกโทสโกปีดังรูปที่ 5.5 (ก) จะมีคุณภาพของฟิล์มเพชรเท่ากับ 0.88 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเตรียมผิวหน้าด้วยวิธีอัลตราโซนิกนี้จะให้คุณภาพของฟิล์มเพชรดีกว่าการเตรียมผิวหน้าโดยวิธีขัดด้วยครีมเพชร แต่อย่างไรก็ตามฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นจากการเตรียมผิวหน้าด้วยวิธีนี้นั้นจุดที่เกิดขึ้นที่บริเวณผิวหน้าฐานรองซิลิคอนจะมีการกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอซึ่งจะทำให้ยากต่อการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

5.1.2 ปริมาณไอระเหยเอทิลแอลกอฮอล์

ปริมาณไอระเหยเอทิลแอลกอฮอล์เป็นเงื่อนไขสำคัญอีกส่วนหนึ่งต่อกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรซึ่งจากการศึกษาและทดลองการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร โดยใช้ปริมาณไอระเหย

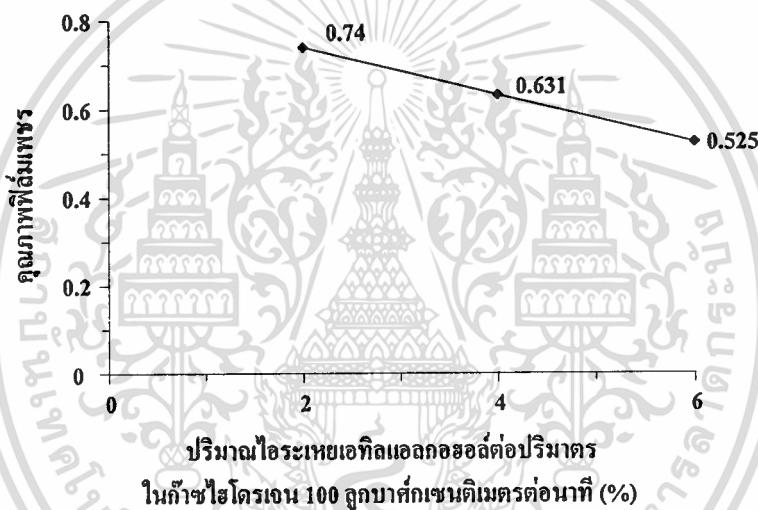


รูปที่ 5.6 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยรามานสเปกโทสโกปีซึ่งใช้ก๊าซไฮโดรเจน 100 ลูกบาศก์ เซนติเมตรต่อนาที ต่อปริมาณไอระเหยเอทิลแอลกอฮอล์โดยปริมาตร (ก) 6% (ข) 4% และ

(ค) 2%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอทิลแอลกอฮอล์ต่าง ๆ กัน คือ 6% 4% และ 2% ต่อปริมาตรในก๊าซไฮโดรเจน 100 ลูกบาศก์ เซนติเมตรต่อนาที โดยการเตรียมผิวหน้าซิลิคอนวิธีขัดด้วยครีมเพชรขนาด 1 ไมครอน 15 นาที พบว่าเมื่อใช้ปริมาณไอระเหยเอทิลแอลกอฮอล์น้อยลงจะทำให้โดยยอดคลื่นรามานของเพชรที่ตำแหน่ง 1332 cm^{-1} มียอดคลื่นสูงขึ้น ในขณะที่ยอดคลื่นรามานของคาร์บอนกราฟไฟท์ที่ตำแหน่ง 1480 cm^{-1} และ อะมอฟสคาร์บอนที่ตำแหน่ง 1550 cm^{-1} จะมียอดคลื่นลดลง ดังรูปที่ 5.6 (ก) (ข) และ (ค) ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาถึงคุณภาพของฟิล์มเพชรแล้วพบว่าฟิล์มเพชรจะมีคุณภาพเพิ่มมากขึ้นเมื่อใช้ปริมาณไอระเหยของเอทิลแอลกอฮอล์ลดลงดังกราฟรูปที่ 5.7 โดยฟิล์มเพชรจะมีคุณภาพมากที่สุดสำหรับการทดลองนี้เมื่อใช้ปริมาณไอระเหยของเอทิลแอลกอฮอล์ 2% ต่อปริมาตรในก๊าซไฮโดรเจน 100 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

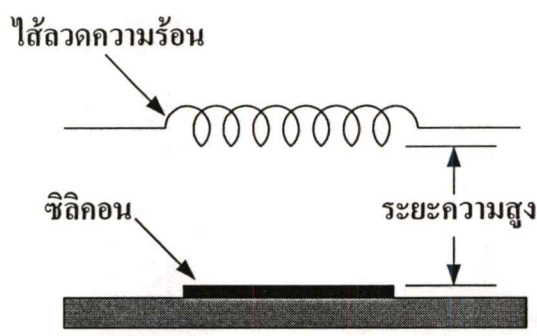


รูปที่ 5.7 กราฟความสัมพันธ์ของคุณภาพฟิล์มเพชรกับปริมาณไอระเหยเอทิลแอลกอฮอล์

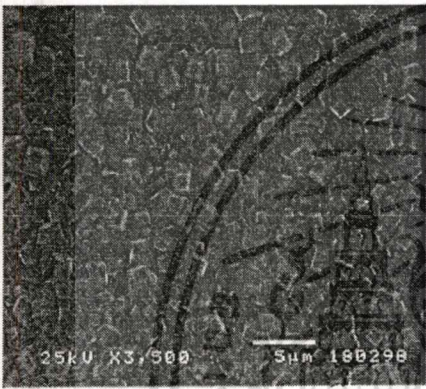
5.1.3 ระยะความสูงไส้หลอดความร้อนถึงฐานรองซิลิคอน

ระยะความสูงระหว่างไส้หลอดความร้อนถึงฐานรองซิลิคอน เป็นอีกเงื่อนไขหนึ่งสำหรับการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรที่จะต้องศึกษา ซึ่งระยะความสูงนี้จะเป็นระยะความสูงที่วัดจากไส้หลอดความร้อนถึงผิวหน้าฐานรองซิลิคอนดังรูปที่ 5.8 โดยการเลื่อนระยะความสูงนี้สามารถทำได้ด้วยการปรับแกนหมุนที่ฐานรองดังรูปที่ 5.1 (ข) เพื่อตั้งระยะความสูงก่อนทำการสังเคราะห์ จากการศึกษาและทดลองสังเคราะห์ฟิล์มเพชรโดยกำหนดให้ใช้ระยะความสูงระหว่างไส้หลอดความร้อนถึงฐานรองซิลิคอนที่ระยะต่าง ๆ กัน คือ 3 มิลลิเมตร 3.5 มิลลิเมตร และ 4.5 มิลลิเมตรตามลำดับ โดยใช้เวลาในการสังเคราะห์ 4 ชั่วโมงที่ความดัน 130 ทอร์ พบว่าที่ระยะความสูง 4.5 มิลลิเมตร จะได้ขนาดเม็ดผลึกที่เล็กกว่าเมื่อสังเคราะห์ที่ระยะความสูง 3.5 มิลลิเมตร และ 3 มิลลิเมตร ดังภาพ

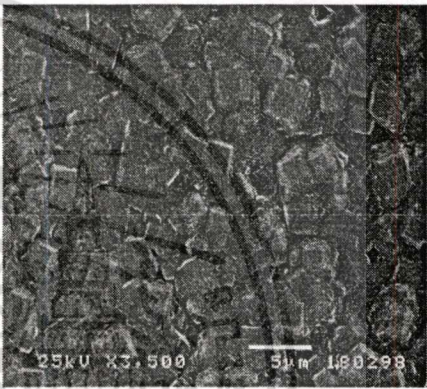
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



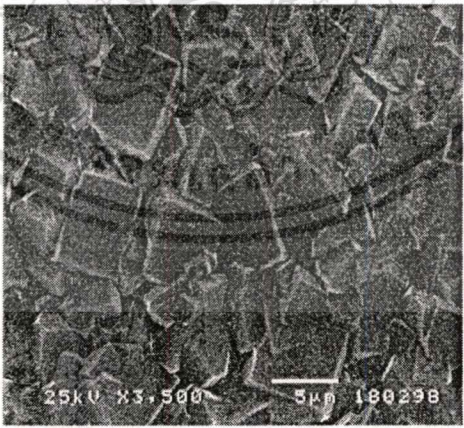
รูปที่ 5.8 ระยะความสูงไส้ลวดความร้อนถึงฐานรองซิลิกอน



(ก) 4.5 มิลลิเมตร



(ข) 3.5 มิลลิเมตร



(ค) 3 มิลลิเมตร

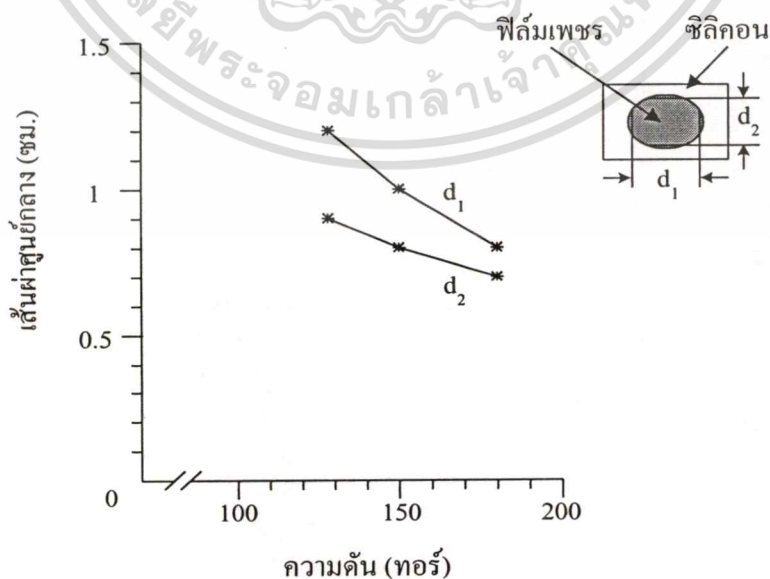
รูปที่ 5.9 ภาพถ่ายพื้นผิวฟิล์มเพชรด้วยเครื่อง SEM อัตราขยาย 3,500 เท่า โดยใช้ระยะห่างค่าต่าง ๆ ระหว่างไส้ลวดความร้อนถึงฐานรองซิลิกอน (ก) 4.5 มิลลิเมตร (ข) 3.5 มิลลิเมตร และ (ค) 3 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ่าย SEM รูปที่ 5.9 (ก) (ข) และ (ค) ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากที่ระยะความสูง 3 มิลลิเมตร ฐานรองจะอยู่ใกล้กับไส้หลอดความร้อนมาก ซึ่งบริเวณไส้หลอดความร้อนนี้จะมีปริมาณของก๊าซแตกตัวในปริมาณสูง จึงทำให้เกิดการฟอร์มตัวของผลึกเพชรบนฐานรองซิลิคอนเกิดขึ้นได้เร็ว และความหนาแน่นของก๊าซแตกตัวจะลดน้อยลงเมื่อฐานรองซิลิคอนอยู่ไกลจากไส้หลอดความร้อนมากขึ้นดังนั้นจะเห็นได้ว่าระยะความสูงระหว่างไส้หลอดความร้อนถึงฐานรองซิลิคอนที่ระยะต่าง ๆ กันจะทำให้มีผลต่อขนาดของผลึกเพชรที่สังเคราะห์ได้ โดยที่ระยะไส้หลอดความร้อนที่อยู่ใกล้กับฐานรองซิลิคอนมากขึ้นจะทำให้ได้ขนาดของผลึกเพชรที่ใหญ่ขึ้น แต่อย่างไรก็ตามไส้หลอดความร้อนที่อยู่ใกล้กับฐานรองซิลิคอนมากเกินไปจะทำให้อุณหภูมิจากไส้หลอดความร้อนซึ่งมีอุณหภูมิโดยประมาณ 2000 องศาเซลเซียส แพร่ผ่านมายังฐานรองซิลิคอนมากเกินไปทำให้ฐานรองมีอุณหภูมิสูงเกินไป ซึ่งจะส่งผลต่อการสังเคราะห์ได้

5.1.4 ความดันในขณะทำการสังเคราะห์

จากการศึกษาและทดลองสังเคราะห์ฟิล์มเพชรโดยใช้เงื่อนไขการสังเคราะห์ที่ความดันต่าง ๆ กันคือ 130 ทอร์ 150 ทอร์ และ 180 ทอร์ พบว่าความดันที่ใช้ในขณะทำการสังเคราะห์จะมีผลต่อความกว้างของพื้นที่ฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นดังกราฟรูปที่ 5.10 เมื่อใช้ความดันในขณะทำการสังเคราะห์ 130 ทอร์ ความกว้างของพื้นที่ฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้จะมีระยะความยาว d_1 ประมาณ 1.2 เซนติเมตร และ d_2 ประมาณ 0.9 เซนติเมตร ทั้งนี้เนื่องจากการสังเคราะห์ที่ความดันต่ำนั้นชั่วอายุ (Life Time) ของก๊าซที่แตกตัวจะมากกว่าที่ความดันสูงทำให้การเกิดนิวเคลียสสามารถกระจายตัวได้ในบริเวณกว้างจึงทำให้ได้พื้นที่ของฟิล์มเพชรกว้างกว่าการสังเคราะห์ที่ความดันสูง

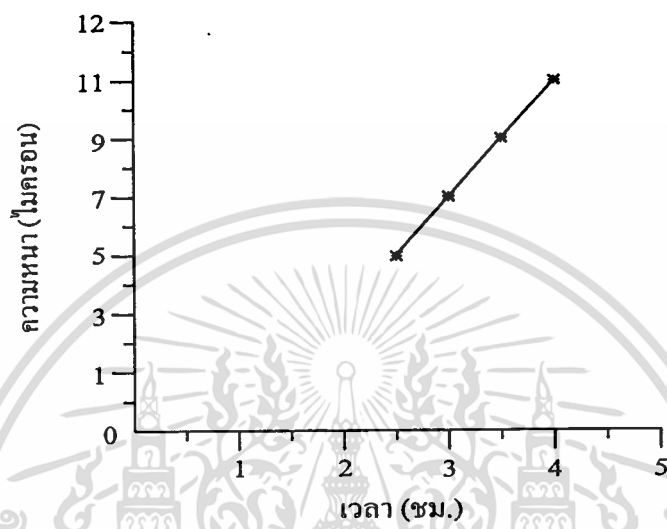


รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของพื้นที่ฟิล์มเพชรกับความดันในการสังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.5 เวลาในการสังเคราะห์

ความหนาของฟิล์มเพชรจะมีความสัมพันธ์กับเวลาในการสังเคราะห์ ซึ่งเมื่อใช้ เวลาในการสังเคราะห์ต่าง ๆ กันคือ 2 ชั่วโมง 30 นาที 3 ชั่วโมง 3 ชั่วโมง 30 นาที และ 4 ชั่วโมง ฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้จะมีความหนาประมาณ 5.2 ไมครอน 7 ไมครอน 9 ไมครอน และ 11 ไมครอน ตามลำดับ ดังรูปที่ 5.11 โดยจะมีอัตราการเกิดประมาณ 2.45 ไมครอนต่อชั่วโมง

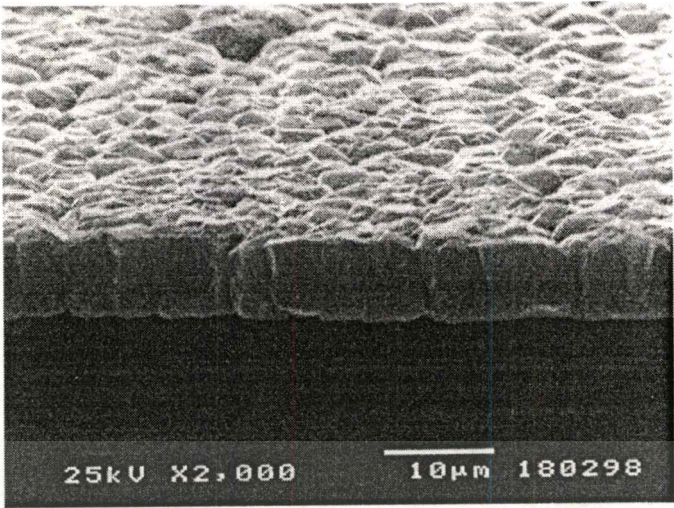


รูปที่ 5.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มเพชรกับเวลาในการสังเคราะห์

จากการศึกษาการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเงื่อนไขต่างๆ พบว่าการสังเคราะห์ฟิล์ม เพชรจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขปัจจัยต่าง ๆ เช่น ผิวหน้าฐานรองซิลิคอน ปริมาณไฮระเหย เอทิลแอลกอฮอล์ ระยะความสูงระหว่างไส้หลอดความร้อนถึงฐานรองซิลิคอน ความดันในขณะทำ การสังเคราะห์และเวลาในการสังเคราะห์ จากเงื่อนไขการสังเคราะห์ต่าง ๆ สามารถสรุปหาเงื่อนไข ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรเพื่อนำมาสร้างเป็นทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดเพชรได้ดังตารางที่ 5.1 ซึ่งจะได้ออกฟิล์มเพชรหนาโดยประมาณ 7 ไมครอน ดังภาพถ่ายภาพตัดขวางด้วยเครื่อง SEM รูปที่ 5.12

ตารางที่ 5.1 เงื่อนไขการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

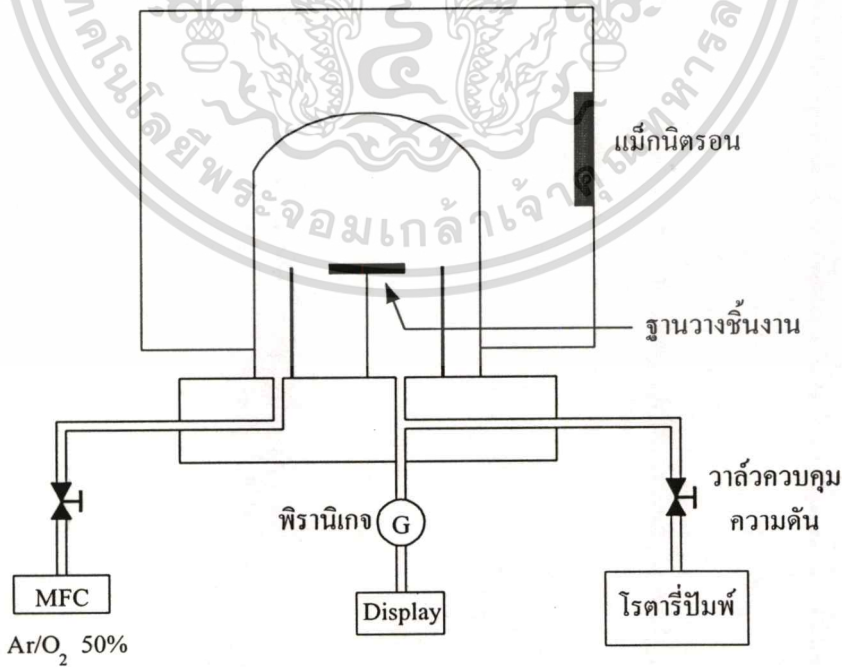
พลังงานไส้หลอดความร้อน	180 วัตต์
ความสูงระหว่างไส้หลอดความร้อนถึงฐานรองซิลิคอน	3.5 มิลลิเมตร
ปริมาณไฮระเหยเอทิลแอลกอฮอล์	2% โดยปริมาตร
ความดัน	130 ทอร์
อุณหภูมิฐานรอง	900 องศาเซลเซียส
ผิวหน้าฐานรองซิลิคอน	ขัดด้วยครีมเพชร 1 ไมครอน 15 นาที
เวลาในการสร้าง	3 ชั่วโมง



รูปที่ 5.12 ภาพถ่ายภาพตัดขวางด้วยเครื่อง SEM อัตราขยาย 2000 เท่า

5.2 การทดลองการกัดเพอร์ด้วยวิธีไมโครเวฟพลาสมา

การกัดด้วยวิธีไมโครเวฟพลาสมานี้จะมีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อกระบวนการสร้างทรานซิสเตอร์ความดันชนิดเพอร์ โดยจะนำมาใช้ในกระบวนการกัดเพอร์เพื่อให้เกิดเป็นโครงสร้างตัวต้านทานเพอร์ชนิด p บนไดอะแฟรม ดังแสดงไดอะแกรมเครื่องกัดดังรูปที่ 5.13 ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญต่าง ๆ ดังนี้

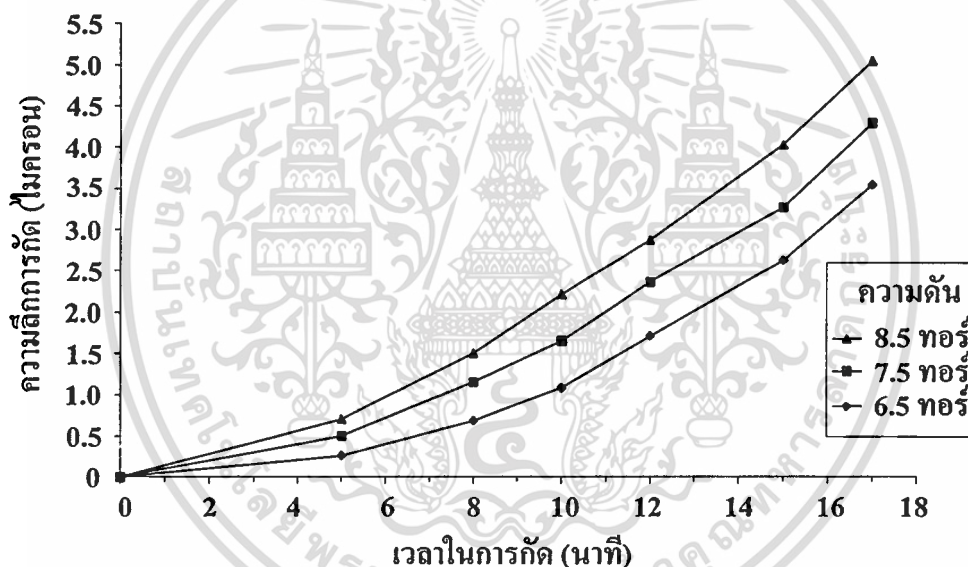


รูปที่ 5.13 ไดอะแกรมเครื่องกัดเพอร์ด้วยวิธีไมโครเวฟพลาสมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. แหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟพลังงาน 750 วัตต์
2. ฐานวางชิ้นงาน
3. อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซหรือ MFC (Mass Flow Controller) สำหรับควบคุมอัตราการไหลของก๊าซผสมออกซิเจน (O_2) กับอาร์กอน (Ar)
4. ไพรานิกเกจ (Piranigauge) เป็นเกจสำหรับวัดความดันภายในระบบ
5. ปัมป์สุญญากาศ

จากการทดลองการกัดเพชรโดยใช้ก๊าซผสม $O_2 : Ar$ อัตราส่วน 50 % ในอัตราการไหลของก๊าซ 50 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีที่ความดัน 6.5 ทอร์ 7.5 ทอร์ และ 8.5 ทอร์ พบว่าเมื่อเพิ่มความดันในระบบมากขึ้นจะทำให้ความลึกการกัดเพิ่มขึ้น โดยสัมพันธ์กับเวลาในการกัดดังกราฟรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความลึกการกัดกับเวลาที่ความดันค่าต่างๆ (ก) 6.5 ทอร์ (ข) 7.5 ทอร์ และ (ค) 8.5 ทอร์

สำหรับฟิล์มเพชรชนิด p ซึ่งใช้เวลาในการสังเคราะห์ 30 นาที จะมีความหนาโดยประมาณ 1.3 ไมครอน ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟรูปที่ 5.14 ที่ความดัน 8.5 ทอร์ แล้วพบว่าต้องใช้เวลาในการกัดประมาณ 7 นาที จึงจะได้โครงสร้างตัวต้านทานเพชรชนิด p บนไดอะแฟรมฟิล์มเพชรชนิด i

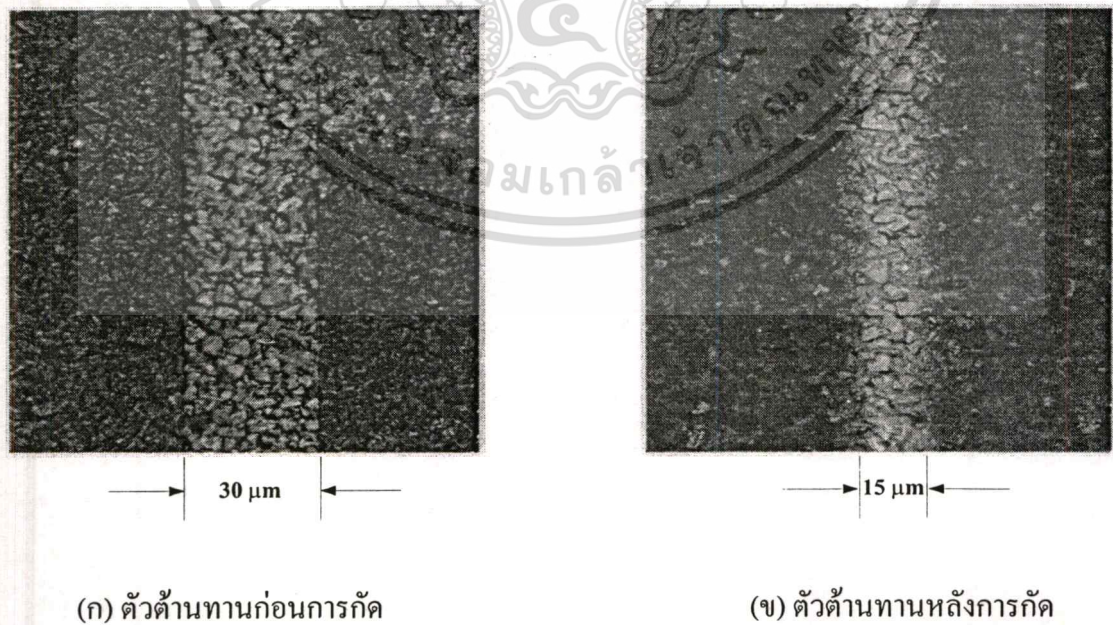
5.3 การตรวจสอบค่าความต้านทานของทรานสดิวเซอร์ความดัน

ทรานสดิวเซอร์ความดันที่สร้างเสร็จจะถูกลำมาทดสอบค่าความต้านทานของตัวต้านทานในแนวตั้งฉากและตัวต้านทานในแนวขนานก่อนนำไปทดสอบกับความดัน ซึ่งค่าความต้านทานนี้จะเป็นส่วนสำคัญหลักของทรานสดิวเซอร์ความดันในการแปรค่าเป็นแรงดันไฟฟ้าสำหรับการตอบสนองต่อความดันและจากการวัดค่าความต้านทานต่าง ๆ ทั้ง 4 ตัวบนไดอะแฟรมสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.2 ดังนี้

ตารางที่ 5.2 ค่าความต้านทานในแนวตั้งฉากและในแนวขนานของทรานสดิวเซอร์ความดัน

ตัวต้านทาน	ค่าความต้านทาน (kΩ)
ในแนวตั้งฉาก R_{P1}	20
ในแนวตั้งฉาก R_{P2}	21
ในแนวขนาน R_{L1}	21.2
ในแนวขนาน R_{L2}	22

จากตารางที่ 5.2 พบว่าตัวต้านทานในแนวตั้งฉาก R_{P1} R_{P2} และตัวต้านทานในแนวขนาน R_{L1} R_{L2} จะมีค่าความต้านทานไม่เท่ากัน และมีค่าความต้านทานสูงมาก ซึ่งไม่ตรงกับที่ได้ออกแบบไว้ทั้งนี้จากการตรวจสอบพบว่าเกิดขึ้นจากกระบวนการกัดเพชรด้วยวิธีไมโครเวฟพลาสมาให้เป็นโครงสร้างตัวต้านทานซึ่งการกัดด้วยวิธีนี้จะเป็นกัดแบบไอโซโทปิกดังรูปที่ 5.15 (ก) และ (ข)



รูปที่ 5.15 ภาพถ่ายโครงสร้างตัวต้านทานเพชรด้วยกล้องจุลทรรศน์ขยาย 1000 เท่า โดยการเปรียบเทียบ

เทียบตัวต้านทาน (ก) ก่อนการกัดและ(ข) หลังการกัด

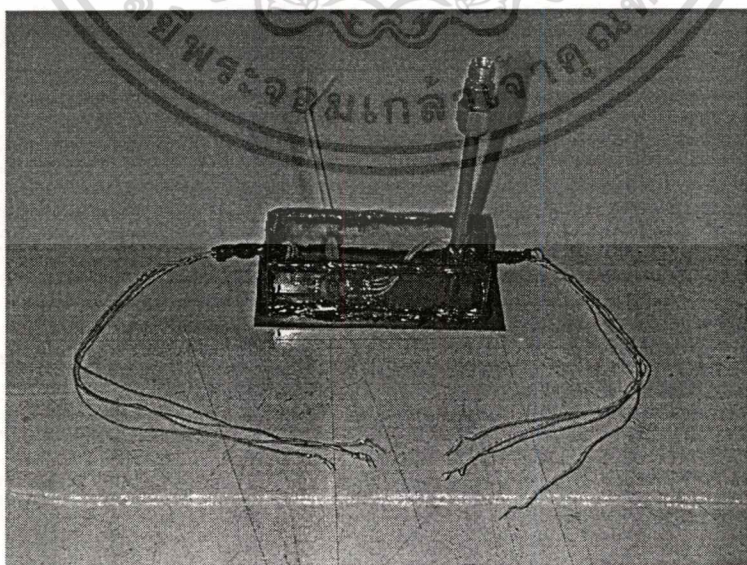
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเป็นภาพถ่ายส่วนหนึ่งของตัวต้านทานด้วยกล้องจุลทรรศน์ขยาย 1000 เท่า ก่อนและหลังการกัด จะเห็นได้ว่าตัวต้านทานหลังจากการกัดจะมีขนาดเล็กลงจากเดิมมากซึ่งจะทำให้ได้ค่าความต้านทานสูงและไม่ตรงกับที่ได้ออกแบบไว้

ตัวต้านทานทั้ง 4 ตัวบนไดอะแฟรมที่มีค่าความต้านทานสูงมากเกินไปนั้น เมื่อนำมาต่อกันเป็นวงจรบริดจ์แล้วนำไปทดสอบกับความดัน จะทำให้ไม่สามารถสังเกตเห็นปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเข้าที่พุทจากวงจรบริดจ์ได้อย่างชัดเจน เนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านวงจรบริดจ์จะมีค่าลดลง ทำให้แรงดันเข้าที่พุทจากวงจรบริดจ์มีค่าลดลงตามไปด้วย

5.4 การทดลองและผลการทดลองวัดค่าความไวต่อความดัน

ลักษณะคุณสมบัติพื้นฐานของทรานสดิวเซอร์ความดัน ซึ่งมักจะถูกพิจารณาเป็นอันดับต้น ๆ ก็คือ ค่าของความไวต่อความดัน หรือที่เรียกว่า ความไวของทรานสดิวเซอร์ความดัน ซึ่งคุณสมบัติการตอบสนองต่อความดันนี้จะเป็นการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต V_0 ของวงจรบริดจ์กับความดันที่ให้กับทรานสดิวเซอร์ ซึ่งในการทดสอบคุณสมบัติการตอบสนองต่อความดันนี้สามารถทำได้โดยการนำทรานสดิวเซอร์ความดันที่สร้างเสร็จมาต่อขั้วไฟฟ้า แล้วจึงติดชิปทรานสดิวเซอร์ความดันนี้ไว้บนฐานอลูมิเนียมด้วยกาวอีพอกซี (Epoxy) ก่อนนำไปเก็บบรรจุอยู่ในภาชนะปิดที่มีท่อสำหรับอัดความดันเข้าดังรูปที่ 5.16 โดยในการเก็บบรรจุนี้จะต้องอุดรอยรั่วต่าง ๆ ให้หมดเพื่อไม่ให้ความดันที่อัดเข้าไปด้วยมาโนมิเตอร์รั่วออกสู่ภายนอก ซึ่งจะทำให้ผลของการวัดผิดพลาดไป และหลังจากนั้นจึงประกอบชุดแหล่งจ่ายแรงดัน และคิจิตอลมาโนมิเตอร์พร้อมทั้งวงจรขยายแรงดันให้กับ ทรานสดิวเซอร์ความดันนี้ ดังรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.16 ภาพถ่ายทรานสดิวเซอร์ความดันที่ถูกบรรจุอยู่ในภาชนะปิด

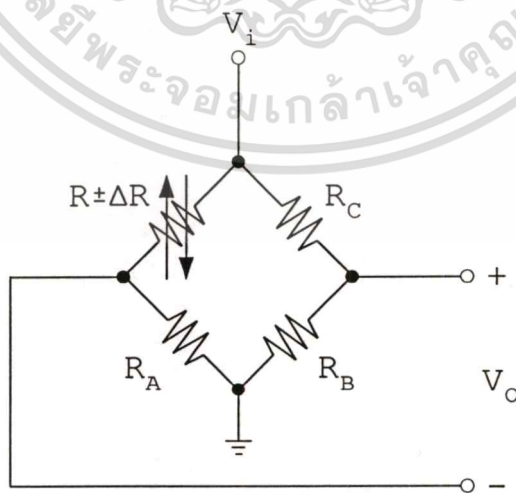
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.17 ภาพถ่ายการประกอบชุดวัดและทดสอบทรานสดิวเซอร์ความดัน

5.4.1. ผลการทดลองวัดค่าความไวของตัวต้านทานในแนวตั้งฉากและในแนวนานขอบไดอะแฟรม

การวัดค่าความไวของตัวต้านทานตัวเดียว ๆ คือ R_{P1} , R_{P2} , R_{L1} และ R_{L2} ก็เพื่อเป็นการสังเกตปริมาณการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของตัวต้านทานทุกตัวบน ไดอะแฟรมมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างไร โดยใช้วงจรวีทสโตนบริดจ์แบบควอเตอร์บริดจ์ในการทดสอบ ดังรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.18 วงจรวีทสโตนบริดจ์แบบควอเตอร์บริดจ์สำหรับทดสอบความไวของตัวต้านทานตัวเดียว ๆ บนไดอะแฟรมทรานสดิวเซอร์ความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปและวิจารณ์

จากการศึกษาถึงเงื่อนไขต่าง ๆ ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร เพื่อนำมาสร้างเป็นทรานสดิวเซอร์ความดัน พบว่าฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้น จะขึ้นอยู่กับปริมาณไฮโดรเจนเอทิลแอลกอฮอล์และผิวหน้าฐานรองซิลิคอน ซึ่งจะเป็นปัจจัยหนึ่งที่บอกถึงคุณภาพของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้น โดยสามารถพิจารณาได้จากค่าของ β ความดันในขณะที่สังเคราะห์และเวลาในการสังเคราะห์ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้น โดยการสังเคราะห์ที่ความดันต่ำจะทำให้พื้นที่ฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้กว้างกว่าการสังเคราะห์ที่ความดันสูงขึ้น ส่วนความหนาของฟิล์มเพชรจะขึ้นอยู่กับเวลาในการสังเคราะห์ นอกจากนี้ระยะห่างระหว่างไส้ลวดความร้อนกับฐานรองซิลิคอน จะทำให้ฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นมีขนาดของเม็ดผลึกเพชรที่ต่างกัน โดยที่ไส้ลวดความร้อนที่อยู่ใกล้กับฐานรองมากขึ้นจะทำให้เม็ดผลึกเพชรมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น

ฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นจะถูกนำมาสร้างเป็นทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดเพชรแบบเปียโซรีซีฟที่ปบบนไดอะแฟรมฟิล์มเพชร โดยมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยชิปฐานรองซึ่งเป็นฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์บนฐานรองซิลิคอนระนาบ (100) โดยการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิค 3 ชั่วโมง และต่อด้วยเอ็กทรีนซิคชนิด p อีก 30 นาที ไดอะแฟรมฟิล์มเพชรรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสจะถูกสร้างขึ้นโดยใช้สารละลาย EPD กัดฐานรองซิลิคอนให้ถึงชั้นฟิล์มเพชร ส่วนตัวด้านเพชรชนิด P บนไดอะแฟรมจะถูกสร้างโดยใช้กระบวนการกัดด้วยวิธีไมโครเวฟพลาสมา ทรานสดิวเซอร์ความดันที่สร้างเสร็จสมบูรณ์จะถูกนำมาตรวจสอบค่าความต้านทานทั้ง 4 ตัวบนไดอะแฟรมก่อนนำไปต่อขั้วไฟฟ้าและเก็บบรรจุอยู่ในภาชนะปิด จากการตรวจสอบพบว่า ตัวต้านทานทั้ง 4 ตัวคือ R_{p1} , R_{p2} , R_{L1} และ R_{L2} มีค่าความต้านทานไม่ตรงกับที่ได้ออกแบบไว้โดยจะมีค่าความต้านทานสูงมากคือ $20k\Omega$, $21k\Omega$, $21.2k\Omega$ และ $22k\Omega$ ตามลำดับ และหลังจากนั้นเมื่อนำทรานสดิวเซอร์ความดันนี้มาทดสอบการตอบสนองต่อความดันโดยการมาทดสอบการตอบสนองต่อความดันของตัวต้านทานบนไดอะแฟรมตัวเดียว ๆ คือ R_{p1} , R_{p2} , R_{L1} และ R_{L2} โดยต้องเป็นวงจรวิทสโตนบริดจ์แบบควอเตอร์บริดจ์ พบว่าทรานสดิวเซอร์นี้สามารถตอบสนองเป็นเชิงเส้นต่อความดันในช่วงทดสอบตั้งแต่ $0-0.6 \text{ kgf/cm}^2$ ได้โดยจะมีความไวประมาณ 0.53, 0.44, 0.25 และ $0.20 \mu\text{V/V-kgf/cm}^2$ สำหรับตัวต้านทาน R_{p1} , R_{p2} , R_{L1} และ R_{L2} ตามลำดับ และเมื่อนำตัวต้านทานทั้ง 4 ตัวมาต่อกันเป็นวงจรวิทสโตนบริดจ์แบบฟูลบริดจ์และทำการทดสอบกับแหล่งจ่ายแรงดันคงที่ค่าต่าง ๆ กัน พบว่าทรานสดิวเซอร์นี้สามารถตอบสนองเป็นเชิงเส้นกับความดันได้ ซึ่งเมื่อเพิ่มปริมาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ามากขึ้นจะทำให้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของบริดจ์เพิ่มขึ้น โดยเป็นสัดส่วนกับปริมาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าและมีความไวเฉลี่ยประมาณ $1.068 \mu\text{V/V-kgf/cm}^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลจากการศึกษาและสร้างทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดเพชร ทำให้ทราบถึงอุปสรรค และ ปัญหาต่าง ๆ บางประการ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นบนฐานรองซิลิคอนจะเป็น ผลึกแบบหลายรูปหรือโพลีคริสตัลไรต์ ไม่ว่าจะเป็นระนาบ (100) หรือ ระนาบ (111) ฟิล์มเพชร ที่มีขนาดของเม็ดผลึกที่ใหญ่มากเกินไปจะทำให้เป็นอุปสรรคต่อการถ่ายโอนแบบในกระบวนการ โฟโตลิโทกราฟี โดยในขณะที่ทำการถ่ายโอนแบบแสง UV จากแหล่งกำเนิดเครื่อง Mask Aligner จะสามารถผ่านเข้าได้กระเจกมาสักต้นแบบได้ ทำให้ลวดลายต่าง ๆ หรือ Pattern บนฟิล์มเพชรมี ขนาดเล็กลงจากเดิมและไม่ตรงกับกระเจกมาสักต้นแบบที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งจะเป็นปัญหาอย่างมาก ต่อกระบวนการสร้าง ในส่วนของการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิด p ก็เป็นอีกปัญหาหนึ่งที่มีผลต่อ กระบวนการสร้างทรานสดิวเซอร์ความดันเนื่องจากการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD แบบ ไล่ ลวดความร้อนจะทำให้ฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นมีพิคัดความต้านทาน (ρ) ที่ไม่แน่นอนซึ่งขึ้นอยู่กับ ปริมาณไฮโดรเจนเอทิลแอลกอฮอล์และพลังงานของไล่ลวดความร้อนในขณะนั้นที่สามารถทำ ให้ก๊าซแตกตัวได้มากน้อยอย่างไร โดยพลังงานของไล่ลวดความร้อนนี้จะลดลงเรื่อย ๆ ตามจำนวน ครั้งของการใช้งาน ซึ่งจะส่งผลต่อการแตกตัวของก๊าซ ดังนั้นในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรที่ต้องการ นำมาสร้างและพัฒนาเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จึงควรใช้การสังเคราะห์ด้วยวิธี CVD แบบ ไมโครเวฟ ซึ่งจะทำให้สามารถควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ได้เช่น พลังงาน อุณหภูมิ และก๊าซ ไฮโดรคาร์บอนได้ง่ายกว่าแบบไล่ลวดความร้อนมาก รวมทั้งมีกระบวนการสร้างที่ง่ายและไม่ซับซ้อน ทำให้สามารถควบคุมความหนาของฟิล์มเพชร ระนาบของฟิล์มเพชรและสามารถกำหนด พิกัดความต้านทานที่แน่นอนได้จากกระบวนการสังเคราะห์ได้ดีกว่าแบบไล่ลวดความร้อน

2. การกัดเพชรด้วยวิธีไมโครเวฟพลาสมา

การกัดเพชรด้วยวิธีไมโครเวฟพลาสมาจากการศึกษาการกัดพบว่าจะเป็นปัญหา อย่างมากต่อกระบวนการสร้างทรานสดิวเซอร์ความดันเนื่องจากการกัดด้วยวิธีนี้จะเป็นการกัดแบบ ไอโซโทปิก โดยจะเห็นได้จากการทดลองที่ 5.2 โครงสร้างตัวต้านทานเพชรชนิด p ที่ได้จากการ กัดด้วยวิธีไมโครเวฟพลาสมาจะมีค่าความต้านทานไม่ตรงกับที่ได้ออกแบบไว้ โดยโครงสร้าง ของตัวต้านทานหลังการกัดจะมีขนาดที่เล็กลง ทำให้มีค่าความต้านทานสูงขึ้นจากเดิมมาก ซึ่งจะ เป็นปัญหาอย่างมากต่อกระบวนการสร้างทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดเพชรนี้

ดังนั้นสรุปได้ว่า กระบวนการสร้างทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดเพชรแบบเป็นโซริซีฟทิป บนฟิล์มบางเพชรนี้ จำเป็นจะต้องอาศัยอุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสม รวมทั้งเทคนิคและกระบวนการสร้างต่าง ๆ ซึ่งจำเป็นที่จะต้องวิจัย ค้นคว้าและพัฒนาเพิ่มเติมให้ สามารถสร้างเป็น ทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดเพชรได้อย่างมีประสิทธิภาพเพื่อนำไปสู่กระบวนการ สร้างที่มาตรฐานและเป็นผลผลิตทางอุตสาหกรรมได้ในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Randy Frank. Understanding Smart Sensors. London : Artech House, Inc. 1996.
- [2] รศ.ดร.สมเกียรติ สุกเดช. เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร:แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ พระจอมเกล้าลาดกระบัง. 2544.
- [3] R.F. Davis. Diamond films and Coatings . New Jersey : Noyes publications, 1993.
- [4] A.Lettington And J.W.Steeds. Thin Film Diamond. London:Chamman&Hall for The Royal Society, 1994
- [5] Lawrence S. Pan and Don R. Kania. Diamond:Electronic Properties And Application. USA:Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [6] William D.Cassidy, Philip W. Morrison, Jr. and John C. Angus. "Growth Rates And Quality Of Diamond Grown By Hot-Filament Assisted Chemical Vapor Deposition." J. Elect. Chem. Soc. Proc, vol. 95-4, pp. 85-94.
- [7] W.G. Pfann and P.N. Thurston. "Semiconducting Stress Transducers Utilizing the Transverse and Shear Piezoresistance Effects." J. Apply. Phys, vol 32, Oct 1996, pp. 2008-2019.
- [8] S.M. Sze. Semiconductor Sensor. USA : John Wiley & Sons, Inc. 1994.
- [9] Samuel K. Clark and Kensall D. Wise. "Pressure Sensitivity in Anisotropically Etched Thin-Diaphragm Pressure Sensors." IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-26, No.12, DEC 1979, pp. 1887-1896.
- [10] ธัญญะ ศักดิ์โสภณฐ์. "ทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดซิลิคอนแบบเปียโซรีซิสทีฟบนไดอะแฟรมบาง." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2534.
- [11] Samuan, K.D. Wise, and J.B. Angell. "An IC piezoresistive pressure sensor for biomedical instrumentation." IEEE Trans. Biomed. Eng, vol. BME-20, Mar 1973, pp. 101- 109.
- [12] Matthias Werner, Peter Gluche, Mario Adamschilk, Erhard Kolm and Hans-Jorg Fecht. "Review on Diamond Based Piezoresistive Sensors." IEEE, 1988, pp. 147-152.
- [13] Duane Tandeske. Pressure Sensors Selection And Application. New York:Marcel Dekker, Inc. 1991.
- [14] โรเบิร์ต เอฟ.คีอพลินและเฟรเดอริก เอฟ. คริสคอลล์. 2536. การใช้งานออปแอมป์และลิเนียร์ ไอซี. แปลโดยวิโรจน์ อัสวรางสี และคณะ. กรุงเทพฯ:บริษัท เอช.เอ็น. กรุ๊ป จำกัด.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [15] นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง. “การศึกษาคุณสมบัติลูมิเนสเซนซ์ของชั้นพอร์สซิลิคอน.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544. หน้า 61-67.
- [16] Burr-Brown Corporation. 1998. High Accuracy Instrumentation Amplifier. [Online]. Available:<http://www.burr-brown.com>
- [17] ศรีเมฆ รัตนชัย. “เทคนิคการกักตักเดี่ยวซิลิคอน เพื่อเป็นตัวตรวจจับอัตราเร่ง.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2542.
- [18] T. Yano, D.A. Tryk, K. Hashimoto and A. Feyishima. “Electrochemical Behavior of Highly Conductive Boron-Doped Diamond electrodes for Oxygen Reduction in Alkaline Solution.” J. Elect. Chem. Soc., vol. 145, No. 6, June 1998.
- [19] Tata N. Rao, I. Yagi, T. Miwa, D.A. Tryk and A. Eujishima. “Electrochemical Oxidation of NADH at Highly Boron-Doped Diamond Electrodes.” Anal. Chem., vol. 71, No. 13, July 1999.
- [20] เอกราช รัตนอุดมพิสุทธิ์, สมศักดิ์ เขียวศรีวิกุลและสมเกียรติ สุขเดช. “การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรบน Si ด้วยวิธี CVD แบบลดความร้อนโดยใช้ C_2H_5OH . “การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า, ครั้งที่ 20 2540, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย หน้า 495-500.

ภาคผนวก

วิธีการคำนวณหาอัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอน (B:C) ที่ใช้ในการทดลอง

ต้องการหาอัตราส่วน B:C = 10000 ppm ในสารละลาย 50 cm³

เนื่องจาก	C ₂ H ₅ OH	1 cm ³	หนัก	0.796	กรัม
	C ₂ H ₅ OH	50 cm ³	หนัก	0.796x50 = 39.8	กรัม

โมเลกุลของ C₂H₅OH = 2(12.01115) + 6(1.00797) + 1(15.9994) = 46.0695 กรัม/โมล

ดังนั้น C₂H₅OH 1 โมล จะมี C = 2 (12.01115) = 24.023 กรัม

เพราะฉะนั้น C₂H₅OH 50 cm³ มีปริมาณ $\frac{39.80}{46.0695 \text{ g/mole}} = 0.8639$ โมล

ดังนั้น C₂H₅OH 0.8639 โมล มี C = 0.8639 x 24.023 = 20.7535 กรัม

โมเลกุลของ B₂O₃ = 2(10.811) + 3(15.9994) = 69.6202 กรัม

โดย B₂O₃ 1 โมล จะมี B = 2(10.811) = 21.622 กรัม

ดังนั้น B:C = 10000 ppm = $\frac{10000}{1 \times 10^6}$

คือ C 10⁶ กรัม จะมี B อยู่ 10000 กรัม

ถ้า C 20.7535 กรัมจะมี B เท่ากับ 2.07535 x 10⁻¹ กรัม

เพราะฉะนั้น B 21.622 กรัม จะมีอยู่ใน B₂O₃ 1 โมล

ดังนั้น B 2.07535 x 10⁻¹ กรัม จะมีอยู่ใน B₂O₃ เท่ากับ 9.5983 x 10⁻³ โมล

เพราะฉะนั้นจะต้องใช้ B₂O₃ น้ำหนักเท่ากับ (9.5983 x 10⁻³)(69.6202) = 6.6824 x 10⁻¹ กรัม

มวลอะตอม : C = 12.01115 B = 10.811

O = 15.9994 H = 1.00797

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายเอกราช รัตนอุดมพิสุทธิ์
วันเดือนปีเกิด	1 พฤศจิกายน 2516
ภูมิลำเนา	กรุงเทพฯ
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี	ครุศาสตร์อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต (สาขาอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์)
สถานที่สำเร็จการศึกษา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีที่สำเร็จการศึกษา	ปีการศึกษา 2539
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์	

1. “การสังเคราะห์ฟิล์มเพชบน Si ด้วยวิธี CVD แบบลดความร้อนโดยใช้ C_2H_5OH ” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 20 พ.ศ. 2540, ณ มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์
2. “การศึกษาการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรระนาบ (100) โดยวิธี CVD แบบลดความร้อน.” การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 1 พ.ศ. 2543, ณ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
3. “อุปกรณ์ตรวจวัดแสงอัลตราไวโอเล็ตด้วยฟิล์มเพชร.” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 23 พ.ศ. 2543, ณ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
4. “UV Photodetector from Schottky Diode Diamond Film” Diamond 2001(Elsevier Science), 12th European Conference on Diamond, Diamond-Like Materials, Carbon Nanotubes, Nitrides & Silicon Carbide, 2-7 September 2001, Budapest, Hungary.