

การพัฒนาขั้วไฟฟ้าเพชรสำหรับการวัดความเข้มข้นของออกซิเจน
ในสารละลาย

DEVELOPMENT OF DIAMOND ELECTRODES FOR DISSOLVED OXYGEN
MEASUREMENT



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดุษฎีบัณฑิตกึ่งปริญญาโทการรวมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

ศษ.วิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-043-026

การพัฒนาขั้วไฟฟ้าเพชรสำหรับการวัดความเข้มข้นของออกซิเจน
ในสารละลาย

DEVELOPMENT OF DIAMOND ELECTRODES FOR DISSOLVED OXYGEN
MEASUREMENT



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2016-EN-M-043-096

DEVELOPMENT OF DIAMOND ELECTRODES FOR DISSOLVED OXYGEN
MEASUREMENT



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MICROELECTRONICS ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2016

KMITL-2016-EN-M-043-096

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การพัฒนาขั้วไฟฟ้าเพชรสำหรับการวัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลาย
Thesis Title Development of Diamond Electrodes for Dissolved Oxygen Measurement
นักศึกษา นายทศนัศวี มงคลเกียรติชัย
รหัสประจำตัว 54612410
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.สมศักดิ์ เข็ยร์ศิริกุล
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-043-096

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วิสุทธิ	ฐิติรุ่งเรือง	
รศ.ดร.เต็มพงษ์	เพชรกุล	
ดร.อัมพร	โพธิ์ไย	
ผศ.ดร.โยธิน	วงศ์ประเสริฐ	
รศ.สมศักดิ์	เข็ยร์ศิริกุล	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ. 2559 เวลา 09.00-11.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาชีวไฟฟ้าเพชรสำหรับการวัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลาย
นักศึกษา	นายทศนัศว์ มงคลเกียรติชัย
รหัสประจำตัว	54612410
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ. สมศักดิ์ เขียวศิริกุล

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพัฒนาชีวไฟฟ้าเพชรชนิดไมโครคริสตัลไลน์เจือโบรอนและชีวไฟฟ้าเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์เจือไนโตรเจน โดยใช้เทคนิค HFCVD และ MPCVD ตามลำดับ สำหรับใช้เป็นเซ็นเซอร์วัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายแบบแอมเปโรเมตริก ศึกษาคุณภาพฟิล์มเพชรด้วย SEM, Raman Spectroscopy และ XRD ทำการวัดสภาพต้านทานและความหนาแน่นของประจุพาหะด้วยเทคนิคโพรวายท์โพรบและปรากฏการณ์ฮอลล์ตามลำดับ และศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี จากนั้นทำการวัดความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำเพื่อหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า จากการทดลองพบว่าชีวไฟฟ้าเพชรชนิดไมโครคริสตัลไลน์แบบแถวที่มีระยะห่างของแต่ละขั้ว 100 μm มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากกว่าชีวไฟฟ้าเพชรชนิดไมโครคริสตัลไลน์แบบแถวที่มีระยะห่างของแต่ละขั้ว 40 μm และแบบพลาแนร์ และที่ความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำ 20 mg/L พบว่าชีวไฟฟ้าเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์แบบพลาแนร์มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากกว่าชีวไฟฟ้าเพชรชนิดไมโครคริสตัลไลน์แบบแถวที่มีระยะห่างของแต่ละขั้ว 100 μm ประมาณ 10 เท่า จากนั้นทำการบรรจุชีวไฟฟ้าเพชรเป็นหัววัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายแบบแอมเปโรเมตริกและเชื่อมต่อกับวงจรประมวลผลเพื่อประยุกต์ใช้งานในการวัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลาย พบว่าสามารถวัดค่าความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายที่ค่า 0 - 20 mg/L ได้ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 6% เทียบกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Development of Diamond Electrodes for Dissolved Oxygen Measurement
Student	Mr. Tosnus Mongkolkiartichai
Student ID.	54612410
Degree	Master of Engineering
Program	Microelectronics Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Somsak Cheirsirikul

ABSTRACT

This research studied and development of boron-doped microcrystalline diamond electrode and nitrogen-doped ultrananocrystalline diamond electrode with HFCVD and MPCVD respectively which are used as amperometric dissolved oxygen sensor. The diamond films quality were studied by SEM, Raman spectroscopy and XRD. Resistivity and carrier concentration were measured by Four point probe and Hall effect techniques respectively, and studied electrochemical characteristic by cyclic voltammetry. Dissolved oxygen were measured for current density measurement, and the result show current density of the boron-doped diamond microelectrodes array with 100 μm spacing was greater than current density of the boron-doped diamond microelectrodes array with 40 μm spacing and the boron-doped diamond planar electrode. At 20 mg/L dissolved oxygen, current density of the nitrogen-doped ultrananocrystalline diamond planar electrode was greater than current density of the boron-doped diamond microelectrodes array with 100 μm spacing about 10 times. Then, electrodes developed to amperometric dissolved oxygen probe, and connected with processing circuit to measure dissolved oxygen. It can measured 0 - 20 mg/L dissolved oxygen and tolerance less than 6% compared with standard dissolved oxygen meter.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รศ. สมศักดิ์ เขียวศิริกุล สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาที่คอยให้ความรู้ ประสบการณ์ต่างๆ ทั้งในงานวิจัยและนอกเหนืองานวิจัย จนข้าพเจ้ามีความรู้ความสามารถในด้านต่างๆ คอยให้คำปรึกษาในงานวิจัย ช่วยเหลือและช่วยแก้ปัญหา จนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงลงได้ และให้คำแนะนำจนจบการศึกษา

ขอขอบคุณ ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (Thai Microelectronics Center; TMEC) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการตัดแผ่นซิลิคอนและให้วัสดุสำหรับสร้างชิ้นงานที่เป็นส่วนสำคัญของวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณ ดร. ราชศักดิ์ ศักดานุภาพ วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือสำหรับสร้างชิ้นงานที่เป็นส่วนสำคัญของวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณ ดร. นวพันธ์ ชัยนิกิจ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ชิ้นงานที่เป็นส่วนสำคัญของวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่สละเวลาและให้ข้อเสนอแนะในการแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณบิดาของข้าพเจ้า นาย กมล มงคลเกียรติชัย และมารดาของข้าพเจ้า นาง รัชจวน มงคลเกียรติชัย ที่คอยเลี้ยงดูข้าพเจ้าจนเติบโตใหญ่และส่งเสริมข้าพเจ้าให้มีโอกาสสำเร็จเรียนวิชาต่างๆ ตลอดทั้งคอยหาเลี้ยงดูข้าพเจ้า สนับสนุนด้านอุปกรณ์ และค่าใช้จ่ายต่างๆ จนข้าพเจ้าสามารถเรียบเรียงวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงลงได้

ขอขอบคุณกัลยาณมิตรที่มีพระคุณต่อข้าพเจ้าทุกท่าน

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดาซึ่งเป็นที่ยรักและเคารพยิ่ง ครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า ตลอดจนผู้มีพระคุณต่อข้าพเจ้าทุกท่าน

ทศน์ศวี มงคลเกียรติชัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VIII
สารบัญตาราง.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.5 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย.....	3
1.6 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	4
1.7 ข้อจำกัดของการศึกษา.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....	5
2.1 ผลึกของคาร์บอน (Carbon Crystalline).....	5
2.2 พันธะของเพชรและกราฟไฟท์.....	6
2.3 หลักการและการพิจารณาฟิล์มเพชร.....	7
2.3.1 ลักษณะโครงสร้างผลึกเพชร.....	7
2.3.2 กลไกทางเคมีในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร.....	9
2.3.3 การนิวเคลียเอชัน.....	10
2.3.4 สภาพแวดล้อมแก๊สในการปลูกฟิล์มเพชร.....	13
2.3.5 ผลึกเพชรชนิดพี.....	15
2.4 กระบวนการ CVD แบบลดความร้อน.....	16
2.5 กระบวนการ CVD แบบพลาสมาความถี่สูง.....	17
2.6 แก๊สในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร.....	18
2.6.1 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดไมโครคริสตัลไลน์.....	18
2.6.2 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์.....	19
2.7 ฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์.....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.1	การเกิดฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์บนพื้นผิวเพชรขนาด 100	21
2.7.1.1	พื้นผิวเพชรที่มีอะตอมไฮโดรเจน	21
2.7.1.2	พื้นผิวเพชรที่ไม่มีอะตอมไฮโดรเจน	23
2.7.2	การเกิดฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์บนพื้นผิวเพชรขนาด 110	24
2.8	ฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์เจือไนโตรเจน	25
2.9	ระดับพลังงานอิเล็กทรอนิกส์ของฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์ เจือไนโตรเจน	26
2.10	ไซคลิกโวลแทมเมตรี	28
2.11	แอมเปอร์โรเมทรี	29
2.12	หลักการตรวจวัดออกซิเจนในสารละลายแบบแอมเปอร์โรเมตริก	32
2.13	โพเทนชิโอสแตท (Potentiostat)	33
2.13.1	หลักการควบคุมศักย์ไฟฟ้าของวงจรโพเทนชิโอสแตทให้คงที่	33
2.13.2	หลักการทำงานของวงจรโพเทนชิโอสแตท	34
บทที่ 3	การออกแบบและการสร้าง	37
3.1	เทคโนโลยีการสร้าง	37
3.1.1	กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation)	37
3.1.1.1	การออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation)	38
3.1.1.2	การออกซิเดชันแบบชื้น (Wet Oxidation)	39
3.1.2	กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography)	41
3.1.3	การสร้างซิลิคอนไนไตรด์	43
3.1.4	การเตรียมแผ่นฐานรอง	44
3.1.5	การสังเคราะห์ฟิล์มเพชร	45
3.2	การสร้างขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชร	48
3.2.1	การสร้างขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชรชนิดไมโครคริสตัลไลน์เจือโบรอน	48
3.2.1.1	การเตรียมแผ่นซิลิคอนเริ่มต้น	48
3.2.1.2	การสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์	49
3.2.1.3	กระบวนการสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์	49
3.2.1.4	การขัดผิวด้านหน้า	50
3.2.1.5	กระบวนการสร้างซิลิคอนไนไตรด์	50
3.2.1.6	กระบวนการสร้างลวดลายด้านหน้า	51
3.2.1.7	การสร้างมาส์กซิลิคอนไดออกไซด์	52
3.2.1.8	การสร้างขั้วไฟฟ้าทำงานชนิดไมโครคริสตัลไลน์เจือโบรอน	52

3.2.1.9 การสร้างขั้วไฟฟ้าโลหะ	53
3.2.1.10 การสร้างขั้วไฟฟ้าอ้างอิง.....	54
3.2.2 การสร้างขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์เจือไนโตรเจน	54
3.2.2.1 การเตรียมแผ่นซิลิคอนเริ่มต้น	54
3.2.2.2 การสร้างชั้นโลหะ.....	55
3.2.2.3 การเตรียมผิวหน้า	55
3.2.2.4 การสร้างขั้วไฟฟ้าทำงานชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์เจือไนโตรเจน	56
3.2.2.5 การสร้างขั้วไฟฟ้าช่วยและขั้วไฟฟ้าอ้างอิง	56
3.3 การเก็บบรรจุหัววัดออกซิเจนแบบแอมเปอร์โรเมตริก.....	56
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง.....	58
4.1 การศึกษาฟิล์มเพชร	58
4.1.1 การเตรียมฐานรองซิลิคอนด้วยการขัดผิวหน้า	58
4.1.2 การเตรียมฐานรองซิลิคอนด้วยการอัลตราโซนิก	58
4.1.3 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดไมโครคริสตัลไลน์ด้วย HFCVD	59
4.1.4 การทดลองสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์ด้วย MPCVD	59
4.1.5 การศึกษาพื้นผิวฟิล์มเพชรด้วย SEM	60
4.1.6 ผลของเวลาในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร	61
4.1.7 การวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	62
4.1.8 การวิเคราะห์คุณภาพฟิล์มเพชรด้วย Raman Spectroscopy	63
4.1.9 การหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าฟิล์มเพชรชนิด P	66
4.1.10 การหาค่าความหนาแน่นของพาหะฟิล์มเพชรชนิด P.....	67
4.2 ผลการศึกษาการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรตามพื้นที่ที่กำหนด	68
4.3 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าเคมี	69
4.4 การศึกษาสัญญาณทางไฟฟ้าเคมีของขั้วไฟฟ้าเพชรในสารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	70
4.5 การวัดค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเคมีของขั้วไฟฟ้าเพชร	71
4.6 การประยุกต์ใช้งานหัววัด.....	74
4.6.1 การสร้างหัววัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลาย	75
4.6.1.1 เซ็นเซอร์วัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลาย	76
4.6.1.2 เทอร์มิสเตอร์สำหรับวัดค่าอุณหภูมิ	77
4.6.1.3 วงจรหัววัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลาย.....	77
4.6.1.3.1 วงจรคัลยไฟฟ้าอ้างอิง	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่ให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางมหาวิทยาลัยฯ หากฝ่าฝืนโดยไม่ได้รับอนุญาตทางมหาวิทยาลัยฯ จะดำเนินการฟ้องดำเนินคดีตามกฎหมายที่เกี่ยวข้องต่อไป

4.6.1.3.3 วงจร Instrumentation Amplifier	80
4.6.1.3.4 วงจร Analog to Digital Converter (ADC).....	81
4.6.1.4 หัววัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลาย.....	82
4.6.2 การสร้างวงจรประมวลผล.....	83
4.7 โปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง	85
4.8 การทดสอบเครื่องวัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลาย	88
4.8.1 การวัดปริมาณออกซิเจนค่าต่างๆ ที่ละลายในน้ำ	88
4.8.2 การวัดปริมาณออกซิเจนในน้ำอิมิตัวด้วยอากาศที่อุณหภูมิค่าต่างๆ.....	88
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	91
เอกสารอ้างอิง	93
ภาคผนวก.....	96
ภาคผนวก ก ออกซิเจน (Oxygen).....	97
ภาคผนวก ข ความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลาย (Dissolved Oxygen; DO)	100
ภาคผนวก ค คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเพชร	101
ภาคผนวก ง วงจรที่ใช้ในงานวิจัย	102
ภาคผนวก จ ตัวอย่าง Datasheet ของอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	105
ภาคผนวก ฉ ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	113
ประวัติผู้เขียน.....	114

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
2.1	เปรียบเทียบคุณลักษณะต่างๆ ของฟิล์มเพชร.....	20
4.1	ช่วงศักย์ไฟฟ้าทำงานของอิเล็กโทรไลต์ต่างๆ จากไซคลิกโวลแทมโมแกรม โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเพชรเจือโบรอนเทียบกับขั้วไฟฟ้า Ag/AgCl.....	71
4.2	เปรียบเทียบผลการวัดค่าความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลาย ของเครื่องต้นแบบกับเครื่องวัดยี่ห้อ Exttech	88
4.3	เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงปริมาณออกซิเจนในน้ำอิมิตัวด้วยอากาศจากค่ามาตรฐานกับ เครื่องต้นแบบที่อุณหภูมิค่าต่างๆ.....	89
ก.1	คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติอะตอมของออกซิเจน.....	98
ค.1	เปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ	101



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างอัญรูปของคาร์บอน (a) Diamond, (b) Graphite, (c) lonsdaleite , (d, e, f) Buckyballs (C60, C540, C70), (g) Amorphous Carbon และ (h) Carbon Nanotube ...	5
2.2 ลักษณะโครงสร้างและพันธะของเพชรและกราไฟท์.....	7
2.3 ตำแหน่งอะตอมใน Cubic Cell	8
2.4 โครงสร้างของเพชร	8
2.5 ไดอะแกรมของอนุภาคเพชรแบบต่างๆ (a) Cubo-Octahedron (b) Twined Cubo-Octahedron (c) Decahedral Wulff-Polyhedron และ (d) Icosahedro	9
2.6 กระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรแบบ CVD.....	10
2.7 ขั้นตอนการนิวเคลียสไอซัน.....	13
2.8 จำลองการก่อตัวของฟิล์มเพชรที่มีลักษณะเป็นแบบโพลีคริสตัลไลน์	13
2.9 แบบจำลองการเกิดของผลึกคาร์บอนจากปฏิกิริยาของแก๊สในกระบวนการ CVD.....	14
2.10 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วย CVD ลวดความร้อน.....	17
2.11 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วย CVD พลาสมาความถี่สูง	18
2.12 ด้านข้างของโครงสร้างพื้นผิวเพชร (a) ระนาบ 110 ที่มีอะตอมไฮโดรเจน (b) ระนาบ 110 (c) ระนาบ 100 ที่มีอะตอมไฮโดรเจน (d) ระนาบ 100.....	22
2.13 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดเมอร์กับพื้นผิวเพชร (a) C ₁₈ H ₂₂ ระนาบ 110 ที่มีอะตอมไฮโดรเจน (b) C ₉ H ₁₄ ระนาบ 100 ที่มีอะตอมไฮโดรเจน.....	22
2.14 โครงสร้างของคาร์บอนไดเมอร์ที่ทำปฏิกิริยากับ C ₉ H ₁₄ (a) โครงสร้าง Carbene-Like (b) โครงสร้าง Cyclobutene-Like (c) โครงสร้างในระหว่างเกิดปฏิกิริยาของ Vinylidene	23
2.15 โครงสร้างของคาร์บอนไดเมอร์ที่ทำปฏิกิริยากับ C ₉ H ₁₂ (a) โครงสร้าง Carbene-Like (b) โครงสร้าง Cyclobutene-Like	24
2.16 ลำดับการเกิดผลึกเพชรบนพื้นผิวเพชรระนาบ 110 ด้วยคาร์บอนไดเมอร์.....	25
2.17 โครงสร้างของ CN ที่ทำปฏิกิริยากับ C ₉ H ₁₂	26
2.18 โครงสร้างจำลองของอะตอมไนโตรเจนที่เข้าไปอยู่บริเวณขอบเขตผลึก	27
2.19 แถบพลังงานบริเวณขอบเขตผลึกของฟิล์มเพชร (a) ไม่มีอะตอมไนโตรเจน (b) มีหนึ่งอะตอมไนโตรเจน (c) มีสิบหกอะตอมไนโตรเจน	28
2.20 การควบคุมศักย์ไฟฟ้าของไซคลิกโวลแทมเมตรี	28
2.21 ไซคลิกโวลแทมโมแกรม	29
2.22 โมเดลการเกิดกระแสไฟฟ้าจำกัดของออกซิเจนในสารละลายแบบแอมเปโรเมตริก.....	30
2.23 การเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่ขั้วไฟฟ้าทำงานและขั้วไฟฟ้าช่วย	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.24	วงจรรพเทนซีไอเอสแตท.....	33
2.25	วงจรรพเทนซีไอเอสแตทที่เซลล์ไฟฟ้าเคมีถูกแทนด้วยค่าอิมพีแดนซ์.....	34
3.1	เตา Furnace ที่ใช้ในการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์.....	37
3.2	ชั้นออกไซด์ที่ผิวหน้าของแผ่นฐานรอง.....	38
3.3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา อุณหภูมิ และความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ สำหรับออกซิเดชันแบบแห้ง.....	38
3.4	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำออกซิเดชันแบบชื้น.....	39
3.5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา อุณหภูมิ และความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ สำหรับออกซิเดชันแบบชื้น.....	39
3.6	ตารางเทียบสีของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนาต่างๆ กัน.....	40
3.7	การเคลือบน้ำยาไวแสงลงบนแผ่นเวเฟอร์.....	41
3.8	การเคลือบผิวหน้าด้วยน้ำยาไวแสง (Photoresist).....	41
3.9	ส่วนที่ถูกแสงและส่วนไม่ถูกแสงอัลตราไวโอเล็ต.....	42
3.10	ลวดลายเครื่องหมายปรับข้อ.....	43
3.11	เครื่อง PECVD ที่ใช้ในการสร้าง.....	44
3.12	พันธะของซิลิคอนไนไตรด์.....	44
3.13	ระนาบของเพชร.....	45
3.14	แผนภาพไดอะแกรมของระบบเครื่องสังเคราะห์ฟิล์มเพชรแบบลวดความร้อน (a) ภาพด้านบน (b) ภาพตัดขวางด้านหน้า.....	46
3.15	เครื่องสังเคราะห์ฟิล์มเพชรแบบ HFCD.....	47
3.16	ไดอะแกรมสามเหลี่ยม C-H-O Bachmann.....	47
3.17	ลักษณะของขั้วไฟฟ้าเพชรชนิดไมโครคริสตัลไลน์เจือโบรอน.....	48
3.18	จำลองแผ่นซิลิคอนที่สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ 2000 Å.....	49
3.19	จำลองแผ่นซิลิคอนที่ถูกกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บริเวณผิวหน้า.....	50
3.20	จำลองแผ่นซิลิคอนที่ถูกสร้างชั้นซิลิคอนไนไตรด์.....	51
3.21	จำลองแผ่นซิลิคอนที่ถูกสร้างชั้นซิลิคอนไนไตรด์ที่ขึ้นลวดลาย.....	52
3.22	จำลองแผ่นซิลิคอนที่ถูกสร้างมาส์กซิลิคอนไดออกไซด์.....	52
3.23	จำลองแผ่นซิลิคอนที่ถูกสร้างขั้วไฟฟ้าเพชรเจือโบรอน.....	53
3.24	จำลองแผ่นซิลิคอนที่ถูกสร้างขั้วไฟฟ้าโลหะ.....	54
3.25	จำลองแผ่นซิลิคอนที่ถูกสร้างขั้วไฟฟ้าอ้างอิง.....	54
3.26	จำลองแผ่นซิลิคอนที่ถูกสร้างชั้นโลหะ.....	55
3.27	จำลองฐานรองที่ถูกเตรียมผิวหน้าด้วยการอัลตราโซนิกในสารละลายที่มีผงเพชร.....	55
3.28	จำลองฐานรองที่ถูกสร้างขั้วไฟฟ้าเพชรชนิดอัลตราฟ้านาโนคริสตัลไลน์เจือไนโตรเจน.....	56

3.29	ตัวเก็บประจุหัววัดออกซิเจนแบบแอมเปอร์เมตริก.....	57
4.1	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่าของผิวหน้าแผ่นซิลิคอนที่ขัดด้วย ครีมเพชรขนาด 0.25 μm	58
4.2	ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรจากภาพถ่าย SEM ของระนาบ 111	60
4.3	ภาพถ่ายความหนาฟิล์มเพชรชนิดไมโครคริสตัลไลน์ด้วย SEM	61
4.4	ผลการทดลองการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดไมโครคริสตัลไลน์ด้วย XRD	62
4.5	เปรียบเทียบผลการทดลองการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วย XRD	63
4.6	เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดไมโครคริสตัลไลน์ด้วยรามานสเปกโตรสโคปี เมื่อใช้แก๊ส $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ที่ปริมาณ (a) 2% (b) 1.5% (c) 1%	64
4.7	ผลการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดอัตรานาโนคริสตัลไลน์ด้วยรามานสเปกโตรสโคปี	65
4.8	เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์รามานสเปกโตรสโคปีของฟิล์มเพชรทั้งสองชนิด	65
4.9	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอัตราส่วน B/C	66
4.10	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของโซลกับอัตราส่วน B/C	67
4.11	จำลองผลของความหนาชั้น SiO_2 ที่มีผลต่อพื้นที่สวดลายของฟิล์มเพชร (a) กรณี SiO_2 บาง (b) กรณี SiO_2 หนา.....	68
4.12	ฟิล์มเพชรที่มีจุดบกพร่อง.....	69
4.13	ไซคลิกโวลแทมโมแกรมโดยใช้ขั้วไฟฟ้าเพชรเจือโบรอน B/C 100, 1000 และ 10000 ppm เทียบกับขั้วไฟฟ้า Ag/AgCl.....	70
4.14	แบบขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชร D1, D2 และ D3	71
4.15	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากหัววัดขั้วไฟฟ้า ฟิล์มเพชรชนิดไมโครคริสตัลไลน์เจือโบรอนต่อความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำ.....	72
4.16	เปรียบเทียบความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชรชนิดไมโครคริสตัลไลน์ เจือโบรอน (D3) กับขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชรชนิดอัตรานาโนคริสตัลไลน์แบบพลาแนร์.....	73
4.17	เปรียบเทียบความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชร ทั้งสองชนิดกับขั้วไฟฟ้าทอง	74
4.18	ส่วนประกอบของหัววัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายและวงจรประมวลผล	75
4.19	ส่วนประกอบของหัววัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลาย	75
4.20	โครงสร้างของเซ็นเซอร์วัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลาย.....	76
4.21	เทอร์มิสเตอร์เบอร์ NXFT15XV103FA2B150.....	77
4.22	ส่วนประกอบของวงจรหัววัด.....	78
4.23	PCB วงจรหัววัด (a) ด้านบน (b) ด้านหลัง.....	78
4.24	วงจรคิกไฟฟ้ายั้งในวงจรหัววัด.....	79
4.25	วงจรโพเทนชิโอสแตทที่ใช้ในวงจรหัววัด.....	80

4.26	วงจรที่อยู่ภายใน IC LMP91000	80
4.27	วงจร Instrumentation Amplifier และวงจร Wheatstone Bridge ที่ใช้ในวงจรหัววัด....	81
4.28	วงจร Analog to Digital Converter ที่ใช้ในวงจรหัววัด.....	81
4.29	โครงสร้างของหัววัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลาย	82
4.30	หัววัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลาย	83
4.31	วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในวงจรประมวลผล	84
4.32	วงจร Voltage Regulator 3.3 V ที่ใช้ในวงจรประมวลผล	84
4.33	PCB วงจรประมวลผล	85
4.34	แผนภาพการทำงานของโปรแกรม	87
4.35	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศ ต่ออุณหภูมิที่ค่าต่างๆ.....	90
ก.1	คาร์ล วิลเฮล์ม เซเลอ ผู้ค้นพบออกซิเจน.....	97
ก.2	โครงสร้างอะตอมของออกซิเจน.....	98



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

เนื้อหาในส่วนนี้จะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมุติฐานของการศึกษา ขอบเขตงานวิจัย และขั้นตอนการศึกษาวิจัย

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ออกซิเจน (Oxygen) เป็นสิ่งจำเป็นต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตทุกชนิดทั้งบนบกและในน้ำ หากขาดออกซิเจนไป สิ่งมีชีวิตต่างๆ ก็ไม่สามารถจะมีชีวิตอยู่ได้ โดยเฉพาะปริมาณแก๊สออกซิเจนที่ละลายในน้ำซึ่งมีค่าต่ำกว่าในอากาศ จะมีผลอย่างมากต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำ รวมถึงคุณภาพของแหล่งน้ำนั้นๆ อีกด้วย สิ่งเหล่านี้มีผลโดยตรงต่อการเพาะพันธุ์สัตว์น้ำในเชิงธุรกิจ เช่น การเพาะเลี้ยงปลาหรือกุ้ง หากปริมาณแก๊สออกซิเจนที่ละลายในน้ำไม่เพียงพอ ก็จะส่งผลให้สัตว์น้ำมีการเจริญเติบโตที่ไม่ดีหรือไม่อาจดำรงชีวิตอยู่ได้ ส่งผลให้ผลผลิตที่ได้มีค่าลดลงทั้งในปริมาณและคุณภาพ ในด้านอุตสาหกรรมนั้นความเข้มข้นของออกซิเจน (Dissolved Oxygen; DO) ที่อยู่ในน้ำที่ใช้ในระบบหล่อเลี้ยงความเย็นโดยเฉพาะระบบที่ใช้ท่อเหล็ก จะส่งผลต่อการทำงานและความปลอดภัยเป็นอย่างมาก หากมีความเข้มข้นของออกซิเจนสูงจะทำให้ท่อเหล็กในระบบหล่อเย็นเกิดสนิม ส่งผลให้เกิดการอุดตันและเสียหายของระบบ ในอุตสาหกรรมบางประเภทที่ต้องทำการบำบัดน้ำเสียนั้นจำเป็นต้องตรวจวัดความเข้มข้นของออกซิเจนก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ ความสำคัญของออกซิเจนต่อมนุษย์นั้นเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่ามนุษย์ไม่สามารถขาดออกซิเจนได้ หากขาดออกซิเจนไปในเวลาไม่กี่นาที อาจทำให้เกิดผลกระทบต่อการทำงานของระบบประสาทหรืออาจถึงขั้นเสียชีวิตได้ ในทางการแพทย์ผู้ป่วยอาการหนักบางรายจำเป็นต้องทำการวัดค่าออกซิเจนที่อยู่ในเลือด

จากที่กล่าวมาจะเห็นว่าการวัดความเข้มข้นของออกซิเจนนั้นมีความสำคัญ โดยเฉพาะออกซิเจนในสารละลายตัวอย่างมีประโยชน์มากในการควบคุมคุณภาพแหล่งน้ำต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นเพื่อสิ่งแวดล้อม อุตสาหกรรม หรือการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในเชิงธุรกิจ

ในปัจจุบันการวัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายนั้นมีหลายวิธี และมีการพัฒนาเป็นเครื่องวัดแบบต่างๆ เช่น แบบใช้แสงในการวัด และแบบที่ใช้ปฏิกิริยาเคมีในการวัด โดยแต่ละแบบก็จะมีข้อดีต่างกัน แบบใช้แสงในการวัดนั้นจะมีความสะดวกในการวัดมากกว่าและรวดเร็วกว่าแต่มีความแม่นยำน้อยกว่าแบบที่ใช้ปฏิกิริยาเคมี โดยส่วนใหญ่จะนิยมแบบที่ใช้ปฏิกิริยาเคมีมากกว่า เนื่องจากมีความแม่นยำกว่ามากและหาซื้อได้ง่ายกว่า เครื่องมือวัดชนิดนี้จะประกอบไปด้วยตัวเครื่องและหัววัด (Probe) โดยใช้หลักการทางไฟฟ้าเคมีซึ่งมีขั้วไฟฟ้าเคมีที่ทำจากแร่แพลทินัม (Pt) หรือทอง (Au) บรรจุอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) โดยอาศัยปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox) เพื่อทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เกิดกระแสไฟฟ้า ดังนั้น ข้อเสียของหัววัดชนิดนี้คือ จำเป็นต้องมีการบำรุงรักษาหัววัดเป็นระยะ เช่น การเปลี่ยนเยื่อเลือกผ่าน (Membrane) การเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ อีกทั้งวัสดุที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้านั้นคือแร่แพลทินัมหรือทองซึ่งมีราคาสูงและยังเป็นแร่ที่หาได้ยาก ดังนั้นหากสามารถหาวัสดุอื่นที่นำมาใช้แทนทองหรือแพลทินัมและวัสดุนั้นสามารถที่จะสังเคราะห์ขึ้นมาได้ก็จะทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการสร้างหัววัดได้

ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาหาวัสดุที่จะนำไปใช้ในการสร้างขั้วไฟฟ้าเคมี พบว่าปัจจุบันเทคโนโลยีการสังเคราะห์เพชรสามารถที่จะสร้างฟิล์มเพชรได้ และเพชรยังเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีได้ดี ซึ่งปัจจุบันได้มีการนำเพชรมาสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าเคมีและเซ็นเซอร์ต่างๆ เช่น ขั้วไฟฟ้าเคมีในการบำบัดน้ำเสียด้วยไฟฟ้า เซ็นเซอร์ทางแสง และไบโอเซ็นเซอร์ เป็นต้น

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะศึกษาขั้นตอนวิธีการการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์เจือไนโตรเจน (Nitrogen-Doped UNCD Films) และฟิล์มเพชรชนิดไมโครคริสตัลไลน์เจือโบรอน (Boron-Doped MCD Films) เพื่อทำการประยุกต์ใช้งานสำหรับใช้เป็นหัววัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลาย โดยแยกย่อยได้ดังนี้

1. ทำการศึกษา และทำการทดลองสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดต่างๆ เพื่อหาเงื่อนไขในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรที่เหมาะสม
2. ศึกษา ออกแบบ และสร้างขั้วไฟฟ้าเคมีจากฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์เจือไนโตรเจนและขั้วไฟฟ้าเคมีจากฟิล์มเพชรชนิดไมโครคริสตัลไลน์เจือโบรอน พร้อมทั้งทำการศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าและพื้นผิวของฟิล์มเพชร
3. ศึกษา ออกแบบ และสร้างวงจรหัววัดสำหรับอ่านค่าจากเซ็นเซอร์วัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายที่สร้างขึ้น พร้อมทั้งรวมแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) ของวงจรหัววัดเข้ากับเซ็นเซอร์เพื่อสร้างเป็นหัววัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลาย
4. ศึกษา ออกแบบ และสร้างวงจรประมวลผลเพื่อเชื่อมต่อกับหัววัดสำหรับทำการทดลองอ่านค่าความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลาย และการประยุกต์ใช้งานด้านอื่นๆ
5. ทำการทดลองวัดค่าความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายเปรียบเทียบกับหัววัดที่ทำจากแร่ทอง เพื่อตรวจสอบสนองของเซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นและการชดเชยผลของอุณหภูมิที่มีต่อเยื่อเลือกผ่าน

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

วิธีการทางไฟฟ้าเคมีนั้นเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับและใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น ใช้ตรวจวัดหาปริมาณสารที่สนใจ ใช้ในการแยกสารละลายในน้ำ ซึ่งในทางปฏิบัติจะต้องนำขั้วไฟฟ้าเคมีจุ่มในสารละลายที่ทำการทดลอง จึงทำให้ขั้วไฟฟ้าเคมีสัมผัสกับสารละลายและเสื่อมสภาพได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพชรเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง มีความทนทานต่ออุณหภูมิ และมีความทนทานต่อการกัดกร่อนทางเคมี ทำให้ฟิล์มเพชรมีความเหมาะสมในการนำไปสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าเคมี ซึ่งการนำไฟฟ้าของฟิล์มเพชรนั้นจะเกิดขึ้นที่บริเวณขอบเขตผลึก โดยฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์นั้นมีขนาดผลึกที่เล็ก จึงทำให้มีพื้นที่ขอบเขตผลึกมากกว่าและนำไฟฟ้าได้ดีกว่าฟิล์มเพชรชนิดนาโนคริสตัลไลน์ (NCD Films) และไมโครคริสตัลไลน์ ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรนั้นหากมีการเติมสารเจือจะส่งผลให้ค่าความนำไฟฟ้าของฟิล์มเพชรเพิ่มขึ้นและสามารถนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าเคมีได้ ซึ่งจะทำให้ได้ขั้วไฟฟ้าเคมีที่มีคุณสมบัติทางกายภาพของฟิล์มเพชร

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

ศึกษา ออกแบบ และสร้างเซ็นเซอร์วัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายจากฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์เจือไนโตรเจนและฟิล์มเพชรชนิดไมโครคริสตัลไลน์เจือโบรอน พร้อมทั้งออกแบบและสร้างวงจรที่ใช้ในการอ่านค่าจากเซ็นเซอร์ เพื่อพัฒนาเป็นหัววัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายและประยุกต์ใช้งานในการวัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลาย

1.5 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

ในการศึกษาวิจัยมีขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

1. ทำการศึกษาวิธีการทางไฟฟ้าเคมี ปฏิกริยาที่เกิดขึ้น และขั้วไฟฟ้าเคมีชนิดต่างๆ จากนั้นทำการศึกษาวัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายด้วยขั้วไฟฟ้าเคมี
2. ทำการศึกษาขั้นตอนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์เจือไนโตรเจนและฟิล์มเพชรชนิดไมโครคริสตัลไลน์เจือโบรอน จากนั้นทำการทดลองสังเคราะห์ฟิล์มเพชรขึ้นเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสม
3. ทำการศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชร เพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้าเคมีสำหรับเซ็นเซอร์วัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลาย
4. ทำการออกแบบและสร้างวงจรหัววัดสำหรับใช้ในการอ่านค่าจากเซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้น ทำการทดสอบวงจรกับเซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นและทำการบรรจุรวมเซ็นเซอร์กับวงจรหัววัดเข้าด้วยกันเพื่อสร้างหัววัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลาย
5. ทำการออกแบบและสร้างวงจรประมวลผลสำหรับใช้เชื่อมต่อกับหัววัดเพื่อส่งการและอ่านข้อมูลจากหัววัด และแสดงผลผ่านพอร์ตสื่อสาร
6. ทำการทดลองวัดความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำด้วยหัววัดที่สร้างขึ้นเปรียบเทียบกับหัววัดที่ทำจากแร่ทอง เพื่อดูผลตอบสนองทางไฟฟ้าและการชดเชยผลของอุณหภูมิที่มีต่อเยื่อเลือกผ่าน
7. สรุปผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ข้อตกลงเบื้องต้น

ในการศึกษาวิจัยนี้ ได้เน้นในส่วนของการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานเป็น เซ็นเซอร์วัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลาย ซึ่งในการที่จะนำไปใช้งานได้นั้นจำเป็นต้องมีส่วนประกอบต่างๆ ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชร สารละลายอิเล็กโทรไลต์ เยื่อเลือกผ่าน วัสดุสำหรับใช้บรรจุส่วนประกอบเพื่อสร้างหัววัด วงจรหัววัด วงจรประมวลผล และการเขียนโค้ดที่ใช้ในการควบคุมสั่งการ ซึ่งมีรายละเอียดที่จะต้องทำการศึกษามากพอสมควรเพื่อให้บรรลุเป้าหมายของการวิจัยซึ่งก็คือการประยุกต์ใช้งานขั้วไฟฟ้าที่ได้จากการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรสำหรับการวัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลาย

1.7 ข้อจำกัดของการศึกษา

ในการศึกษาทดลองสร้างเซ็นเซอร์วัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายนั้น จำเป็นต้องใช้ห้องปฏิบัติการทางไมโครอิเล็กทรอนิกส์และใช้เครื่องมือต่างๆ หลายชนิด และเนื่องจากอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาทดลองนั้นเกิดความเสียหายเสื่อมสภาพตามการใช้งานและกาลเวลา ทำให้ต้องขอความอนุเคราะห์จากหน่วยงานอื่นๆ ในการใช้เครื่องมือ ซึ่งเครื่องมือบางชนิดไม่สามารถหาใช้งานจากที่อื่นได้หรือมีอุปสรรคในการขอความอนุเคราะห์ในการใช้งาน จึงทำให้ไม่สามารถวัดคุณสมบัติบางประการของฟิล์มเพชรได้

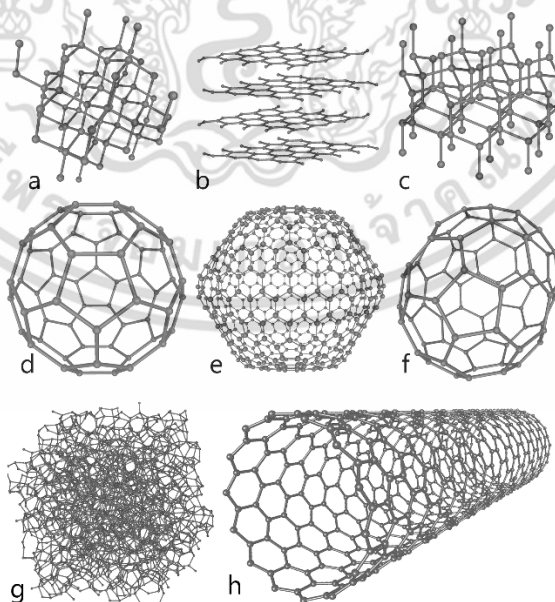
บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

เนื้อหาในส่วนนี้จะเป็นการนำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย เช่น ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับผลึก ลักษณะและคุณสมบัติทางไฟฟ้าบางประการของผลึกเพชร การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดต่างๆ หลักการวิเคราะห์ด้วยไฟฟ้าเคมี และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวงจรไฟฟ้าบางประการ เป็นต้น

2.1 ผลึกของคาร์บอน (Carbon Crystalline)

คาร์บอนคือธาตุชนิดหนึ่งที่มีอยู่มากบนโลกมีสัญลักษณ์เป็น C และมีเลขอะตอมเท่ากับ 6 ซึ่ง อัญรูปของคาร์บอนนั้นมีหลายอัญรูป ซึ่งแต่ละอัญรูปก็จะมีคุณสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกันไป เพชรจัดเป็นผลึกรูปเดี่ยวที่สมบูรณ์ของคาร์บอน เนื่องจากอะตอมคาร์บอนในเพชรจะเกาะเกี่ยวกัน ด้วยพันธะโควาเลนต์ (Covalent Bond) ในทุกๆ ด้าน ส่วนกราไฟท์ (Graphite) เป็นผลึกคาร์บอน เช่นเดียวกันแต่ไม่สมบูรณ์เท่าเพชร เนื่องจากอะตอมของคาร์บอนในกราไฟท์จะเกาะเกี่ยวกันด้วย พันธะโควาเลนต์เฉพาะในระนาบหนึ่งเท่านั้น โดยแต่ละระนาบของอะตอมคาร์บอนจะยึดกันด้วยแรง แวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Force) ซึ่งเป็นแรงอย่างอ่อน ส่งผลให้แต่ละระนาบของผลึก สามารถเลื่อนได้ง่าย กราไฟท์และเพชรมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันมาก เช่น



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างอัญรูปของคาร์บอน (a) Diamond, (b) Graphite, (c) Lonsdaleite , (d, e, f)

Buckyballs (C₆₀, C₅₄₀, C₇₀), (g) Amorphous Carbon และ (h) Carbon Nanotube

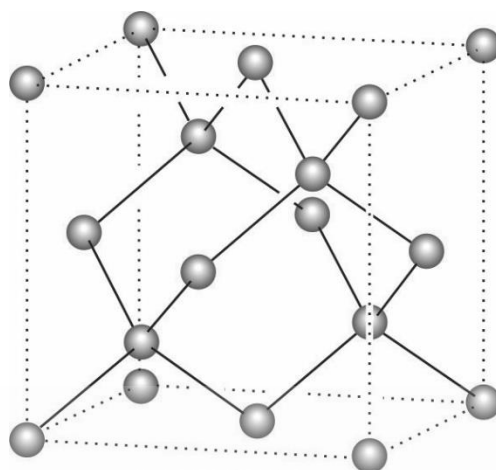
เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราไฟท์มีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี จึงถูกนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้า เป็นเข้าหาลอมวัสดุ และเป็นแท่งความร้อนไฟฟ้า เป็นต้น แต่เพชรมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำหรือฉนวนที่ดี สามารถนำความร้อนได้สูงกว่าเงินและทองแดง 5 เท่า และมีคุณสมบัติเด่นมากในเรื่องความแข็งทนทาน ในอุตสาหกรรมเพชรยังถูกจัดว่าเป็นวัสดุที่มีประโยชน์มากเพราะมีการนำไปใช้ประโยชน์มาก เช่น เป็นอุปกรณ์หัวตัด หัวเจาะ หัวเจียร เคลือบแข็ง ดอกสว่าน ใบมีด และใบเลื่อย เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นแผ่นระบายความร้อนให้แก่ไมโครชิพ และฟิล์มบางเพชรยังมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีคุณสมบัติพิเศษคือ ทนความร้อนสูง ทนต่อรังสีได้ดี และมีสภาพคล่องของพาหะ (Carrier Mobilities) สูง จึงถูกนำไปใช้สร้างเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำชนิดใหม่อย่างแพร่หลาย และคาดว่าจะเป็วัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีบทบาทสูงในอนาคต

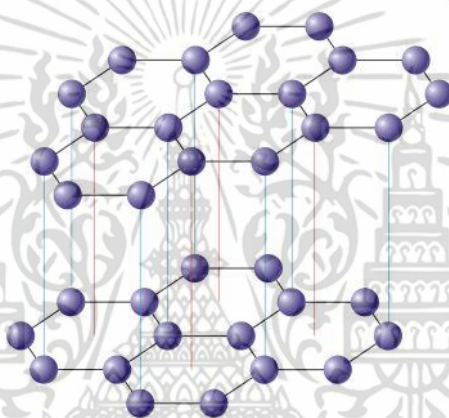
2.2 พันธะของเพชรและกราไฟท์

เพชรเป็นอัญรูปหนึ่งของคาร์บอน ซึ่งคาร์บอนมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนสี่ตัว ตามทฤษฎีออร์บิทัล (Orbital Theory) คาร์บอนมีระดับพลังงานย่อยหรือออร์บิทัลเป็น $1s^2 2s^2 2p_x^1 2p_y^1 2p_z^0$ จะเห็นได้ว่าคาร์บอนนั้นมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวสองตัว นั่นคือที่ออร์บิทัล $2p_x$ และ $2p_y$ ทำให้สามารถสร้างพันธะได้เพียงสองพันธะ ดังนั้นการที่คาร์บอนจะสร้างจำนวนพันธะที่มากกว่าสองพันธะนั้นจะต้องเกิดไฮบริดไดเซชัน (Hybridization) ของออร์บิทัล นั่นคือการที่ s ออร์บิทัลและ p ออร์บิทัลเกิดรวมกันทำให้เกิดออร์บิทัลใหม่ที่เรียกว่า sp ออร์บิทัล สำหรับคาร์บอนนั้น sp ออร์บิทัลที่เป็นไปได้คือ sp sp^2 sp^3 [1] ขึ้นอยู่กับไฮบริดไดเซชันของจำนวน p ออร์บิทัล สำหรับเพชรจะประกอบไปด้วยอะตอมของคาร์บอนที่ยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะ sp^3 (พันธะที่เกิดจากออร์บิทัล sp^3) สี่พันธะซึ่งเป็นพันธะซิกมา โดยแต่ละพันธะนั้นจะทำมุมกัน 109.5° และมีความยาวพันธะ 0.154 nm จึงทำให้เพชรมีโครงสร้างที่แข็งแรงมาก เพชรบริสุทธิ์นั้นมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าเนื่องจากไม่มีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวเหลืออยู่

กราไฟท์เป็นอัญรูปหนึ่งของคาร์บอนเช่นเดียวกับเพชร แต่พันธะของกราไฟท์จะเป็น sp^2 ซึ่งจะเป็พันธะซิกมาสามพันธะเกาะเกี่ยวระหว่างอะตอมของคาร์บอนในลักษณะเป็นระนาบจึงทำให้เหลืออิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวอยู่หนึ่งที่ p ออร์บิทัล ส่งผลให้กราไฟท์นำไฟฟ้าได้ในทิศทางเดียวกับระนาบของกราไฟท์เอง



(a) เพชร



(b) กราไฟท์

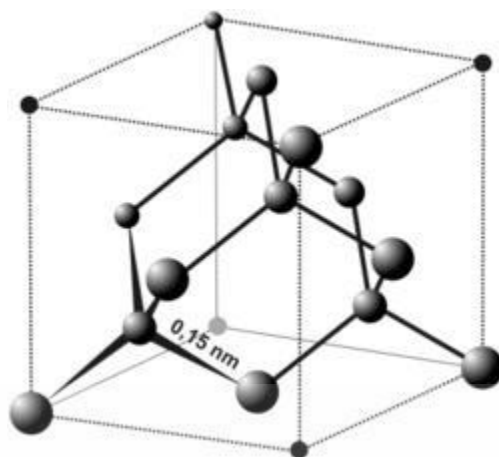
รูปที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างและพันธะของเพชรและกราไฟท์

2.3 หลักการและการพิจารณาฟิล์มเพชร

2.3.1 ลักษณะโครงสร้างผลึกเพชร

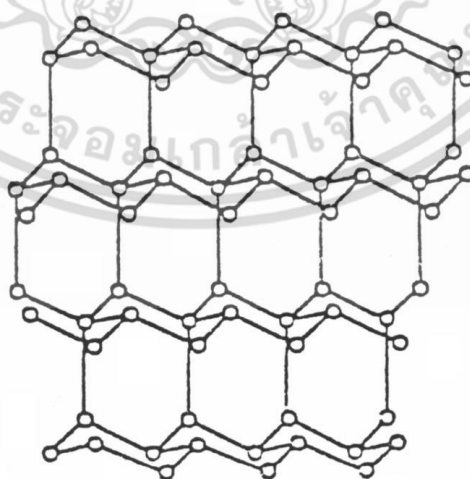
ลักษณะโครงสร้างของผลึกเพชรซึ่งมีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นแบบ Face-Centered Diamond Cubic ในหนึ่งเซลล์ (Unit Cell) ดังในรูปที่ 2.3 จะประกอบด้วย 8 อะตอมบริเวณมุมของเซลล์และ 6 อะตอมที่เหลื่ออยู่ที่ตำแหน่งหนึ่งในสี่ที่ว่างของลูกบาศก์ วัตตแยงจากอะตอมที่อยู่บริเวณมุมของเซลล์ อะตอมของคาร์บอนแต่ละอะตอมจะจับอะตอมของคาร์บอนได้อีก 4 อะตอมด้วยพันธะโควาเลนต์แบบ sp^3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ตำแหน่งอะตอมใน Cubic Cell

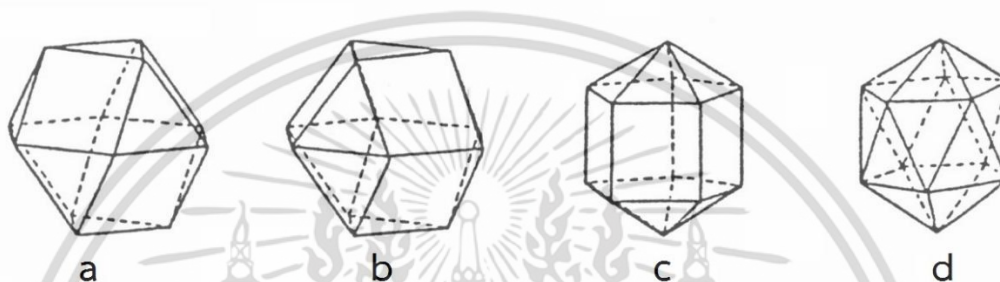
สำหรับพันธะการยึดเหนี่ยวของผลึก โครงสร้างผลึก (111) จะมีอะตอมของคาร์บอนจำนวน 6 อะตอมจับกันเป็นลักษณะวงแหวนโดยอะตอมแต่ละอะตอมของระนาบข้างเคียงวางในตำแหน่งสูงและต่ำสลับกัน เมื่อนำชั้นของทรงกลมซ้อนกันทำให้เห็นลักษณะเลททิซซ้อนเป็นชั้นๆ ของวงแหวนอะตอมคาร์บอนทั้งหมดที่ใช้พันธะร่วมกันดังรูปที่ 2.4 การฟอร์มของ Cubic ใช้พันธะร่วมกันของแต่ละชั้นนั้นจะเชื่อมต่อกันด้วย Staggered Bond ลักษณะการเรียงตัวจะเป็นแบบ ABCABCABC.....ซ้ำๆ กันโครงสร้างผลึกแบบนี้มีค่าคงที่ของผลึก 3.56 \AA และความยาวพันธะมีค่า 1.54 \AA ในการวิเคราะห์เพชรด้วย Raman Spectroscopy กรณีเพชรที่มีโครงสร้างเป็นผลึกจะมีตำแหน่งยอดสัญญาณเกิดขึ้นที่ 1332 cm^{-1} แต่กราฟไฟที่มีตำแหน่งยอดสัญญาณเกิดที่ 1484 cm^{-1}



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

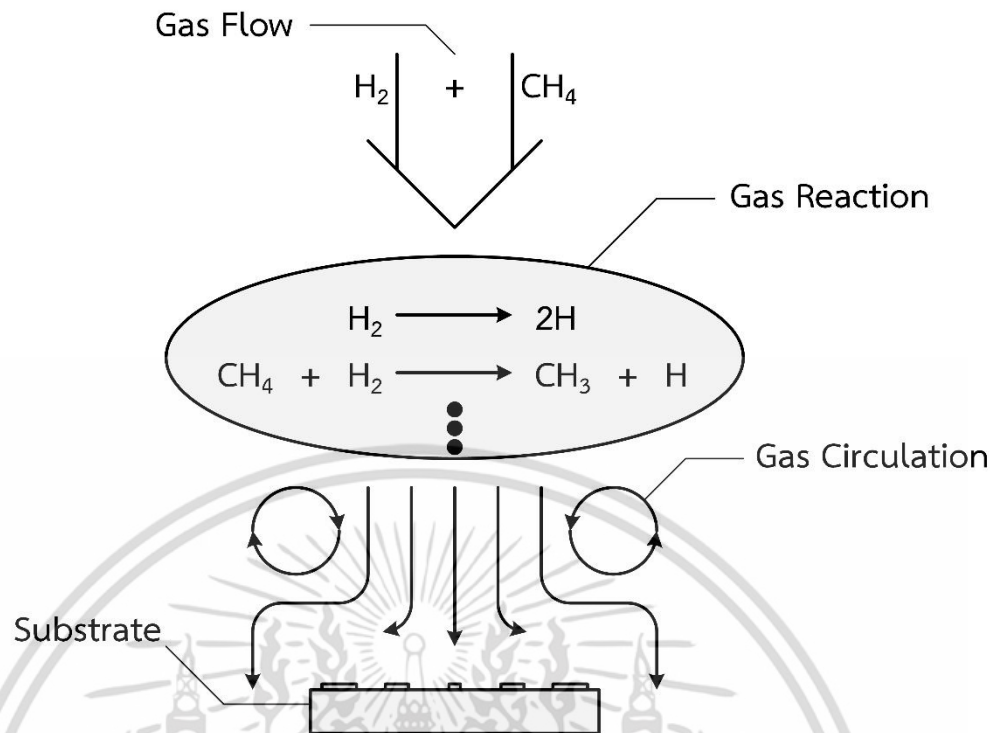
สำหรับรูปร่างของผลึกเพชรสามารถเกิดขึ้นได้หลายรูปแบบซึ่งขึ้นอยู่กับสถานะของแก๊สเฟส ในขณะที่ฟอร์มผลึกเพชร รูปร่างต่างๆ ของผลึกสามารถเกิดขึ้นดังรูปที่ 2.5 โดยรูปที่ (a) จะเป็นรูปแบบที่ง่ายที่สุดของผลึกรูปเดี่ยวที่สามารถเกิดขึ้นได้ในระนาบ 111 และระนาบ 100 เรียกว่า Cubo-Octahedron (b) เกิดขึ้นสองส่วนแยกจากกันเรียกว่า Twined Cubo-Octahedron (c) มีคู่เหมือนของ Cubo-Octahedron เกิดขึ้นแยกจากกันห้าส่วนสมมาตรกันเรียกว่า Decahedral-Wulff-Polyhedron และ (d) มีค่าเหมือนเกิดขึ้นแยกจากกันใน 20 ส่วนสมมาตรกันหรือเกิดจากผลึกรูปเดี่ยว 20 หน่วยเรียกว่า Icosahedron



รูปที่ 2.5 ไดอะแกรมของอนุภาคเพชรแบบต่างๆ (a) Cubo-Octahedron (b) Twined Cubo-Octahedron (c) Decahedral Wulff-Polyhedron และ (d) Icosahedron

2.3.2 กลไกทางเคมีในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

กลไกการเกิดผลึกเพชรนั้น เริ่มจากการนิวเคลียสไอออนให้ผลึกก่อตัว จากนั้นจะเกิดการพอกพูนของอะตอมคาร์บอนทำให้ผลึกเพชรมีขนาดโตขึ้น รูปที่ 2.6 ได้ใช้แก๊ส CH_4 และ H_2 เป็นตัวทำปฏิกิริยาเมื่อให้พลังงานหรืออุณหภูมิสูงในพื้นที่ของการกระตุ้นแก๊สด้วยวิธีต่างๆ เช่น พลาสมา ลวดความร้อน หรือ Combustion Flame ส่งผลให้แก๊สเกิดปฏิกิริยาเคมีเป็นจำนวนมากภายในเวลา 10^{-9} วินาที สามารถเกิดการชนและถ่ายเทพลังงานจลน์ให้กับแก๊สอื่นได้ภายในเวลา 10^{-4} ถึง 10 วินาที การเกิดปฏิกิริยาเหล่านี้จะส่งผ่านเข้าไปยังบริเวณฐานรองด้วยแรงของการไหล การแพร่ และการพา ในบริเวณที่ใกล้กับฐานรอง การแพร่จะแพร่จนเข้าสู่บริเวณที่มีการไหลหยุดนิ่ง เรียกว่า Boundary Layer บนพื้นผิวฐานรองจะมีกระบวนการหลายอย่างเกิดขึ้น เช่น การดูดกลืน การคาย การแพร่บริเวณผิวและเนื้อสาร ซึ่งปฏิกิริยาเคมีเหล่านี้จะมีประโยชน์ต่อการปลูกผลึกเพชรให้มีขนาดเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาถึงความสำคัญที่สัมพันธ์กับข้อมูลกระบวนการพื้นผิว เช่น ฟังก์ชันเชิงซ้อนของอุณหภูมิพื้นผิว โครงสร้างบริเวณพื้นผิว และองค์ประกอบของพื้นผิวการวิเคราะห์ เป็นต้น



รูปที่ 2.6 กระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรแบบ CVD

2.3.3 การนิวคลีเอชัน

นิวคลีเอชันมีอยู่สองชนิด คือ โฮโมจีเนียสนิวคลีเอชัน (Homogeneous Nucleation) และ เฮเทอโรจีเนียสนิวคลีเอชัน (Heterogeneous Nucleation) ซึ่งโฮโมจีเนียสนิวคลีเอชันจะเกิดขึ้นเมื่อผลึกที่ทำการปลูกและฐานรองที่ใช้สำหรับปลูกผลึกเป็นชนิดเดียวกัน เช่น ทำการปลูกผลึกเพชรบนฐานรองเพชร ส่วนเฮเทอโรจีเนียสนิวคลีเอชันจะเกิดขึ้นเมื่อผลึกที่ทำการปลูกและฐานรองที่ใช้สำหรับปลูกผลึกไม่ใช่ชนิดเดียวกัน เช่น ทำการปลูกผลึกเพชรบนฐานรองซิลิคอน ในการปลูกผลึกเพชรบนฐานรองชนิดอื่นๆ นั้น จะใช้ฐานรองที่มีโครงสร้างของผลึกใกล้เคียงกันและสามารถเกิดขึ้นคาร์ไบด์ได้ เช่น ซิลิคอน ซึ่งจะช่วยให้ผลึกเพชรสามารถเกิดขึ้นได้ที่บริเวณพื้นผิวของฐานรอง อย่างไรก็ตามพบว่าการปลูกผลึกเพชรแบบเฮเทอโรจีเนียสนั้นก่อนที่จะเกิดขึ้นของฟิล์มเพชร จะมีชั้นคาร์ไบด์ที่มีความหนาประมาณ 10 nm เกิดขึ้นก่อน ในการปลูกผลึกเพชรเพื่อให้ได้คุณภาพที่ดีนั้นจะต้องทำการลดอัตราการนิวคลีเอชัน (Renucleation) ซึ่งจะส่งผลต่อขนาดของผลึกเพชร

การควบคุมการนิวคลีเอชันเพื่อให้ได้ขนาดผลึก ระบายผลึก และคุณสมบัติที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้งานฟิล์มเพชร ต้องคำนึงถึงความเรียบของฟิล์ม ขนาดของผลึกที่เท่ากัน และจุดบกพร่องของผลึกมีน้อย สำหรับการนิวคลีเอชันเพชรด้วยวิธี CVD เพื่อให้ได้ฟิล์มเพชรที่มีคุณภาพสูง ต้องกำหนดแนวทางพิจารณาการควบคุมการนิวคลีเอชันดังนี้

1. พลังงานจลน์เทอร์โมไดนามิกของนิวคลีโอชันและการปลูกผลึกจะสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ของการทดลอง
2. ลักษณะพื้นผิวฐานรองที่มีการนิวคลีโอชัน สามารถเปลี่ยนแปลงการนิวคลีโอชันได้จากสภาวะแวดล้อมของ CVD
3. การปลูกผลึกเริ่มต้นบนฐานรองที่มีการเตรียมและไม่ได้เตรียมจะได้นิวคลีโอชันในระดับจุลภาค

4. ผลของนิวคลีโอชันบนฐานที่เป็นเพชรธรรมชาติ จะได้ชั้นฟิล์มเพชรเป็นไฮโมอีพิแทกซี การนิวคลีโอชันเพชรจากกระบวนการ CVD ได้ทำให้เงื่อนไขการก่อตัวของอนุภาคพลังงานอิสระของระบบเกิดการกำจัดกรากฟอรัมตัวของกราไฟท์นิวเคลียสซึ่งเป็นการกำจัดคาร์บอนที่มีพันธะ sp^2 และทำให้นิวเคลียสของเพชรมีความเสถียรมาก โดยสภาวะแวดล้อมของการปลูกผลึกเพชรต้องทำให้มีโมเลกุลของไฮโดรเจนจำนวนมากอย่างอิมิตัว หรือแก๊สผสมที่มีอัตราส่วนของ C:H ต่ำ ซึ่งได้จากการใช้เทคนิคกระตุ้นเฟสแก๊ส เช่น การใช้หลอดความร้อน เป็นต้น โมเลกุลไฮโดรเจนทำหน้าที่ลดความดันบางส่วนของเฟสแก๊สที่ทำให้เกิดการนิวคลีโอชันของกราไฟท์ สำหรับการฟอรัมตัวของผลึกเพชรที่มีจุดบกพร่องเกิดขึ้นที่ผิวหน้าจะสามารถทำให้เกิดการนิวคลีโอชันของกราไฟท์ขึ้น โดยลักษณะเช่นนี้ทำให้อัตราการปลูกผลึกเพชรและคุณภาพผลึกเพชรลดลง

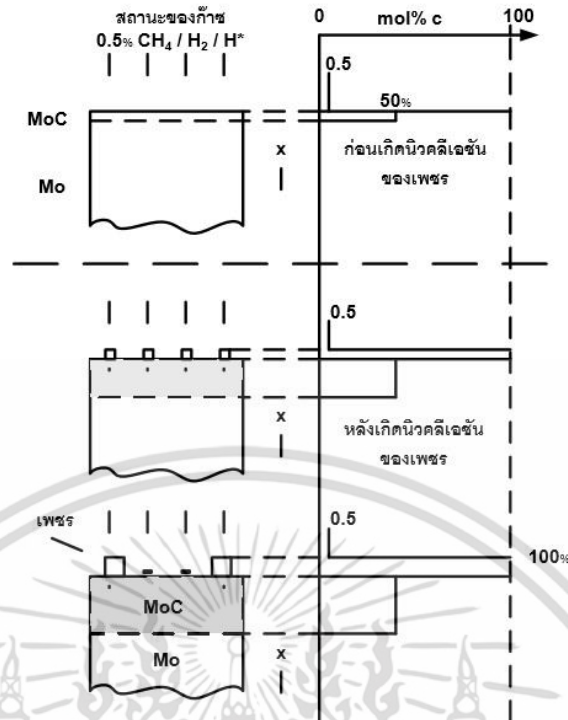
สำหรับชนิดของฐานรองและการเตรียมฐานรองจะมีผลอย่างมากต่อการนิวคลีโอชันและการก่อตัวเริ่มต้นของผลึก ซึ่งชนิดของฐานรองที่ใช้ในการปลูกผลึกเพชรด้วยวิธี CVD จะใช้ฐานรองที่เป็นเพชรหรือฐานรองชนิดอื่นก็ได้ การนิวคลีโอชันฐานรองที่ไม่ใช่เพชร เช่น Si, Ni, Mo, W, Ta, Hf และ Nb เป็นต้น จะต้องมีขั้นตอนการเตรียมฐานรองโดยการขัดฐานรองด้วยผงเพชร SiC Cubic Boronitride (C-BN) หรือเตรียมโดยวิธีการฟอรัมชั้นคาร์ไบด์บนฐานรอง ซึ่งวิธีการนี้ทำให้เกิดความหนาแน่นของนิวคลีโอชันสูง อัตราการเกิดผลึกเริ่มต้นเร็ว และใช้เวลาน้อย ในกระบวนการนิวคลีโอชันของผลึกเพชรจะประกอบด้วยขั้นตอน 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเริ่มขึ้นเมื่ออะตอมคาร์บอนของเฟสแก๊สตกกระทบบนฐานรองและเกิดการแพร่เข้าไปในเนื้อฐานรอง จากนั้นอัตราการแพร่ของคาร์บอนจะค่อยๆ ลดลง ทำให้เกิดการฟอรัมตัวของชั้นคาร์ไบด์บนฐานรองดังรูปที่ 2.7 จนกระทั่งการแพร่ของคาร์บอนไม่สามารถดำเนินกระบวนการต่อไปได้ และในขณะเดียวกัน เมื่อปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนที่บริเวณผิวฐานรองมีมากเพียงพอ จะเป็นเงื่อนไขสำคัญสำหรับกระบวนการก่อตัวของชั้นผลึกเพชร ซึ่งขั้นตอนของการฟอรัมชั้นคาร์ไบด์จะใช้เวลา 15 - 20 นาที สำหรับการปลูกผลึกเพชรบนฐานรองซิลิคอนในช่วงเวลา 15 นาที อะตอมของไฮโดรเจนทำการกัดออกไซด์และคาร์บอนที่มีสิ่งสกปรกเจือปนออก จากนั้นจึงเกิดขึ้น SiC เคลือบที่ผิวฐานรองซิลิคอนโดยความหนาแน่นของชั้น SiC จะเปลี่ยนแปลงตามอัตราส่วนของแก๊ส C:H และการใช้วัสดุอื่นเป็นฐานรองก็ได้ชั้นคาร์ไบด์ของวัสดุอื่นเช่น TiC, HfC, NbC, Mo₂C และ WC เป็นต้น

ในกระบวนการขั้นตอนที่สองสำหรับนิวคลีโอชันของเพชรสามารถเกิดขึ้นได้หลายแนวทาง เช่น การฟอรัมของนิวเคลียสบนพื้นผิวที่มีคาร์บอนอิมิตัว นิวคลีโอชันในเฟสแก๊ส และการปลูกผลึกบนฐานเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

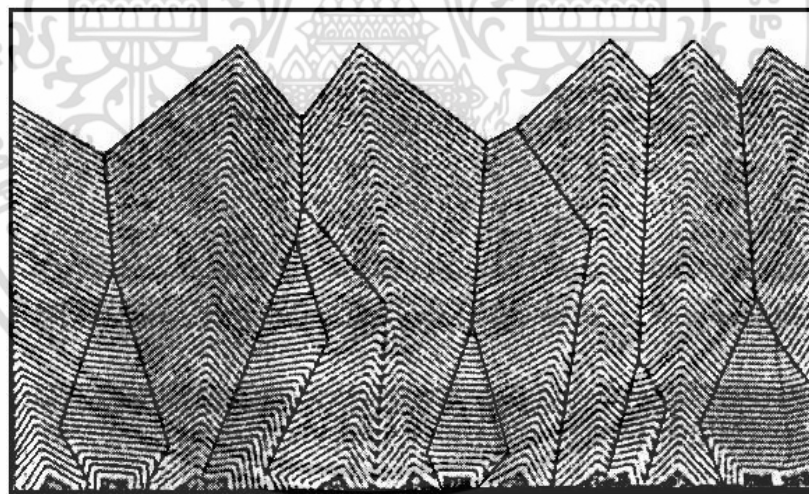
ที่เป็นเพชรหรือฐานรองที่ขัดด้วยคาร์บอนที่มีพันธะ sp^3 เป็นต้น นิวเคลียสของเพชรและกราไฟท์ในเฟสแก๊สเกิดจากการฟอร์มนิวเคลียสในขณะที่คาร์บอนอิมพัลส์ ซึ่งเงื่อนไขที่ทำให้เกิดอัตรานิวเคลียสสูงนั้น สามารถกำหนดได้ที่ความเข้มข้นของคาร์บอนที่มีปริมาณสูง เมื่ออุณหภูมิฐานรองพอเหมาะจะทำให้ได้ผลึกเพชรที่สมบูรณ์ แต่ถ้าอุณหภูมิของฐานรองมีค่าต่ำจะทำให้เกิดจุดบกพร่องของผลึกเพชรในระนาบและเกิดเป็นส่วนของกราไฟท์หรืออะมอร์ฟัสขึ้นซึ่งเป็นการก่อตัวของคาร์บอนที่มีพันธะ sp^2 ทำให้เกิดผลกระทบต่อการใช้ผลึกเพชรบนฐานรอง ส่งผลให้ได้ชั้นผลึกเพชรเป็นไฮโมอิกพิแทกเซียลที่ไม่มีคุณภาพ การนิวเคลียสของเพชรบนฐานรองที่ไม่ใช่เพชรที่มีการเตรียมฐานรองด้วยการขัดผิว การชุบฐานรองลงในสารละลายของผงเพชร หรือการสเปรย์ของสารละลายผงเพชรลงบนฐานรองอย่างสม่ำเสมอ ส่งผลให้ได้ความหนาแน่นของนิวเคลียสสูง การเตรียมฐานรองโดยการขัดด้วยผงเพชรเพื่อให้เกิดนิวเคลียสนั้น ความหนาแน่นของนิวเคลียสมีความสัมพันธ์กับเวลาที่ใช้ในการขัดผิว การใช้เวลาในการขัดผิวน้อยจะส่งผลให้ได้ความหนาแน่นนิวเคลียสต่ำ และถ้าการขัดผิวฐานรองใช้เวลามากจะส่งผลให้เกิดผลึกจำนวนมากขึ้น แสดงว่ารอยขีดข่วนบนฐานรองซึ่งเกิดจากการขัดด้วยผงเพชร ทำให้ได้แลตทิซระหว่างฐานรองกับนิวเคลียสเข้ากันได้ ทำให้เกิดสภาวะแวดล้อมเหมาะสมของกระบวนการนิวเคลียสของผลึกเพชร

สำหรับนิวเคลียสของผลึกบนฐานรองที่ไม่ใช่เพชรและไม่มีสารขัดสามารถเกิดนิวเคลียสได้ตามแนวการกัดแบบแอนไอโซโทรปิกบนฐานรอง บริเวณรอยต่อและตำหนิต่างๆ ที่ฐานรอง หรือฐานรองที่ไม่ขัดอาจใช้วิธีการพอกพูนชั้นฐานรองด้วย BN SiC a-C:H Diamond-Like Carbon (DLC) หรืออะมอร์ฟัสคาร์บอนพันธะ sp^3 จากนั้นจึงใช้ฐานรองนี้ปลูกผลึกเพชร

สำหรับลักษณะพื้นผิวของผลึกเพชรที่ได้จากการปลูกผลึกเป็นแบบโพลีคริสตัลไลน์ พื้นผิวส่วนใหญ่ของผลึกเพชรมีระนาบ 111 และ 100 เช่นเดียวกับผลึกเพชรในธรรมชาติโดยที่พื้นผิวที่ปลายแลตทิซจะมีพันธะ C-H กับอะตอมไฮโดรเจนแบบ sp^3 และบนพื้นผิวสามารถพบอะตอมอื่น เช่น O N S F และ Cl แต่อะตอมเหล่านี้มีปริมาณน้อยที่ปกคลุมพื้นผิวเนื่องจากบริเวณพื้นผิวมีความหนาแน่นอะตอมสูงประมาณ $1.6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะมีอะตอมอื่นปกคลุมมากกว่าอะตอมของไฮโดรเจน



รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการนิวคลิเอชัน

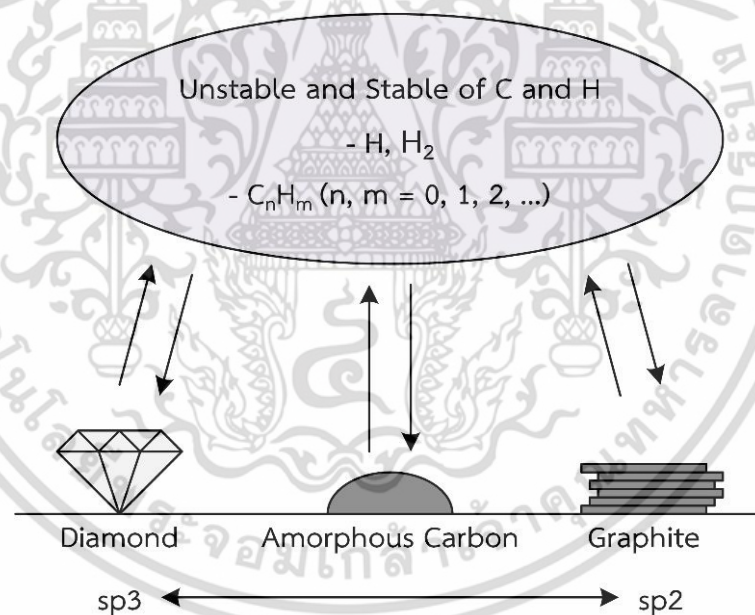


รูปที่ 2.8 จำลองการก่อตัวของฟิล์มเพเซอร์ที่มีลักษณะเป็นแบบโพลีคริสตัลไลน์

2.3.4 สภาพแวดล้อมแก๊สในการปลูกฟิล์มเพเซอร์

ลักษณะแก๊สที่มีสภาวะที่ถูกกระตุ้นด้วยวิธีการ CVD ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของเพสแก๊สซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดภายใต้สภาวะแวดล้อมที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากสภาวะแวดล้อม CVD ของการปลูกฟิล์มเพเซอร์เกี่ยวข้องกับการไหลและอัตราการส่งผ่านของอนุภาคแก๊ส ทำให้สภาวะแวดล้อมของแก๊สไม่เข้าสู่สภาวะสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกถึงแม้เป็นบริเวณที่มีการกระตุ้นหรือใกล้เคียงบริเวณเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นผิวที่ปลูกผลึก จากการสังเคราะห์การปลูกผลึกเพชรด้วยวิธี CVD แบบลดความร้อนส่วนผสมของแก๊ส CH_4 0.5% ในแก๊ส H_2 ที่สภาวะสมดุลความดัน 20 Torr กำหนดให้อุณหภูมิที่ฐานรองและอุณหภูมิลดความร้อนอยู่ในช่วง $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $2200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ ทำให้ได้ความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้นจำนวนมากขณะที่เกิดการปลูกผลึกได้แก่ CH_4 C_2H_2 CH_3 และ C_2H_4 โดยที่ความหนาแน่นของ CH CH_2 C_2 และ C_3 มีค่าน้อยมาก ซึ่งอัตราการปลูกผลึกจะแปรผันกับความอึดตัวของคาร์บอน การกระจายคาร์บอนแบบเฟสแก๊สและการเพิ่มขึ้นของความดันในสภาวะแวดล้อมสำหรับในความซับซ้อนของสภาวะแวดล้อม CVD ของการปลูกผลึกเพชรต้องทำการควบคุมการเคลื่อนไหวอนุโมลแก๊สที่เกิดขึ้นใหม่ อัตราการเกิดปฏิกิริยา การเปลี่ยนแปลงไนรีแอกเตอร์ อนุโมลแก๊สที่พบในเฟสแก๊สและใกล้บริเวณพื้นผิว เพื่อให้ได้ช่วงชีวิตทางปฏิกิริยาเคมีมีเวลานานมากในการเคลื่อนที่ไปยังพื้นผิว เงื่อนไขของการปลูกผลึกเพชรจะตรงข้ามกับการเกิดกราฟไฟท์และรูปแบบของคาร์บอนอื่นๆ อะตอมของไฮโดรเจนทำให้เกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงภายในหรือการจำกัดลักษณะของพันธะพื้นผิวที่แตกต่างกันออกไปได้แก่พันธะ sp sp^2 และ sp^3 ซึ่งคุณภาพของเพชรพิจารณาจากการเข้าสู่สมดุลทางเทอร์โมไดนามิระหว่างกระบวนการเคลือบและกระบวนการเกิดปฏิกิริยาดังในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แบบจำลองการเกิดของผลึกคาร์บอนจากปฏิกิริยาของแก๊สในกระบวนการ CVD

ซึ่งเป็นแบบจำลองมหภาคที่พิจารณาบนพื้นฐานของการพอกพูนจากแก๊สผสมที่มีคาร์บอนอึดตัวและอะตอมไฮโดรเจนที่อุณหภูมิฐานรองทำให้เกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงการปลูกผลึก สภาวะแวดล้อมของการปลูกผลึกจะเป็นความสมดุลระหว่างการพอกพูนคาร์บอนและกระบวนการกัดคาร์บอนสภาวะของแข็งในแต่ละรูปแบบ กล่าวคือมีการอึดตัวของคาร์บอนทำให้องค์ประกอบที่เป็นคาร์บอนได้หลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบเช่น กราไฟท์ อะมอร์ฟัสคาร์บอน และผลึกเพชร เป็นต้น โดยที่อะตอมไฮโดรเจนทำให้เกิดปฏิกิริยาในสภาวะแวดล้อมเพื่อลดการฟอร์มตัวของคาร์บอนที่ไม่ใช่ผลึกเพชรด้วยวิธีการกัดคาร์บอนที่อยู่ในสภาวะของแข็งหรือเป็นการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวที่มีพันธะ sp^2 ไปเป็น sp^3 จากแบบจำลองมหภาคนี้ถ้าทำการเพิ่มอุณหภูมิแก๊สที่ช่วยในกระบวนการกัดให้เหมาะสมอย่างเช่น OH หรือ Halogen จะทำให้ได้ผลึกเพชรที่มีคุณภาพสูงขึ้น

2.3.5 ผลึกเพชรชนิดพี

การศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของผลึกเพชรชนิดพี ซึ่งประกอบด้วยสารเจือโบรอนอะตอมเข้าไปฟอร์มตัวในผลึกเพชร ทำให้เกิดสถานะของสารเจือในช่องว่างแถบพลังงานขึ้น ได้มีการทดลองเพื่อยืนยันการกระจายของสถานะที่เกิดขึ้นในช่องว่างแถบพลังงานของผลึกเพชร ซึ่งมีลักษณะเป็นแบบเอกซ์โพเนนเชียลที่สถานะต่างๆ ในช่องว่างแถบพลังงานของผลึกเพชร เมื่อเจืออะตอมโบรอนในสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดการแทนที่ของอะตอมและมีระดับ Shallow Acceptor เดี่ยวเกิดขึ้น ความลึกของระดับดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนอะตอมสารเจือ กรณีของการเจืออะตอมสารเจือโบรอนลงในแลตทิซของเพชร อะตอมของโบรอนไม่เพียงแทนที่เท่านั้น แต่ยังทำให้เกิดช่องขึ้นซึ่งเป็นผลจากความแตกต่างกันของรัศมีของอะตอมระหว่างคาร์บอนและโบรอน นอกจากนี้ทำให้เกิดจุดบกพร่องหลายชนิดขึ้น เช่น จุดบกพร่องที่เกิดขึ้นเป็นระดับ Acceptor เดี่ยวที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับแถบวาเลนซ์

สำหรับแถบพลังงานของผลึกเพชรชนิดพีที่มีสารเจืออะตอมโบรอน โดยจะมีระดับ Shallow Acceptor (A_{sh}) เกิดขึ้น และระดับ Deeper Acceptor (A_D) เกิดขึ้น เมื่อพิจารณากรณีที่มีอุณหภูมิต่ำโสลจากแถบวาเลนซ์จะถูกกระตุ้นเฉพาะจาก A_{sh} -Center และเมื่ออุณหภูมิแวดล้อมมีค่าเพิ่มสูงกว่า 300 K โสลที่ถูกกระตุ้นจะเริ่มเกิดจาก A_D -Center เกิดการไอออไนซ์เกิดไอออนลบขึ้น

สภาพความนำไฟฟ้า σ_L ในบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ กำหนดได้ว่า $\sigma_L = q\mu_p N_A$ ($\Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$) โดยที่ N_A เป็นความหนาแน่นของสารเจือที่ A_{sh} -Center มีค่าใกล้เคียงกับความหนาแน่นของโสลที่ถูกกระตุ้นจาก A_{sh} -Center สำหรับความหนาแน่นของสถานะพลังงานหรือจำนวนอิเล็กตรอนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรต่อหนึ่งหน่วยพลังงาน $N_A(E)$ ($\text{cm}^{-3} \text{eV}^{-1}$) ของ A_D -Center ในเทอมของพลังงานสามารถอธิบายได้จากสมการ

$$N_A(E) = N_{AO} \exp \left[\frac{E_V - E}{kT} \right] \quad (2.1)$$

โดยที่ N_{AO} เป็นความหนาแน่นของสถานะพลังงานที่ขอบด้านบนของแถบวาเลนซ์

k เป็นค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ (Boltzman Constant)

T เป็นค่าของอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาแน่นที่ A_D-Center มีค่า N_D ซึ่งหาได้จาก

$$N_D = \int_{E_F=E_{AD}}^{E_{AO}} N_A(E) dE \quad (2.2)$$

โดย E_{AO} เป็นระดับพลังงานสูงสุดของระดับ Deep Acceptor

E_{AD} เป็นระดับพลังงานต่ำสุดของ Deep Acceptor

การที่อะตอมสารเจือมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นผลให้ระดับเฟอร์มิ E_F เข้าใกล้ขอบของแถบวาเลนซ์ ดังนั้น

$$N_D = N_{AO} kT \left[\exp\left(\frac{E_F - E_V}{kT}\right) - \exp\left(\frac{E_V - E_{AO}}{kT}\right) \right] \quad (2.3)$$

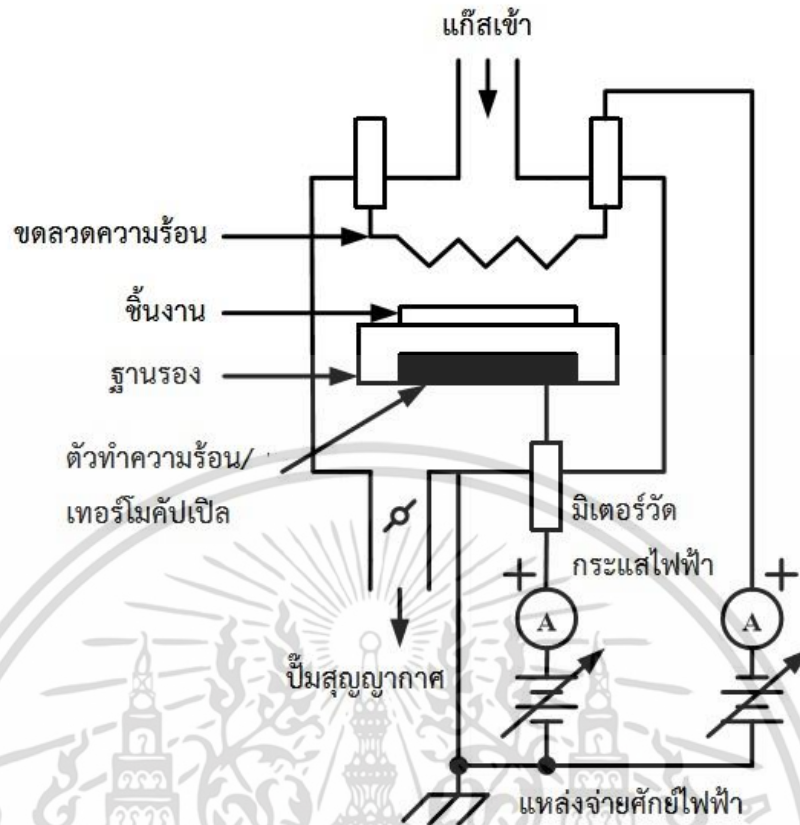
จากความสัมพันธ์ E_F - E_V = E_{AD} - E_V = E_a ดังนั้น

$$E_a = kT \ln \left[\frac{N_D}{kT N_{AO}} + \exp\left(-\frac{E_{AO} - E_V}{kT}\right) \right]^{-1} \quad (2.4)$$

จากสมการ (2.4) ค่าระดับพลังงานกระตุ้น E_a จะมีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ในขณะที่ความหนาแน่นของสารเจือที่ A_D-Center มีค่าเพิ่มขึ้น

2.4 กระบวนการ CVD แบบลวดความร้อน

กระบวนการ CVD แบบลวดความร้อน (Hot-Filament Chemical Vapor Deposition; HFCVD) ดังรูปที่ 2.10 เป็นเทคนิคที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรแบบ CVD ที่ง่าย ค่าใช้จ่ายไม่สูง และสามารถสร้างฟิล์มเพชรให้พื้นที่ครอบคลุมฐานรองขนาดใหญ่ได้ โดยใช้ขดลวดให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 2000 °C เพื่อทำให้ไฮโดรเจนและไฮโดรคาร์บอนที่ผสมกันอยู่เกิดการแตกตัว ความเข้มข้นของมีเทน (Methane) เป็น 0.1% ถึง 2.0% ในไฮโดรเจนที่ความดัน 50 - 100 Torr ระยะห่างระหว่างลวดความร้อนกับฐานรองมีอุณหภูมิ 800 - 1000 °C ผลจากการกระตุ้นด้วยความร้อนทำให้เกิดการชนกันของอิเล็กตรอน เกิดการแพร่และปฏิกิริยาเคมีที่บริเวณผิว บริเวณฐานรองสามารถจ่ายศักย์ไฟฟ้าบวก ซึ่งจะทำให้เกิดการแตกตัวของแก๊สบริเวณนี้มากขึ้น ทำให้อัตราการก่อตัวเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของฟิล์มขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้

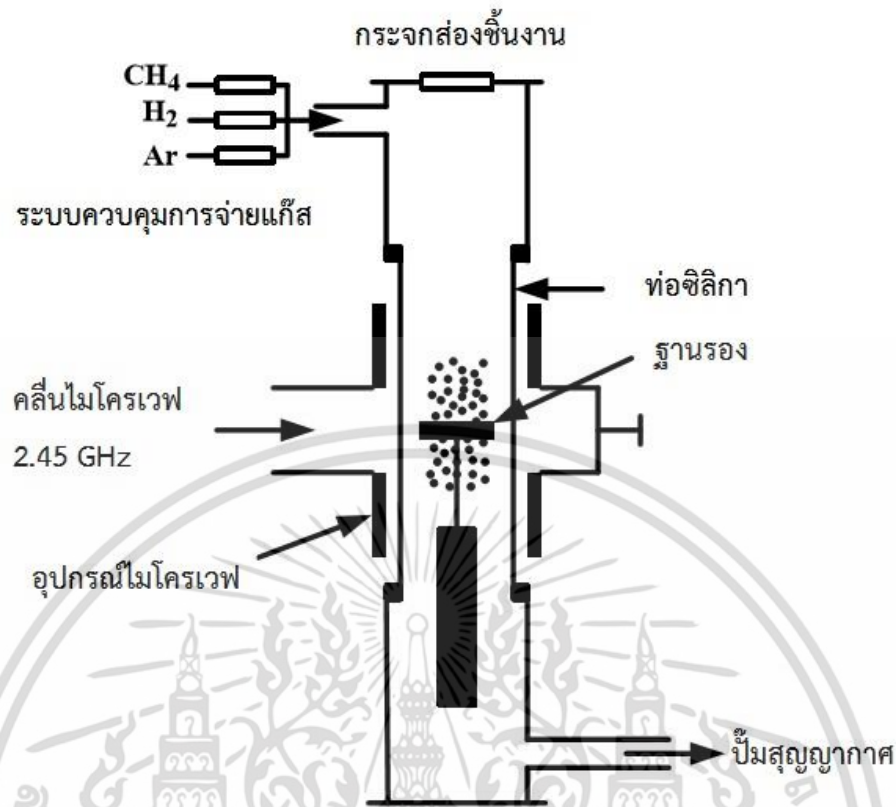


รูปที่ 2.10 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วย CVD ลวดความร้อน

2.5 กระบวนการ CVD แบบพลาสมาความถี่สูง

หลักการ CVD ในลักษณะนี้จะใช้พลาสมาของไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz ในการสังเคราะห์เพชรเป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันมากดังรูปที่ 2.11 เป็นลักษณะของ Microwave Plasma Chemical Vapor Deposition (MPCVD) ชนิดท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมสำหรับการจำกัดขอบเขตของไมโครเวฟระหว่าง Generator และห้องปฏิกิริยา โดยใช้ห้องปฏิกิริยาวางตรงกลางของทิศทางไมโครเวฟที่จะผ่านไปยัง Applicator ในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม Three Stub Tuners และมิเตอร์วัดกำลังใช้ร่วมกันในท่อนำคลื่นเพื่อจำกัดพลังงานที่สะท้อนจาก Applicator ให้มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งใช้อุณหภูมิฐานรอง 700 - 900 °C และความเข้มข้นของมีเทน 0.2 - 5 % ความดัน 25 - 100 Torr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วย CVD พลาสมาความถี่สูง

2.6 แก๊สในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรนั้น โดยทั่วไปแล้วแก๊สที่ใช้ในการสังเคราะห์จะมีสองแบบ คือ แก๊สมีเทนต่อไฮโดรเจน ($\text{CH}_4:\text{H}_2$) [2] ซึ่งจะได้ฟิล์มเพชรชนิดไมโครคริสตัลไลน์ (Microcrystalline Diamond; MCD) และนาโนคริสตัลไลน์ (Nanocrystalline Diamond; NCD) ส่วนอีกแบบจะใช้แก๊สมีเทนต่ออาร์กอน ($\text{CH}_4:\text{Ar}$) ซึ่งจะได้ฟิล์มเพชรชนิดนาโนคริสตัลไลน์และอัลตรานาโนคริสตัลไลน์ (Ultrananocrystalline Diamond; UNCD) ทั้งนี้การที่จะได้ฟิล์มชนิดไหนในการสังเคราะห์นั้นจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของแก๊สที่ใช้และอาจมีปัจจัยอื่นๆ เข้ามาร่วมด้วย เช่น อุณหภูมิฐานรอง พลังงานของคลื่นไมโครเวฟ และความดันในห้องปฏิกิริยา เป็นต้น ส่วนแก๊สทั้งสองแบบที่กล่าวมานั้น ปฏิกิริยาภายในห้องปฏิกิริยาจะทำให้ได้โมเลกุลชนิดที่ใช้สำหรับการปลูกผลึกเพชรต่างกัน ซึ่งจะส่งผลให้โครงสร้างของผลึกที่ได้ต่างกัน

2.6.1 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดไมโครคริสตัลไลน์

ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรโดยทั่วไปจะใช้แก๊สมีเทนต่อไฮโดรเจนในอัตราส่วน 1:99 ซึ่งพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟที่จ่ายเข้าไปในห้องปฏิกิริยาจะทำให้แก๊สไฮโดรเจนเกิดการแตกตัวได้อะตอมของไฮโดรเจน จากนั้นอะตอมของไฮโดรเจนจะไปทำปฏิกิริยากับแก๊สมีเทนเกิดเป็นเมทิล (CH_3) [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อะตอมของไฮโดรเจนมีผลต่อคุณภาพของฟิล์มเพชร ซึ่งหมายถึงความเป็นผลึกของฟิล์มเพชรที่เกิดจากพันธะ sp^3 โดยคุณภาพของฟิล์มเพชรนั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณการเกิดเมทิล การกำจัดโมเลกุลตั้งต้นของกราฟไฟท์ที่พื้นผิวในระหว่างการปลูกผลึก และการปรับปรุงพันธะ sp^3 ในระหว่างการปลูกผลึก ปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ขึ้นอยู่กับปริมาณอะตอมของไฮโดรเจนที่อยู่ในพลาสมา

โดยปกติเมทิลจะเป็นโมเลกุลที่ทำให้เกิดผลึกเพชรซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างแก๊สมีเทนกับอะตอมของไฮโดรเจนดังสมการ



นอกจากปฏิกิริยาดังกล่าวแล้ว ยังมีปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดโมเลกุลอื่นๆ อีก หากโมเลกุลเหล่านั้นไม่ถูกกำจัดไป ก็จะทำให้เกิดการก่อตัวของผลึกคาร์บอนที่มีพันธะ sp^2 เกิดขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่อคุณภาพของฟิล์มเพชร การแก้ปัญหาดังกล่าวทำได้โดยทำให้เกิดการอิมพัลส์ของไฮโดรเจนในพลาสมา ซึ่งอะตอมของไฮโดรเจนจะไปทำลายปฏิกิริยาอื่นๆ ที่เกิดขึ้น พร้อมทั้งกำจัดพันธะของกราฟไฟท์ [4 - 7] ดังนั้นปัจจัยสำคัญที่เชื่อว่าส่งผลต่อคุณภาพของฟิล์มเพชรก็คืออะตอมของไฮโดรเจน

ขนาดของผลึกเพชรนั้นสามารถลดลงให้เหลือ 50 - 100 nm ซึ่งเป็นฟิล์มเพชรชนิดนาโนคริสตัลไลน์ ด้วยการเพิ่มอัตราส่วนของแก๊ส $CH_4:H_2$ ที่ใช้ในการปลูกผลึก ซึ่งผลที่ได้ก็คือพื้นผิวของฟิล์มเพชรมีความเรียบมากกว่าฟิล์มเพชรชนิดไมโครคริสตัลไลน์เนื่องจากขนาดผลึกที่เล็กลง [8]

2.6.2 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์

ในการสังเคราะห์เพชรด้วยบรรยากาศของไฮโดรเจนนั้นทำให้ได้ผลึกเพชรที่มีระดับไมโครคริสตัลไลน์และนาโนคริสตัลไลน์ โดยไฮโดรเจนจะเป็นตัวทำปฏิกิริยากับมีเทนทำให้เกิดเมทิล ซึ่งเป็นโมเลกุลชนิดที่ทำให้เกิดผลึกระดับไมโครคริสตัลไลน์ อย่างไรก็ตามได้มีการพัฒนากระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วย MPCVD โดยใช้แก๊สอาร์กอนแทนบรรยากาศแก๊สไฮโดรเจน [9] โดยปริมาณแก๊สมีเทนที่อยู่ในบรรยากาศจะมีค่าน้อยประมาณ 1% ซึ่งจะทำให้เกิดโมเลกุลของคาร์บอนไดเมอร์

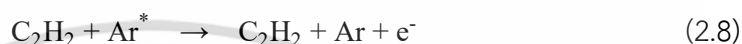
เมื่อทำการเติมแก๊สเฉื่อย เช่น อาร์กอน เพิ่มเข้าไปในการสังเคราะห์ฟิล์มที่ใช้แก๊สมีเทนต่อไฮโดรเจน พบว่าปริมาณของคาร์บอนไดเมอร์ มีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้คุณภาพของฟิล์มเพชรที่ได้นั้นลดลง ซึ่งเป็นผลเสียต่อการปลูกผลึกเพชร ดังนั้นปริมาณของแก๊สเฉื่อยที่อยู่ในห้องปฏิกิริยานั้น ถือเป็นอุปสรรคต่อการปลูกผลึกเพชร อีกกรณีหนึ่งพบว่าฟิล์มเพชรที่เกิดจากการสังเคราะห์โดยใช้แก๊สมีเทนต่ออาร์กอนโดยที่ไม่มีแก๊สไฮโดรเจนนั้น ไม่มีส่วนประกอบของอะมอร์ฟัส แต่ได้ฟิล์มเพชรที่มีขนาดผลึกอยู่ในระดับนาโนเมตรซึ่งเกิดจากคาร์บอนไดเมอร์ จะเห็นว่าทั้งสองกรณีนี้ต่างก็ทำให้เกิดกลไกที่ทำให้ได้คาร์บอนไดเมอร์ ซึ่งเป็นโมเลกุลชนิดที่ใช้สำหรับปลูกผลึกเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดคาร์บอนไดเมอร์นั้นจะเริ่มจากแก๊สมีเทนที่ได้รับความร้อน 1150 - 1300 °C ในพลาสมา จะเกิดการแตกตัวเป็นอะเซทิลีน (C₂H₂) ดังสมการ



จากนั้นอะตอมของอาร์กอนที่อยู่ในสถานะกึ่งเสถียรซึ่งเกิดจากการชนกันในพลาสมา จะไปทำปฏิกิริยากับอะเซทิลีนทำให้ได้อิออนของอะเซทิลีน และทำให้เกิดคาร์บอนไดเมอร์ขึ้น [10] ดังสมการ



ซึ่งคาร์บอนไดเมอร์นั้นเป็นโมเลกุลที่ทำให้เกิดผลึกเพชรในระดับอัลตรานาโนคริสตัลไลน์ โดยได้มีการทดลองสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดนี้ด้วย MPCVD ที่ความถี่ไมโครเวฟ 2.56 GHz อัตราส่วนของแก๊สมีเทนต่ออาร์กอน คือ 1:99 ที่อัตราการไหลของแก๊สประมาณ 100 sccm แรงดัน 100 - 200 Torr อุณหภูมิฐานรอง 350 - 800 °C จากเงื่อนไขดังกล่าวทำให้ไฮโดรเจนในบรรยากาศมีปริมาณน้อยทำให้เกิดอัตราเร็วการเติบโตสูง เกิดฟิล์มเพชรที่มีลักษณะเฉพาะ มีขนาดของผลึกอยู่ที่ 3 - 5 nm [11]

อย่างไรก็ตามยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อปริมาณของคาร์บอนไดเมอร์อีก เช่น อุณหภูมิฐานรอง กำลังของคลื่นไมโครเวฟ และความดันในห้องปฏิบัติการ เป็นต้น [12]

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณลักษณะต่างๆ ของฟิล์มเพชร

Property	MCD	NCD	UNCD
Growth Species	CH ₃	CH ₃	C ₂
Crystallinity	Columnar	Mixed Diamond & Non-Diamond	Equiaxed Diamond
Gas Ratio	H ₂ + CH ₄ 1%	H ₂ + CH ₄ > 5%	Ar + CH ₄
Grain Size	~0.5 - 10 μm	50 - 100 nm	3 - 5 nm
Surface Roughness	400 nm - 1 μm	50 - 100 nm	20 - 40 nm
Electronic Bonding	sp ³	Up to 50% sp ²	2 - 5 % sp ²
Hydrogen Contain	> 1%	> 1%	< 1%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 พิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์

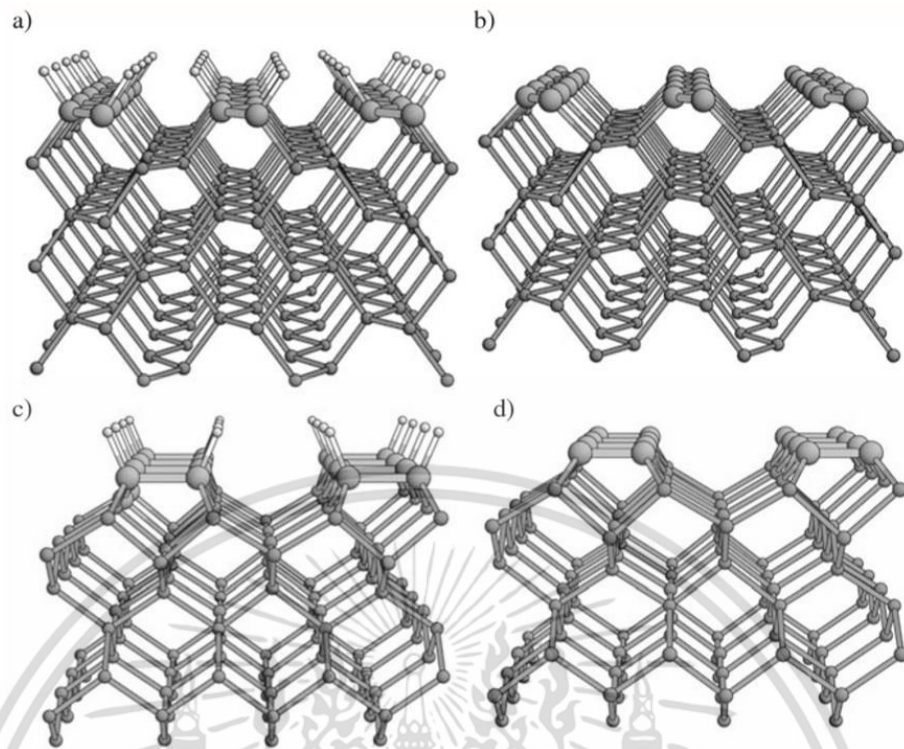
ฟิล์มเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยเทคนิค MPCVD ที่ใช้แก๊สมีเทนต่ออาร์กอน เมื่อพิจารณาโครงสร้างของฟิล์มเพชรพบว่ามีความประกอบไปด้วยผลึกที่มีขนาดเฉลี่ย 3 - 5 nm จำนวนมากประกอบกัน [13] ฟิล์มเพชรดังกล่าวถูกเรียกว่าฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์ ซึ่งแตกต่างจากฟิล์มเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยเทคนิค MPCVD ที่ใช้แก๊สไฮโดรเจนต่อไฮโดรคาร์บอน ซึ่งมีโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยผลึกที่มีขนาดเฉลี่ยอยู่ในระดับไมโครเมตร โดยกลไกการเกิดผลึกของการสังเคราะห์ฟิล์มทั้งสองแบบนี้มีลักษณะที่ต่างกันขึ้นอยู่กับปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนที่มีอยู่ในบรรยากาศของการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร โดยคาร์บอนไดเมอร์คือโมเลกุลที่ถูกพิจารณาว่าทำให้เกิดฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์ [14] ซึ่งฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์นั้นมีความแตกต่างเฉพาะที่แตกต่างไปจากเพชรในธรรมชาติและฟิล์มเพชรชนิดไมโครคริสตัลไลน์

2.7.1 การเกิดฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์บนพื้นผิวเพชรขนาด 100

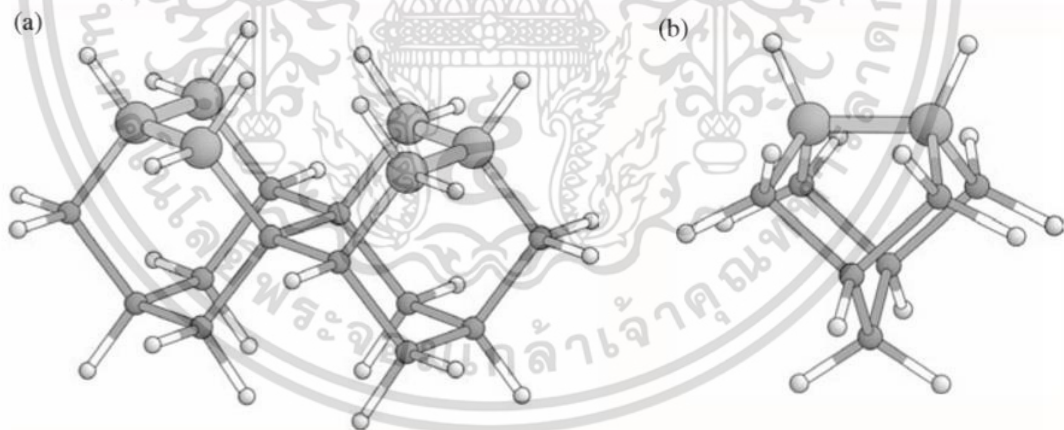
ได้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเกิดผลึกเพชรบนพื้นผิวเพชรขนาด 100 ด้วยคาร์บอนไดเมอร์ [15 - 18] โดยเชื่อกันว่าพื้นผิวเพชรขนาด 100 ซึ่งเป็นขนาดที่มีการก่อตัวของผลึกเพชรช้าที่สุดนั้นมีส่วนสำคัญในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์ เนื่องจากขนาด 100 ในขณะที่ทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรนั้น อะตอมของไฮโดรเจนที่มาเกาะบริเวณพื้นผิวมีปริมาณที่น้อย ซึ่งปริมาณอะตอมของไฮโดรเจนที่มีปริมาณน้อยนั้นเป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์ โดยการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดนี้ได้ใช้แก๊สอาร์กอนต่อมีเทน ซึ่งในขณะที่ทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรที่อุณหภูมิฐานรอง 700 - 900 °C จะทำให้อะตอมของไฮโดรเจนบางส่วนที่เกาะอยู่บนพื้นผิวเพชรหลุดออกไปซึ่งส่งผลให้กลไกการเกิดผลึกบนพื้นผิวเพชรนั้นแตกต่างกัน ดังนั้นจึงได้มีการพิจารณาการเกิดฟิล์มเพชรด้วยคาร์บอนไดเมอร์บนพื้นผิวเพชรที่มีอะตอมของไฮโดรเจนเกาะอยู่ (Monohydried) และพื้นผิวเพชรที่ไม่มีอะตอมของไฮโดรเจนเกาะอยู่ (Unhydried)

2.7.1.1 พื้นผิวเพชรที่มีอะตอมไฮโดรเจน

ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับเกี่ยวกับปฏิกิริยาที่ทำให้คาร์บอนไดเมอร์เข้าไปอยู่บนพื้นผิวของเพชรขนาด 100 ที่มีอะตอมไฮโดรเจนเกาะอยู่ [15] ดังรูปที่ 2.12 (c) โดยใช้ C_9H_{14} เป็นโมเลกุลเริ่มต้นในการศึกษาดังรูปที่ 2.13 (b) ซึ่งผลลัพธ์ของคาร์บอนไดเมอร์ที่ทำปฏิกิริยากับ C_9H_{14} นั้นมีหลายลักษณะ โดยรูปที่ 2.14 (a) แสดงถึงโครงสร้างของคาร์บอนไดเมอร์ที่ทำปฏิกิริยากับพันธะเดี่ยวระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอน (C-C) ได้โครงสร้างแบบ Carbene-Like และรูปที่ 2.14(b) แสดงถึงโครงสร้างของคาร์บอนไดเมอร์ที่ทำปฏิกิริยากับพันธะระหว่างคาร์บอนกับไฮโดรเจน (C-H) ได้โครงสร้างแบบ Cyclobutene-Like อย่างไรก็ตามการที่จะได้โครงสร้างทั้งสองแบบนี้ต้องผ่านปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดเมอร์กับพันธะระหว่างคาร์บอนกับไฮโดรเจนซึ่งเป็นปฏิกิริยาของ

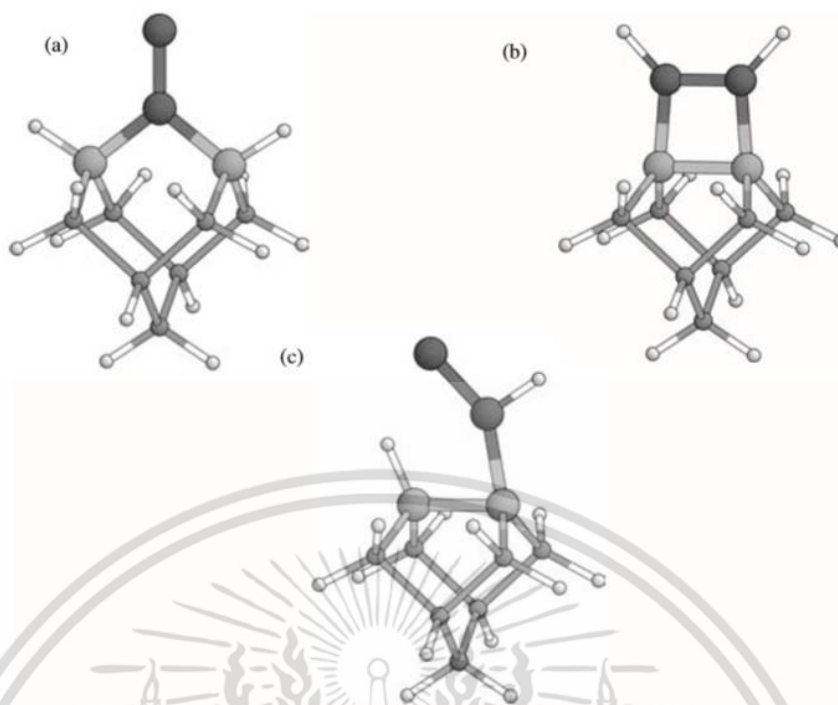


รูปที่ 2.12 ด้านข้างของโครงสร้างพื้นผิวเพชร (a) ระนาบ 110 ที่มีอะตอมไฮโดรเจน (b) ระนาบ 110 (c) ระนาบ 100 ที่มีอะตอมไฮโดรเจน (d) ระนาบ 100



รูปที่ 2.13 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับพื้นผิวเพชร (a) $C_{18}H_{22}$ ระนาบ 110 ที่มีอะตอมไฮโดรเจน (b) C_9H_{14} ระนาบ 100 ที่มีอะตอมไฮโดรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

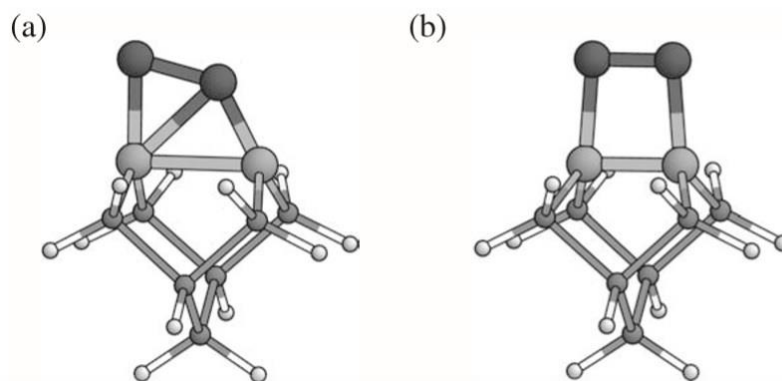


รูปที่ 2.14 โครงสร้างของคาร์บอนไดเมอร์ที่ทำปฏิกิริยากับ C_9H_{14} (a) โครงสร้าง Carbene-Like (b) โครงสร้าง Cyclobutene-Like (c) โครงสร้างในระหว่างเกิดปฏิกิริยาของ Vinylidene

Vinylidene ดังรูปที่ 2.14 (c) จากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาที่ทำให้ได้โครงสร้างทั้งสองแบบดังที่กล่าวมา แต่เนื่องจากค่าพลังงานของปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดโครงสร้าง Carbene-Like นั้น มีค่ามากกว่าค่าพลังงานของปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดโครงสร้างแบบ Cyclobutene-Like ประมาณ 60 kcal/mol จึงทำให้โครงสร้างแบบ Cyclobutene-Like ถูกพิจารณาว่าเป็นโครงสร้างที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดเมอร์กับพื้นผิวเพชรระนาบ 100 ที่มีอะตอมของไฮโดรเจนเกาะอยู่

2.7.1.2 พื้นผิวเพชรที่ไม่มีอะตอมไฮโดรเจน

ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดเมอร์กับพื้นผิวเพชรระนาบ 100 ที่มีอะตอมของไฮโดรเจน [15 - 17, 19] ดังรูปที่ 2.12 (d) โดยใช้แบบจำลองของ C_9H_{12} พบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นจะทำให้ได้โครงสร้างแบบ Carbene-Like ดังรูปที่ 2.15 (a) และโครงสร้างแบบ Cyclobutene-Like ดังรูปที่ 2.15 (b) แต่เนื่องจากโครงสร้างแบบ Cyclobutene-Like นั้น จะต้องใช้พลังงานมากกว่าโครงสร้างแบบ Carbene-Like 33 kcal/mol จึงทำให้โครงสร้างแบบ Carbene-Like ถูกพิจารณาว่าเป็นโครงสร้างที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดเมอร์กับพื้นผิวเพชรระนาบ 100 ที่มีอะตอมของไฮโดรเจนเกาะอยู่



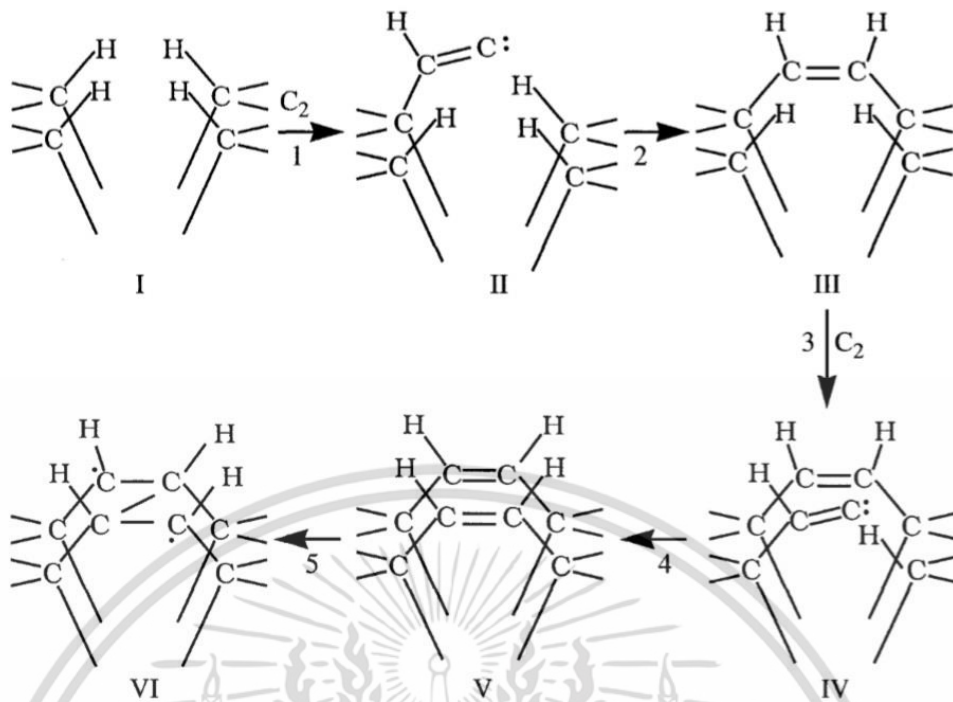
รูปที่ 2.15 โครงสร้างของคาร์บอนไดเมออร์ที่ทำปฏิกิริยากับ C_9H_{12} (a) โครงสร้าง Carbene-Like (b) โครงสร้าง Cyclobutene-Like

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดเมออร์กับพื้นผิวเพชรขนาด 100 นั้นขึ้นอยู่กับปริมาณของอะตอมไฮโดรเจนที่เกาะอยู่บนพื้นผิวเพชร โดยจะได้โครงสร้างแบบ Cyclobutene-Like บนพื้นผิวเพชรขนาด 100 ที่มีอะตอมของไฮโดรเจนเกาะอยู่ ในขณะที่โครงสร้างแบบ Carbene-Like นั้นได้จากพื้นผิวเพชรขนาด 100 ที่ไม่มีอะตอมไฮโดรเจน

ผลจากการศึกษาปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดเมออร์กับพื้นผิวเพชรขนาด 100 ที่มีและไม่มีอะตอมไฮโดรเจนเกาะอยู่แสดงได้สองกรณี โดยกรณีแรกพื้นผิวเพชรขนาด 100 ที่ไม่มีไฮโดรเจนเกาะอยู่จะทำให้เกิดรีนิวคลีเอชันและเกิดการโตขึ้นของผลึก กรณีที่สองพื้นผิวเพชรขนาด 100 ที่มีไฮโดรเจนเกาะอยู่จะทำให้เกิดการโตขึ้นของผลึกแต่ไม่ทำให้เกิดรีนิวคลีเอชัน แต่เนื่องจากพื้นผิวเพชรขนาด 100 เป็นขนาดที่มีอะตอมไฮโดรเจนเกาะอยู่บนพื้นผิวจำนวนน้อย จึงทำให้เกิดรีนิวคลีเอชันเกิดขึ้นมากกว่าขนาดอื่น ส่งผลให้ผลึกเพชรที่ได้นั้นมีขนาดเล็กซึ่งเป็นฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์ ดังนั้นการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดนี้จึงต้องทำให้มีปริมาณไฮโดรเจนในบรรยากาศน้อยที่สุดเพื่อทำให้เกิดรีนิวคลีเอชันและลดการโตขึ้นของผลึก

2.7.2 การเกิดฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์บนพื้นผิวเพชรขนาด 110

ได้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเกิดผลึกเพชรบนพื้นผิวเพชรขนาด 110 ด้วยคาร์บอนไดเมออร์ [20 - 21] ดังรูปที่ 2.12 (a, b) ซึ่งลำดับขั้นตอนการเกิดผลึกเพชรนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 2.16 โดยเริ่มจากคาร์บอนไดเมออร์เข้าไปแทนที่อะตอมไฮโดรเจนที่เกาะอยู่กับอะตอมคาร์บอน (I, II) จากนั้นโมเลกุลที่เกิดขึ้นจะไปแทนที่อะตอมไฮโดรเจนที่เกาะอยู่กับคาร์บอนอีกตัวได้โครงสร้างแบบ Ethylene-Like (III) จากนั้นโมเลกุลดังกล่าวจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลที่มีโครงสร้าง Ethylene-Like อีกตัวหนึ่งที่เกิดขึ้น (IV, V) เกิดเป็นโครงสร้างที่ทำให้เกิดการก่อตัวของผลึกเพชร (VI)



รูปที่ 2.16 ลำดับการเกิดผลึกเพชรบนพื้นผิวเพชรระนาบ 110 ด้วยคาร์บอนไดเมอร์

ฟิล์มเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์ในบรรยากาศที่ไม่มีไฮโดรเจนจะมีลักษณะไม่เป็น Columnar เหมือนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรโพลีคริสตัลไลน์ทั่วไป โดยอะตอมที่อยู่บริเวณขอบเขตผลึกทำให้เกิดสถานะอิเล็กทรอนิกส์ในแถบต้องห้าม เกิดคุณลักษณะทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชรชนิดอัลตราโนคริสตัลไลน์ ในการศึกษาโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์บริเวณขอบเขตผลึกฟิล์มเพชรชนิดอัลตราโนคริสตัลไลน์ซึ่งประกอบไปด้วยพันธะ sp^2 ทั้งหมด ดังนั้นโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์จึงถูกอธิบายคุณลักษณะด้วยสถานะ π ในแถบต้องห้าม

2.8 ฟิล์มเพชรชนิดอัลตราโนคริสตัลไลน์เจือไนโตรเจน

ได้มีผลการศึกษาเกี่ยวกับอะตอมของไนโตรเจนที่อยู่ในฟิล์มเพชรด้วยการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรเจือไนโตรเจนในพลาสมาที่ทำให้เกิดอะเซทิลีน เช่น พลาสมาของมีเทนต่ออาร์กอน พบว่าโมเลกุลชนิดที่ทำให้อะตอมของไนโตรเจนสามารถเข้าไปอยู่ในฟิล์มเพชร คือ CN และ HCN [22 - 23] โดยปฏิกิริยาเคมีที่ทำให้เกิด CN แสดงได้ดังสมการ

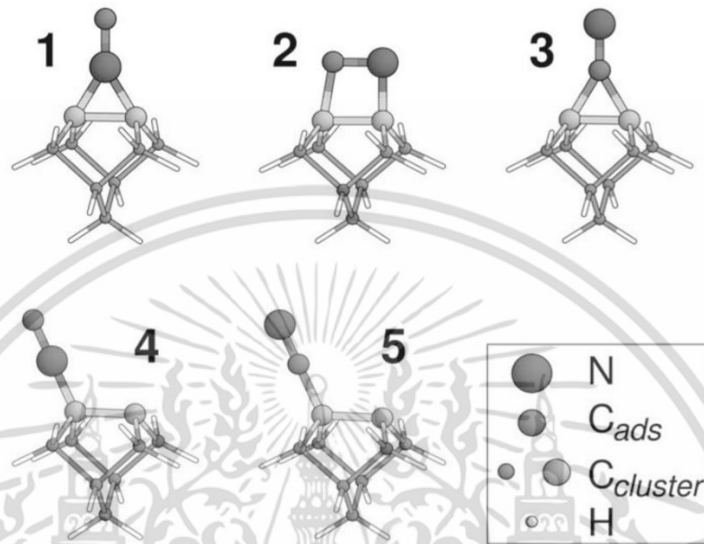


หรือ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึงแม้ว่าทั้ง CN และ HCN จะถูกพิจารณาว่าเป็นโมเลกุลที่ทำให้อะตอมของไนโตรเจนสามารถเข้าไปอยู่ในฟิล์มเพชรได้ แต่โดยมากแล้วโมเลกุลของ CN จะถูกพิจารณาว่าเป็นไปได้มากกว่าโมเลกุลของ HCN [22]



รูปที่ 2.17 โครงสร้างของ CN ที่ทำปฏิกิริยากับ $C_{60}H_{12}$

เมื่อทำการเติมแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในระบบ ผลจากการศึกษาพบว่าแก๊สไนโตรเจนทำให้เกิดโมเลกุลของ CN และ C_2 โดยโมเลกุล CN จะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับปริมาณแก๊สไนโตรเจน ซึ่งโครงสร้างที่ได้จากปฏิกิริยาโดยใช้ $C_{60}H_{12}$ ในการศึกษาชิ้น [21] พบว่าโครงสร้างดังรูปที่ 2.17(5) เป็นโครงสร้างที่เกิดจาก CN ทำปฏิกิริยากับพื้นผิวเพชรโดยสร้างพันธะระหว่างคาร์บอนของ CN กับพื้นผิวเพชร ซึ่งโครงสร้างนี้มีพันธะที่แข็งแรงและความเสถียรมากกว่าโครงสร้างอื่นๆ จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ยาก ส่งผลให้เกิดการยับยั้งรีนิวเคลียชันทำให้ขนาดของผลึกมีขนาดที่โตขึ้น

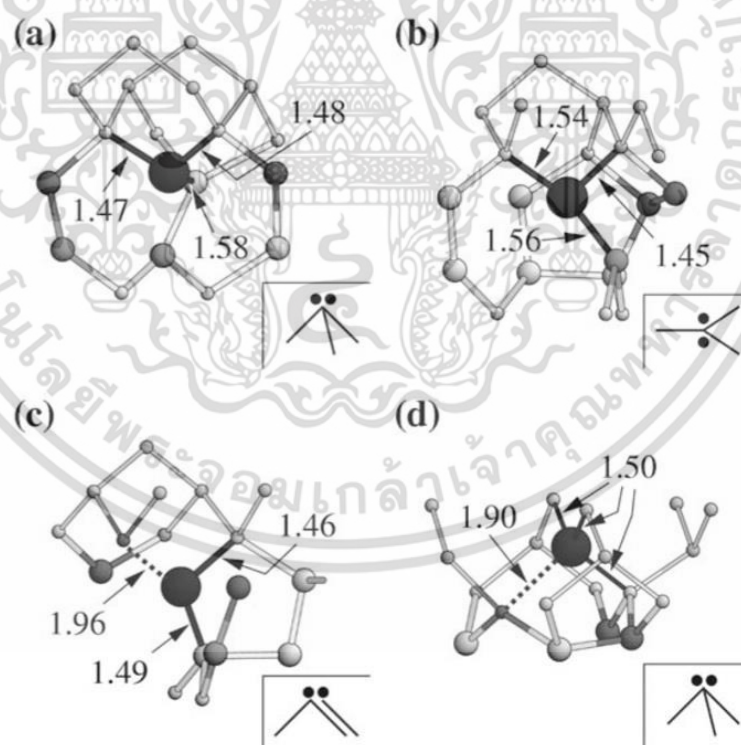
2.9 ระดับพลังงานอิเล็กทรอนิกส์ของฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์เจือไนโตรเจน

โดยปกติแล้วเพชรเป็นวัสดุที่ช่องว่างแถบพลังงาน 5.45 eV และเพชรบริสุทธิ์ที่ไม่มีสารเจือปนนั้นจะไม่นำไฟฟ้า อย่างไรก็ตามฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์นั้นจะมีคุณลักษณะที่แตกต่างเนื่องจากฟิล์มเพชรดังกล่าวเกิดจากผลึกของเพชรที่มีขนาดเล็ก 3 - 5 nm จำนวนมากประกอบกันทำให้มีขอบเขตผลึกในฟิล์มเพชร จึงทำให้คุณลักษณะทางอิเล็กทรอนิกส์แตกต่างไปจากเพชรบริสุทธิ์ที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียว หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือเพชรผลึกรูปเดี่ยวซึ่งในเนื้อเพชรจะไม่มีขอบเขตผลึก ดังนั้นคุณลักษณะทางอิเล็กทรอนิกส์ของฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์นั้นเกิดขึ้นที่บริเวณ

ขอบเขตผลึก ซึ่งเหมือนกับฟิล์มเพชรชนิดไมโครคริสตัลไลน์ แต่เนื่องจากขนาดของผลึกที่มีขนาดแตกต่างกันพันเท่า ทำให้คุณลักษณะของฟิล์มเพชรแตกต่างกัน

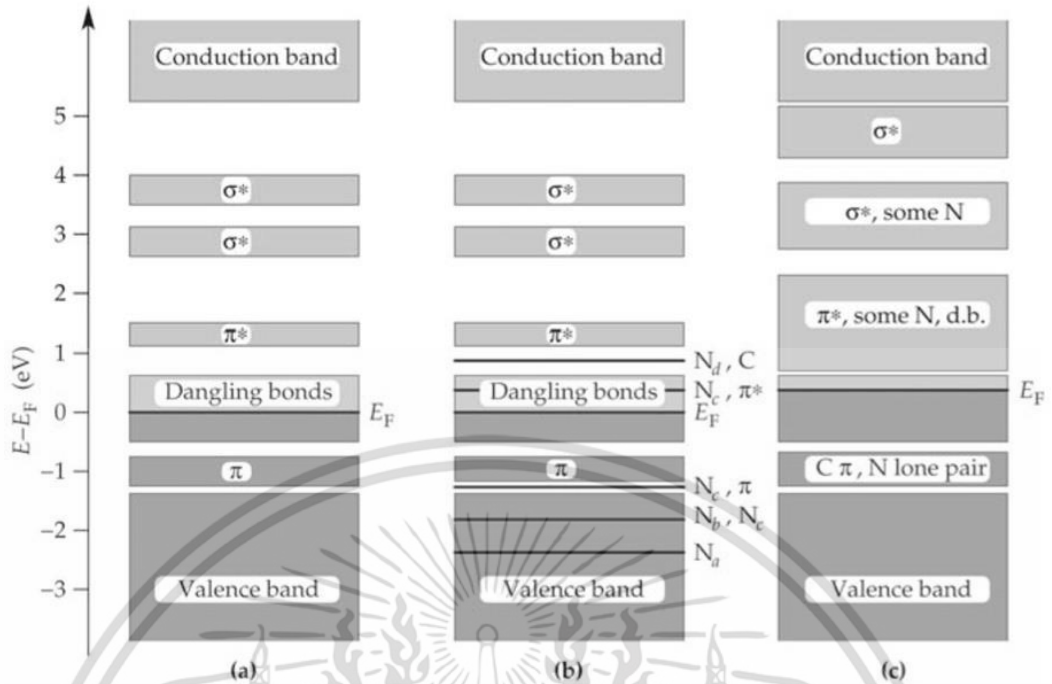
ผลของไนโตรเจนและไฮโดรเจนที่มีต่อการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์นั้น เป็นที่น่าสนใจ โดยปริมาณไฮโดรเจนนั้นมีผลต่อขนาดของผลึก ซึ่งปริมาณไฮโดรเจนที่น้อยนั้นจะทำให้เกิดฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์ การเติมแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในระบบในขณะที่ทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรจะทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่าความนำไฟฟ้าในฟิล์มเพชร โดยอะตอมของไนโตรเจนจะเข้าไปอยู่บริเวณขอบเขตผลึกซึ่งเป็นส่วนที่เกิดโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของฟิล์มเพชร จึงทำให้มีความนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นที่บริเวณขอบเขตผลึก

ได้มีการศึกษาทดลองพบว่าความเข้มข้นของไนโตรเจนที่อยู่ในฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์นั้นมีค่าอิมิตัวอยู่ที่ 0.2% ด้วยการเพิ่มปริมาณแก๊สไนโตรเจนในพลาสมาของการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร [24] ซึ่งอะตอมของไนโตรเจนที่อยู่บริเวณขอบเขตผลึกส่งผลให้ค่าความนำไฟฟ้าของฟิล์มเพชรชนิดนี้เพิ่มขึ้น โดยแบบจำลองโครงสร้างของอะตอมไนโตรเจนที่เข้าไปอยู่บริเวณขอบเขตผลึกแสดงได้ดังรูปที่ 2.18 ซึ่งโครงสร้างเหล่านี้ส่งผลให้เกิดแถบพลังงานขึ้นในช่องว่างแถบพลังงานแสดงได้ดังรูปที่ 2.19 ส่งผลให้ค่าความนำไฟฟ้าของฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.18 โครงสร้างจำลองของอะตอมไนโตรเจนที่เข้าไปอยู่บริเวณขอบเขตผลึก

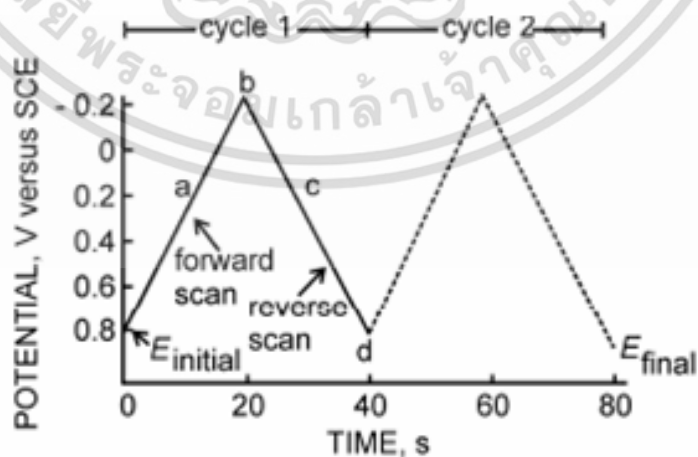
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



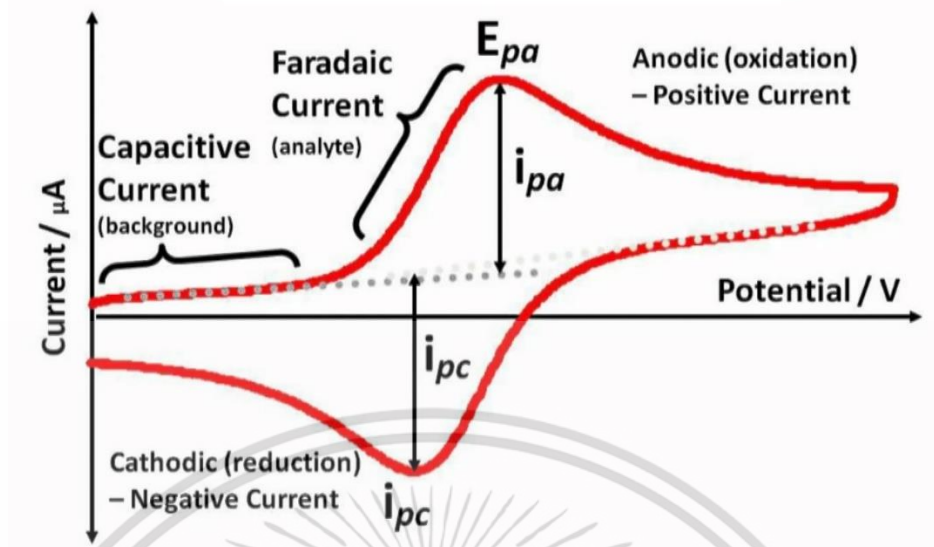
รูปที่ 2.19 แถบพลังงานบริเวณขอบเขตผลึกของฟิล์มเพชร (a) ไม่มีอะตอมไนโตรเจน (b) มีหนึ่งอะตอมไนโตรเจน (c) มีสี่หกอะตอมไนโตรเจน

2.10 ไชคลิกโวลแทมเมทรี

เป็นเทคนิคทางไฟฟ้าเคมีที่มีการให้ศักย์ไฟฟ้าเข้าไปด้วยอัตราเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ศักย์ไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุด จากนั้นจะค่อยๆ ลดลงด้วยอัตราเร็วที่เท่าๆ กัน โปรแกรมควบคุม ศักย์ไฟฟ้าที่ได้มีลักษณะเป็นสามเหลี่ยมหน้าจั่วลักษณะดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 การควบคุมศักย์ไฟฟ้าของไชคลิกโวลแทมเมทรี เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 โวลแทมโกรม

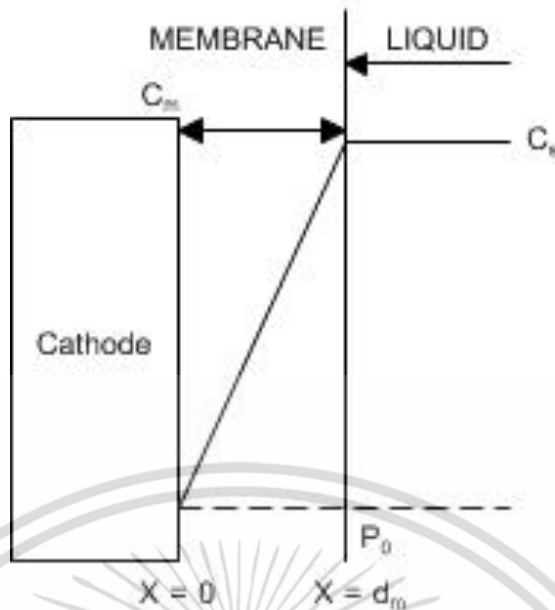
เมื่อเริ่มสแกนศักย์ไฟฟ้าก็เริ่มมีกระแสเกิดขึ้นเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าสูงสุดถึงยอดของสามเหลี่ยมจะมีการเกิดกระแสเนื่องจากรีดอกซ์เกิดปฏิกิริยาสูงสุดมีลักษณะเป็นยอดสัญญาณ และเมื่อลดศักย์ไฟฟ้าด้วยอัตราเร็วเท่าเดิมกระแสก็จะค่อยๆ ลดลงจนถึงต่ำสุดจะเกิดปฏิกิริยาในทิศทางตรงข้ามหรือผันกลับมีลักษณะเป็นยอดสัญญาณเช่นเดิมแต่กลับทิศทางจากเดิม โดยจะมีลักษณะที่สมมาตรกัน (Reversible) ดังรูปที่ 2.21 แต่จะไม่เกิดยอดสัญญาณถ้าปฏิกิริยาผันกลับไม่ได้ (Irreversible) แต่ถ้าปฏิกิริยาผันกลับได้แต่ไม่สมบูรณ์ยอดสัญญาณที่เกิดจะมีลักษณะไม่สมมาตร (Quasi Reversible)

2.11 แอมเปอร์เมทรี

เป็นวิธีการวิเคราะห์ที่ประยุกต์หลักการของโวลแทมเมทรี โดยให้ศักย์ไฟฟ้าคงที่แก่ขั้วไฟฟ้าทำงานอย่างเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาของสารตัวอย่างที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า เมื่อความเข้มข้นของสารตัวอย่างเพิ่มขึ้น ค่ากระแสไฟฟ้าจำกัดสูงสุดที่วัดได้จะแปรผันตรงกับความเข้มข้นของสารกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมาจากกระบวนการแพร่และการพาไอออนไปที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าทำงาน ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันของสารตัวอย่างที่ทำกรวิเคราะห์สำหรับองค์ประกอบที่สำคัญของหัววัดออกซิเจนในสารละลายแบบแอมเปอร์เมตริก

1. ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working Electrode)
2. ขั้วไฟฟ้าช่วย (Counter Electrode)
3. ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrode)
4. เยื่อเลือกผ่าน (Membrane)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 โมเดลการเกิดกระแสไฟฟ้าจำกัดของออกซิเจนในสารละลายแบบแอมเปอร์โรเมตริก

ในการพิจารณากระแสไฟฟ้าจำกัดสูงสุด สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 2.22 โดยกำหนดให้ C_s เป็นค่าความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลาย C_m ความเข้มข้นออกซิเจนที่แพร่ผ่านเยื่อเลือกผ่านมาที่บริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าทำงาน X เป็นระยะทางจากผิวหน้าขั้วไฟฟ้าทำงาน d_m เป็นความหนาเยื่อเลือกผ่าน P_0 เป็นค่าความดันของออกซิเจนในเนื้อของเหลว กระแสไฟฟ้าจำกัดที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าทำงานเป็นปฏิภาคโดยตรงกับจำนวนพลั๊กส์ออกซิเจนที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ดังนั้น

$$I = NFAD_m \left(\frac{\partial C_m}{\partial x} \right)_{x=0} \quad (2.12)$$

หรือ

$$I = NFAP_m \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{x=0} \quad (2.13)$$

เมื่อ N คือจำนวนของอิเล็กตรอนต่อ mol ของออกซิเจนในปฏิกิริยารีดักชัน

F คือค่าคงที่ฟาราเดย์มีค่า 96500 cal/mol

A คือพื้นที่ขั้วไฟฟ้าทำงาน

D_m คือค่าการแพร่ของออกซิเจนในเยื่อเลือกผ่าน

P_m คือค่าออกซิเจน Permeability ของเยื่อเลือกผ่าน

P เป็นค่าความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าของ P_m และ D_m มีความสัมพันธ์กันตามสมการ

$$P_m = D_m S_m \quad (2.14)$$

เมื่อ S_m เป็นค่าออกซิเจน Solubility ของเยื่อเลือกผ่านที่เงื่อนไขสถานะ Steady ของกระแสไฟฟ้าจำกัดสูงสุดที่สัมพันธ์กับความดันที่เยื่อเลือกผ่านแบบเชิงเส้น และกระแสไฟฟ้าจำกัดสูงสุดแปรผันโดยตรงกับความดันออกซิเจนในเนื้อของเหลวตั้งนั้น

$$I = NFAP_m (P_0/d_m) \quad (2.15)$$

และเวลาในการตอบสนองของปฏิกิริยาในการเกิดกระแสไฟฟ้าจำกัดกำหนดได้โดย

$$T = d_m^2/D_m \quad (2.16)$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่าการออกแบบให้เซ็นเซอร์แบบนี้มีการตอบสนองที่รวดเร็วต้องกำหนดให้เยื่อเลือกผ่านที่มีความบางมากๆ

สำหรับเซ็นเซอร์แบบแอมเปโรเมตริกมีผลที่ขึ้นกับอุณหภูมิ นั่นคือเมื่ออุณหภูมิของสารละลายสูงขึ้นกระแสไฟฟ้าจำกัดจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเซ็นเซอร์แบบนี้ทำงานภายใต้การควบคุมการแพร่ผ่านเยื่อเลือกผ่านค่ากระแสไฟฟ้าจำกัดจะมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่ขึ้นกับค่า P_m ดังสมการ

$$P_m = p_m^* \exp(-E^*/kT) \quad (2.17)$$

เมื่อ P_m^* เป็นค่า Permeability Coefficient ที่ขึ้นกับ Distribution Coefficient ของความร้อนในสารละลายกับออกซิเจน Diffusivity ในเยื่อเลือกผ่าน

E^* เป็นค่าผลรวมของพลังงานกระตุ้นของการแพร่และความร้อนของสารละลายที่เยื่อเลือกผ่าน

ดังนั้นเวลาในการตอบสนองของเซ็นเซอร์จะขึ้นกับอุณหภูมิ นั่นคือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าของ D_m จะมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้เซ็นเซอร์ตอบสนองได้รวดเร็วขึ้น การชดเชยอุณหภูมิจึงมีความจำเป็นมากเพื่อให้ค่าการวัดถูกต้อง ในการปฏิบัติจะมีการใช้อุปกรณ์เทอร์มิสเตอร์ชดเชยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการประมวลผลสัญญาณของเซ็นเซอร์ ในการออกแบบให้เซ็นเซอร์ลักษณะนี้มีค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นได้จะต้องเพิ่มพื้นที่ขั้วไฟฟ้าและลดความหนาของเยื่อเลือกผ่าน

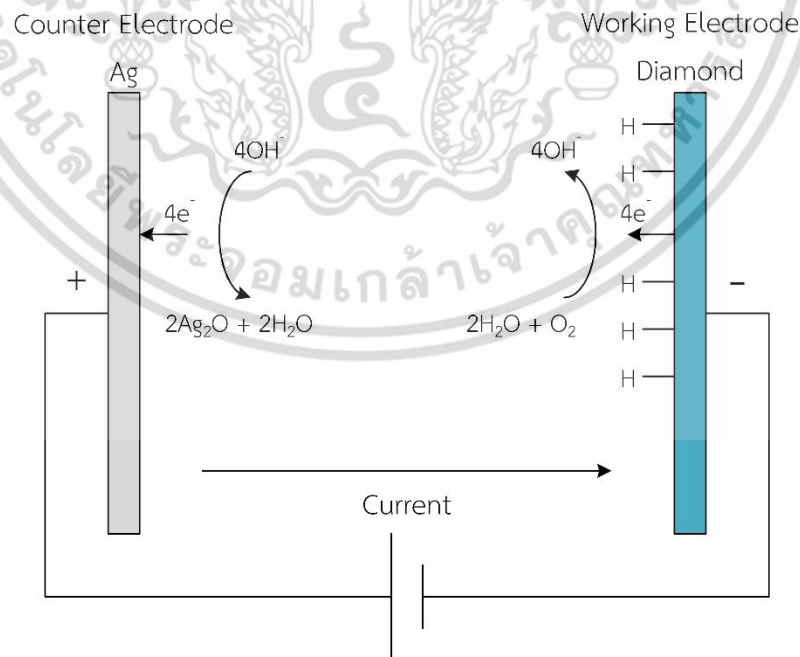
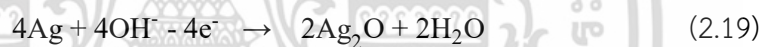
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12 หลักการตรวจวัดออกซิเจนในสารละลายแบบแอมเปอร์เมตริก

ในการวัดปริมาณออกซิเจนในสารละลายแบบแอมเปอร์เมตริก การใช้ขั้วไฟฟ้าแบบ 3 ขั้ว หรือ ขั้วไฟฟ้าแบบ 2 ขั้ว สารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.1 M KCl เมื่อได้รับการไบอัสศักย์ไฟฟ้าลบทำให้ KCl เกิดการแตกตัวเป็นโปแตสเซียมไอออนและคลอไรด์ไอออนกระจายทั่วไปในสารละลาย ออกซิเจนในสารละลายจะแพร่ไปขั้วไฟฟ้าคาโทดเพอร์ที่มีไฮโดรเจนอะตอมเกาะอยู่ที่ผิวหน้าทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน ที่ผิวสัมผัสของไฮโดรเจนอะตอมจึงมีการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากไฮโดรเจนอะตอมไปยังโมเลกุลของน้ำ ดังนั้นไฮโดรเจนอะตอมบนผิวหน้าของเพอร์จะแสดงประจุบวกซึ่งเหมือนกับการเกิดโฮลที่ความเลนท์อิเล็กตรอน เมื่อโมเลกุลของน้ำและออกซิเจนได้รับอิเล็กตรอนทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันมีการแตกตัวกลายเป็นไฮดรอกซิลไอออน (OH⁻) ดังสมการที่ 2.18



จากนั้น OH⁻ ที่มีประจุลบจะแพร่ไปยังขั้วไฟฟ้า Ag ที่มีศักย์ไฟฟ้าบวกทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับอะตอมของ Ag โดยการรับอิเล็กตรอนจาก OH⁻ ทำให้กลายเป็น Ag₂O เกาะที่ขั้วไฟฟ้าแอนอดดังสมการที่ 2.19 และเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าเคมีในระบบขึ้นดังรูปที่ 2.23

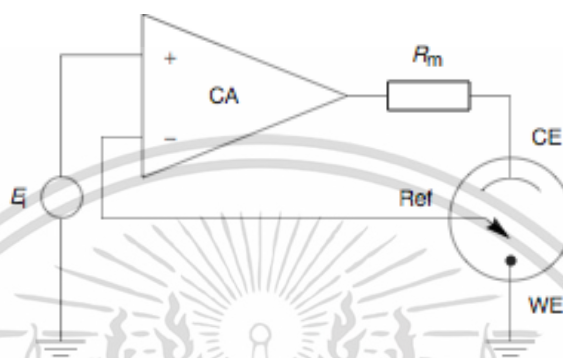


รูปที่ 2.23 การเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่ขั้วไฟฟ้าทำงานและขั้วไฟฟ้าช่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.13 โปเทนชิโอสแตท (Potentiostat)

เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการควบคุมขั้วไฟฟ้าเคมีทั้งสามขั้ว ซึ่งประกอบไปด้วย ขั้วไฟฟ้าทำงาน ขั้วไฟฟ้าช่วย และขั้วไฟฟ้าอ้างอิง โดยโปเทนชิโอสแตทจะทำการควบคุมศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าอ้างอิงกับขั้วไฟฟ้าทำงานให้มีศักย์ไฟฟ้าคงที่ด้วยการควบคุมกระแสไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้าช่วยดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 วงจรโปเทนชิโอสแตท

โปเทนชิโอสแตทถูกใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี เพื่อทดสอบหาปริมาณของสารที่สนใจ เช่น การตรวจวัดหาปริมาณออกซิเจนด้วยการป้อนศักย์ไฟฟ้าค่าหนึ่งในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ ผลที่ได้คือปริมาณกระแสไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นของปริมาณออกซิเจนที่ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ ทำให้สามารถที่จะวัดค่ากระแสไฟฟ้าเพื่อบอกถึงปริมาณของออกซิเจนได้

2.13.1 หลักการควบคุมศักย์ไฟฟ้าของวงจรโปเทนชิโอสแตทให้คงที่

หลักการควบคุมศักย์ไฟฟ้าของวงจรมันจะเป็นไปตามกฎของโอห์ม (Ohm's Law) เมื่อปริมาณสารที่สนใจในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เปลี่ยนแปลงไป จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์เปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้ความต้านทานในระบบเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้นเพื่อรักษาระดับศักย์ไฟฟ้าให้คงที่กระแสไฟฟ้าที่ถูกจ่ายเข้าไปในระบบจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไป โดยค่ากระแสไฟฟ้าจะแปรผกผันกับค่าความต้านทาน ดังสมการ

$$I_o = \frac{E_c}{R_v} \quad (2.20)$$

โดยที่ I_o คือ กระแสไฟฟ้าเอาท์พุท

E_c คือ ศักย์ไฟฟ้าคงที่

R_v คือ ความต้านทานของระบบ

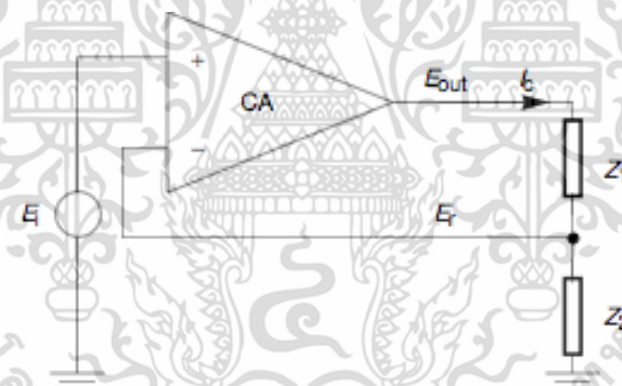
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับนักเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.13.2 หลักการทำงานของวงจรโพเทนชิโอสแตท

หลักการทำงานของวงจรโพเทนชิโอสแตท คือการหาค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบซึ่งประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้าทำงาน ขั้วไฟฟ้าช่วย และขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ที่อยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยมีศักย์ไฟฟ้าคงที่ค่าหนึ่งระหว่างขั้วไฟฟ้าทำงานและขั้วไฟฟ้าอ้างอิง เพื่อรักษาระดับแรงดันให้คงที่ จึงต้องมีขั้วไฟฟ้าช่วยทำหน้าที่ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าแทนขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ซึ่งสามารถหาค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายออกมาได้ด้วยการวัดค่าแรงดันตกคร่อมที่ความต้านทาน R_m ในรูปที่ 2.24 ที่อนุกรมอยู่กับขั้วไฟฟ้าช่วยแล้วหาค่ากระแสไฟฟ้าเอาต์พุต I ได้จากสมการ

$$I = \frac{V}{R_m} \quad (2.21)$$

โดยที่ I คือ ค่ากระแสไฟฟ้าเอาต์พุต
 V คือ ค่าแรงดันที่ตกคร่อม R_m
 R_m คือ ค่าความต้านทานที่อนุกรมอยู่กับขั้วไฟฟ้าช่วย



รูปที่ 2.25 วงจรโพเทนชิโอสแตทที่เซลล์ไฟฟ้าเคมีถูกแทนด้วยค่าอิมพีแดนซ์

วงจรควบคุมอัตราขยาย CA มีหน้าที่สำหรับควบคุมศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าช่วยและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงให้มีค่าใกล้เคียงกับแหล่งจ่ายแรงดัน E_i ให้มากที่สุด ด้วยการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบ

ในการอธิบายหลักการทำงานของวงจรมัน จะใช้วงจรออปแอมป์ (Opamp) เป็นวงจรควบคุมอัตราขยาย โดยให้ Z_1 และ Z_2 แทนค่าอิมพีแดนซ์ของระบบดังรูปที่ 2.25 โดยที่ Z_1 คือค่าผลรวมของความต้านทาน R_m อิมพีแดนซ์ที่รอยสัมผัสระหว่างขั้วไฟฟ้าช่วยกับสารละลาย และค่าความต้านทานของสารละลายระหว่างขั้วไฟฟ้าช่วยและขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Z_2 คือค่าผลรวมของอิมพีแดนซ์ที่รอยสัมผัสระหว่างขั้วไฟฟ้าทำงานกับสารละลาย และค่าความต้านทานของสารละลายระหว่างขั้วไฟฟ้าทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อคุณได้เห็นใบเซปรีเยชันนี้แล้ว กรุณาอย่าเผยแพร่ให้ผู้อื่นดู หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และขั้วไฟฟ้าอ้างอิง โดยหลักการของวงจรควบคุมอัตราขยายจะทำหน้าที่ในการขยายสัญญาณระหว่างอินพุตบวก (Noninverting) และอินพุตลบ (Inverting) ด้วยอัตราขยายค่าหนึ่งดังสมการ

$$E_{\text{out}} = A(E^+ - E^-) = A(E_i - E_r) \quad (2.22)$$

โดยที่ A คือ ค่าอัตราขยายของวงจรควบคุมอัตราขยาย
 E_i คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากแหล่งจ่ายแรงดัน
 E_r คือ ศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณขั้วไฟฟ้าอ้างอิง

เนื่องจากค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของออปแอมป์มีค่าสูงมากจึงสามารถพิจารณาได้ว่าไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วไฟฟ้าอ้างอิง จึงทำให้เหลือแต่กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน Z_1 กับ Z_2 ระหว่างขั้วไฟฟ้าทำงานและขั้วไฟฟ้าอ้างอิง จะได้สมการ

$$E_{\text{out}} = I_c(Z_1 + Z_2) \quad (2.23)$$

และ

$$E_r = I_c Z_2 \quad (2.24)$$

โดยที่ I_c คือ กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของขั้วไฟฟ้าช่วย

นำสมการที่ 2.23 ไปแทนในสมการที่ 2.24 จะได้สมการ

$$E_r = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} E_{\text{out}} = \beta E_{\text{out}} \quad (2.25)$$

เมื่อ

$$\beta = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (2.26)$$

นำสมการที่ 2.26 ไปแทนในสมการที่ 2.25 จะได้สมการ

$$\frac{E_r}{E_i} = \frac{\beta A}{1 + \beta A} \quad (2.27)$$

เนื่องจาก βA มีค่ามากกว่า 1 มากๆ จนสามารถพิจารณาได้ว่า

$$1 + \beta A = \beta A \quad (2.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำสมการที่ 2.28 ไปแทนในสมการที่ 2.27 จะได้สมการ

$$E_r = E_i \quad (2.29)$$

จากสมการที่ 2.29 แสดงให้เห็นว่าวงจรควบคุมอัตราขยายทำให้ศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าทำงานและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงมีค่าคงที่เท่ากับแหล่งจ่ายแรงดัน E_i



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

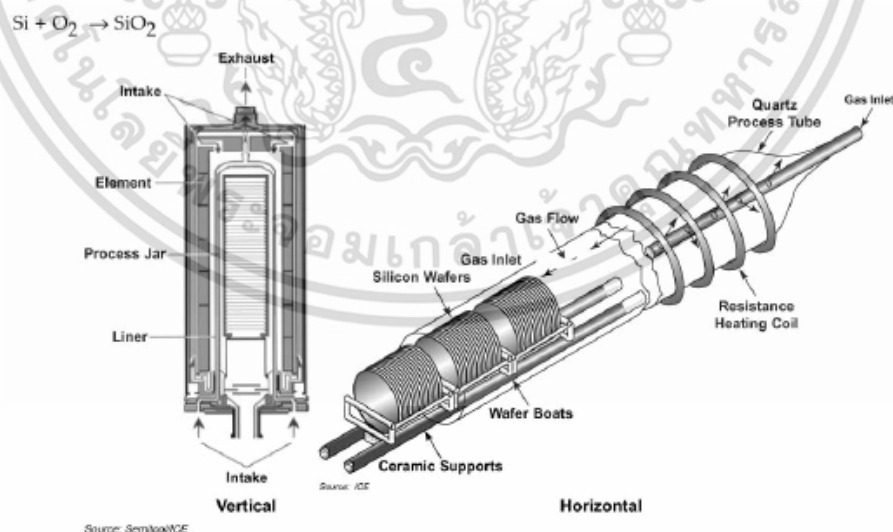
การออกแบบและการสร้าง

เนื้อหาในส่วนนี้จะกล่าวถึงเทคโนโลยีที่ใช้ในการสร้าง การออกแบบและการสร้างอุปกรณ์ซึ่งประกอบไปด้วยไฟฟ้าเคมีสำหรับใช้เป็นออกซิเจนในสารละลาย วงจรต่างๆ การประกอบเซ็นเซอร์และหัววัด เป็นต้น

3.1 เทคโนโลยีการสร้าง

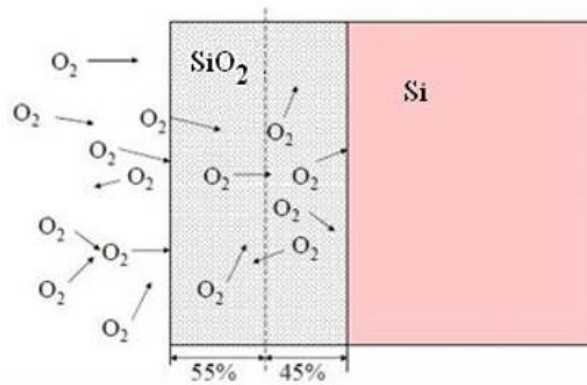
3.1.1 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation)

เป็นกระบวนการในการสร้างชั้นออกไซด์ลงบนแผ่นฐานรอง ซึ่งวิธีการในการสร้างชั้นออกไซด์ดังกล่าว เป็นวิธีการคล้ายกับการเกิดสนิม (Rusting) ที่ผิวของเหล็ก คือเมื่อเหล็กกระทบถูกออกซิเจนหรือน้ำก็จะทำให้เกิดสนิมได้ การสร้างออกไซด์บนแผ่นเวเฟอร์ที่เรียกว่ากระบวนการออกซิเดชันนี้เป็นกระบวนการในการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์โดยการนำแผ่นเวเฟอร์ใส่เข้าไปในท่อควอทซ์ (Quartz Tube) และใส่เข้าไปในเตาความร้อนที่มีอุณหภูมิประมาณ 1000 - 1200 °C มีออกซิเจนและไอน้ำฉีดพ่นเข้าไปในเตา ซิลิคอนจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนกลายเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂) ปกคลุมผิวของแผ่นเวเฟอร์ ซึ่งซิลิคอนไดออกไซด์นี้จะมีคุณสมบัติเป็นฉนวนลักษณะโปร่งใส สำหรับกระบวนการสังเคราะห์เพชรใช้สำหรับป้องกันการเกิดเพชรในขณะที่ทำการสังเคราะห์เพชร



รูปที่ 3.1 เตา Furnace ที่ใช้ในการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

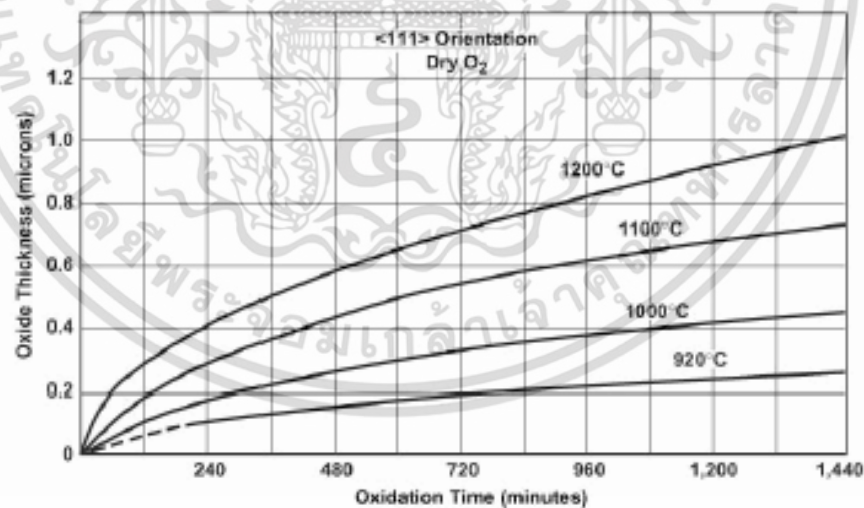


รูปที่ 3.2 ชั้นออกไซด์ที่ผิวหน้าของแผ่นฐานรอง

การสร้างซิลิคอนไดออกไซด์สามารถทำได้โดยวิธีการดังนี้

3.1.1.1 การออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation)

เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของแก๊สออกซิเจนที่บริสุทธิ์ กับอะตอมของซิลิคอนที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1100 °C อะตอมของซิลิคอนจะรวมตัวกับอะตอมของออกซิเจนจนเกิดเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ โดยซิลิคอนไดออกไซด์ที่ได้จากวิธีการนี้จะมีคุณสมบัติเป็นฉนวนที่ดีสำหรับความหนาของชั้น SiO_2 นี้สามารถพิจารณาได้จากกราฟรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา อุณหภูมิ และความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์สำหรับออกซิเดชันแบบแห้ง

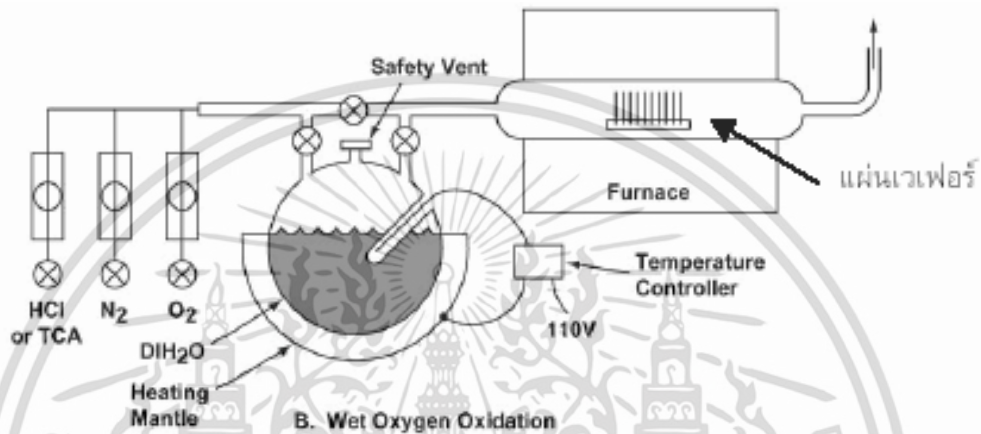
จากกราฟรูปที่ 3.3 ความหนาของชั้นออกไซด์จะสามารถควบคุมได้โดยการควบคุม

อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการออกซิเดชัน

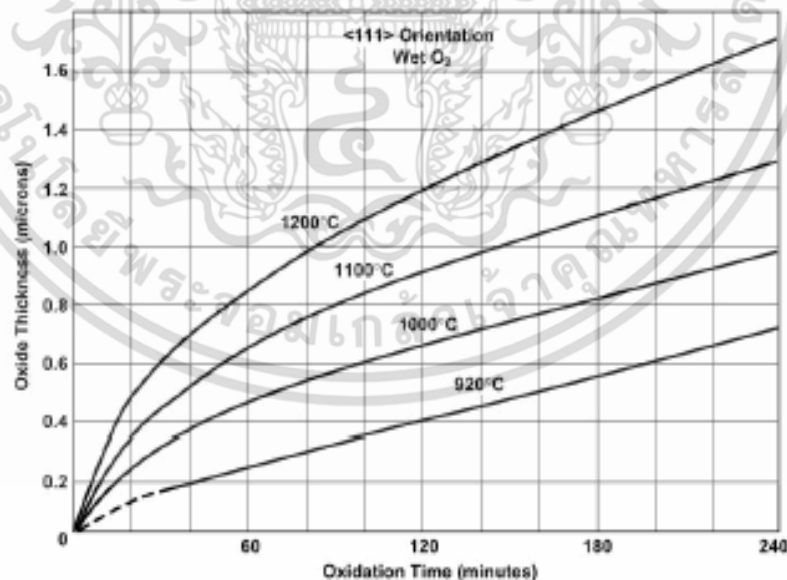
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.2 การออกซิเดชันแบบชื้น (Wet Oxidation)

เป็นปฏิกิริยาระหว่างอะตอมของซิลิคอนและอะตอมของออกซิเจนในไอน้ำโดยการปล่อยแก๊สออกซิเจนที่บริสุทธิ์เข้าไปในขวดแก้วที่บรรจุไอน้ำบริสุทธิ์ไว้ น้ำในขวดแก้วจะถูกทำให้ร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 90 - 95 °C แก๊สออกซิเจนซึ่งอิ่มตัวและมีไอน้ำอยู่ด้วยจะถูกทำให้ไหลผ่านเข้าไปในท่อควอทซ์ที่มีแผ่นเวเฟอร์วางอยู่ ทำให้อะตอมของออกซิเจนรวมตัวกับอะตอมของซิลิคอนจนเกิดเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำออกซิเดชันแบบชื้น



รูปที่ 3.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา อุณหภูมิ และความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์สำหรับออกซิเดชันแบบชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ได้จากการออกซิเดชันแบบชั้นจะสัมพันธ์กับเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ตั้งแสดงในกราฟรูปที่ 3.5

การหาความหนาของชั้นออกไซด์ สามารถบอกความหนาของชั้นออกไซด์ได้โดยการดูสีของชั้นออกไซด์จากการสะท้อนแสงฟลูออเรสเซนซ์ตรงๆ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.6

FILM THICKNESS (microns)	ORDER (5450 Å)	COLOR AND COMMENTS	FILM THICKNESS (microns)	ORDER (5450 Å)	COLOR AND COMMENTS
0.050		Tan	0.60		Carnation pink
0.075		Brown	0.63		Violet-red
0.100		Dark violet to red-violet	0.68		"Bluish" (not blue but borderline between violet and blue-green. It appears more like a mixture between violet-red and blue-green and over all looks grayish)
0.125		Royal blue			
0.150		Light blue to metallic blue			
0.175	I	Metallic to very light yellow-green			
0.200		Light gold or yellow - slightly metallic	0.72	IV	Blue-green to green (quite broad)
0.225		Gold with slight yellow-orange	0.77		"Yellowish"
0.250		Orange to melon	0.80		Orange (rather broad for orange)
0.275		Red-violet	0.82		Salmon
0.300		Blue to violet-blue	0.85		Dull, light red-violet
0.310		Blue	0.86		Violet
0.325		Blue to blue-green	0.87		Blue-violet
0.345		Light green	0.89		Blue
0.350		Green to yellow-green			
0.365	II	Yellow-green	0.92	V	Blue-Green
0.375		Green-yellow	0.95		Dull yellow-green
0.390		Yellow	0.97		Yellow to "yellowish"
			0.99		Orange
0.412		Light orange	1.00		Carnation pink
0.426		Carnation pink	1.02		Violet-red
0.443		Violet-red	1.05		Red-violet
0.465		Red-violet	1.06		Violet
0.476		Violet	1.07		Blue-violet
0.480		Blue-violet			
0.493		Blue	1.10		Green
0.502		Blue-green	1.11		Yellow-green
0.520		Green (broad)	1.12	VI	Green
0.540		Yellow-green	1.18		Violet
0.560	III	Green-yellow	1.19		Red-violet
0.574		Yellow to "yellowish" (Not yellow but is in the position where yellow is to be expected. At times it appears to be light creamy gray or metallic)	1.21		Violet-red
			1.24		Carnation pink to salmon
			1.25		Orange
			1.28		"Yellowish"
0.585		Light orange or yellow to pink borderlines	1.32	VII	Sky blue to green-blue
			1.40		Orange
			1.45		Violet
			1.46		Blue-violet
			1.50	VIII	Blue
			1.54		Dull yellow-green

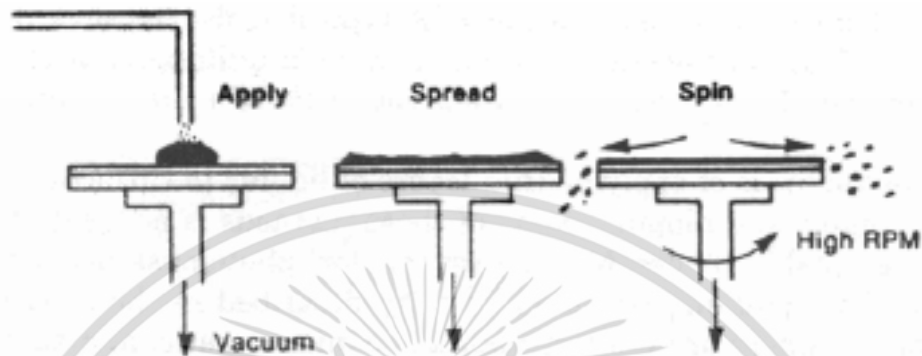
Note: For silicon nitride films, multiply the thickness obtained from this table by 0.75.

รูปที่ 3.6 ตารางเทียบสีของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนาต่างๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography)

เป็นกระบวนการที่เริ่มต้นจากการเคลือบสารไวแสง (Photoresist) ลงบนแผ่นเวเฟอร์โดยใช้วิธีการในการปล่อยน้ำยาไวแสงลงบนแผ่นเวเฟอร์และทำการหมุนแผ่นเวเฟอร์เพื่อเกลี่ยให้น้ำยาไวแสงคลุมพื้นที่ทั่วแผ่นดังแสดงในรูปที่ 3.7



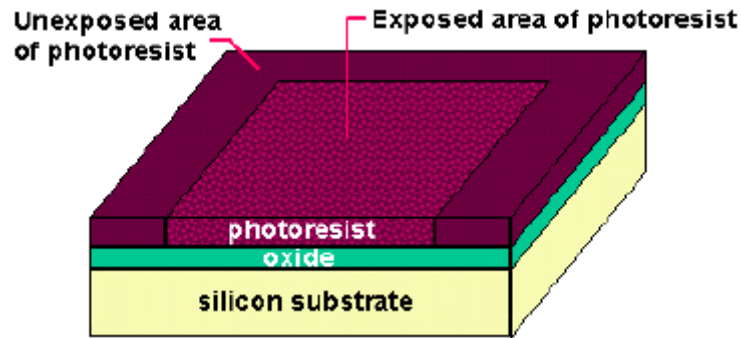
รูปที่ 3.7 การเคลือบน้ำยาไวแสงลงบนแผ่นเวเฟอร์

สารไวแสงหรือน้ำยาไวแสงนี้จะเปลี่ยนคุณสมบัติทางเคมีถ้าถูกแสง น้ำยาไวแสงดังกล่าวมีทั้งชนิดบวก (Positive Resist) และชนิดลบ (Negative Resist) นำแผ่นที่เคลือบสารไวแสงไปอบในเตาอบที่มีอุณหภูมิประมาณ 100 °C เพื่อทำให้น้ำยาไวแสงยึดติดกับผิวหน้าของแผ่นเวเฟอร์ได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งจะได้แผ่นเวเฟอร์ที่มีชั้นของน้ำยาไวแสงเคลือบอยู่ดังรูปที่ 3.8 หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปฉายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตผ่านโฟโตมาสก์ (Photo Mask) ไปตกกระทบบนแผ่นเวเฟอร์เพื่อให้เกิดรูปแบบที่ต้องการบนแผ่นเวเฟอร์นี้ ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.8 การเคลือบผิวหน้าด้วยน้ำยาไวแสง (Photoresist)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

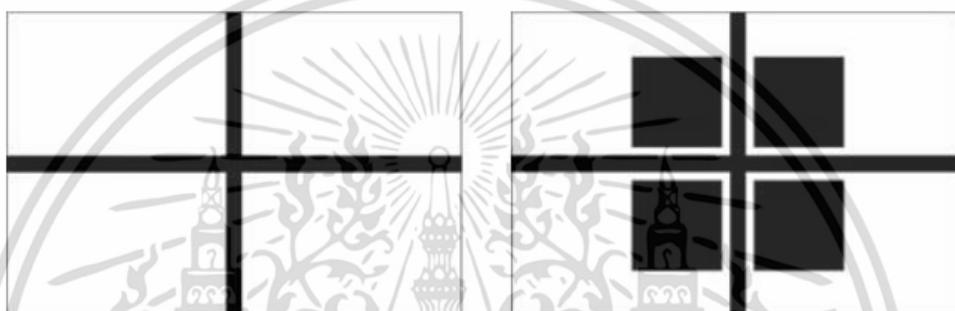


รูปที่ 3.9 ส่วนที่ถูกแสงและส่วนไม่ถูกแสงอัลตราไวโอเล็ต

หลังจากที่ฉายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตแล้วจะนำแผ่นเวเฟอร์ไปทำการล้าง (Develop) เอาส่วนของน้ำยาไวแสงที่ไม่ต้องการออกไป ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับว่าใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวกหรือชนิดลบ ถ้าใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวกเมื่อนำไปล้างส่วนที่ถูกแสงจะถูกกัดออกไป แต่ถ้าเป็นน้ำยาไวแสงแบบลบเมื่อนำไปล้างส่วนที่ถูกแสงจะยังคงอยู่

การฉายแสงผ่านกระจกโฟโตมาส์ก ซึ่งโดยปกติจะถูวางทาบทับลงไปบนแผ่นเวเฟอร์ที่เคลือบน้ำยาไวแสง ในกรณีที่เป็นกระจกโฟโตมาส์กชิ้นแรกหรือมาส์กที่ 1 สามารถทำได้โดยไม่ต้องมีการปรับซ้อนมาส์ก ทั้งนี้เนื่องจากยังไม่ได้มีการสร้างส่วนใดส่วนหนึ่งของวงจรรวมบนแผ่นเวเฟอร์เลย แต่ในกรณีที่แผ่นเวเฟอร์นั้นได้ผ่านการสร้างมาบ้างแล้ว การสร้างส่วนใหม่ต่อไปจำเป็นที่จะต้องสร้างให้อยู่ในตำแหน่งหรือบริเวณที่ต้องการเพื่อให้ได้โครงสร้างตามที่ต้องการไว้ ดังนั้นการใช้กระจกโฟโตมาส์กตั้งแต่มาส์กที่ 2 เป็นต้นไป ก่อนการฉายแสงจำเป็นจะต้องมีการปรับซ้อนมาส์กเพื่อให้แบบลวดลายบนกระจกมาส์กซ้อนกับแบบลวดลายที่มีอยู่บนแผ่นเวเฟอร์ อย่างไรก็ตามเนื่องจากภาพลวดลายของวงจรรวมมีขนาดเล็กมาก ดังนั้นในการปรับซ้อนจึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ช่วยซึ่งเรียกว่า “ตัวปรับซ้อนมาส์ก” (Mask Aligner) ซึ่งอาศัยหลักการง่ายๆ คือ แผ่นเวเฟอร์จะถูกวางและติดไว้กับแท่นเลื่อน (x-y-z Table) ซึ่งสามารถปรับเลื่อนในแนวนอน (x) แนวตั้งฉาก (y) และแนวสูง (z) ได้ การปรับเลื่อนนี้ทำได้ทั้งแนว x, y และ z นอกจากนี้ยังสามารถปรับหมุนแผ่นผลึกได้โดยรอบ โดยใช้ไมโครมิเตอร์ที่มีความละเอียดสูง ส่วนกระจกโฟโตมาส์กจะถูกยึดให้อยู่เหนือเวเฟอร์เล็กน้อย และด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์สังเกตภาพลวดลายที่ปรากฏทั้งบนแผ่นและบนโฟโตมาส์ก พร้อมปรับเลื่อนแผ่นเวเฟอร์ทั้งแกน x, y และมุมจนกระทั่งภาพลวดลายที่ปรากฏบนแผ่นเวเฟอร์บนโฟโตมาส์กซ้อนกันตรงตำแหน่งที่ต้องการ จากนั้นจึงปรับให้แผ่นเวเฟอร์เลื่อนสูงขึ้นในแกน z จนแนบสนิทกับกระจกโฟโตมาส์ก ในทางปฏิบัติเพื่อให้การปรับซ้อนทำได้จึงมีการใช้ภาพลวดลายซึ่งออกแบบขึ้นเพื่อใช้สำหรับการปรับซ้อนมาส์กโดยเฉพาะและเรียกว่า “เครื่องหมายปรับซ้อน” (Alignment Mark) ดังรูปที่ 3.10 ซึ่งอาจจะเป็นภาพจัตุรัสในกล่องสี่เหลี่ยม (Square in Box) กากบาทในสี่เหลี่ยม หรือสี่เหลี่ยมในกากบาท เช่น ภาพลวดลายในแผ่นเวเฟอร์ของเครื่องหมายปรับซ้อน เป็นรูปจัตุรัสและภาพลวดลายบนกระจกมาส์กเป็นรูปกล่องสี่เหลี่ยม เป็นต้น การปรับซ้อนทำได้โดยการปรับเลื่อนแผ่นผลึก บนแท่นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ในเชิงพาณิชย์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้อยู่ในตำแหน่งที่ได้ภาพจตุรัสเข้าไปซ้อนอยู่พอดีภายในภาพกล่องสี่เหลี่ยมดังรูปที่ 3.10 ในตำแหน่งนี้ภาพลวดลายในแผ่นเวเฟอร์และบนกระจกโฟโตมาส์กจะอยู่ตรงตำแหน่งที่ถูกทุกประการ ถ้าหากปรับซ้อนตำแหน่งผิดพลาดโครงสร้างก็จะไม่ถูกต้องและเกิดการเสียหายได้ ขั้นตอนของการปรับซ้อนจึงเป็นเรื่องสำคัญมากการพิมพ์ด้วยการใช้กระจกโฟโตมาส์กมาวางทับลงบนแผ่นเวเฟอร์ให้แนบสนิทแล้วฉายแสงซึ่งเรียกว่าวิธี Contact Printing จะเห็นได้ว่าการสัมผัสกันระหว่างแผ่นเวเฟอร์และกระจกโฟโตมาส์ก ซึ่งอาจทำให้เกิดรอยขีดข่วนหรือความเสียหายต่างๆ ได้ เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงมีวิธีการพิมพ์แบบอื่นๆ เช่น วิธี Proximity Printing หรือวิธี Projection Printing ซึ่งกระจกโฟโตมาส์กจะไม่สัมผัสกับผิวหน้าของแผ่นเวเฟอร์เลยจึงลดความเสียหายต่างๆ ที่จะเกิดขึ้นได้



รูปที่ 3.10 ลวดลายเครื่องหมายปรับซ้อน

3.1.3 การสร้างซิลิคอนไนไตรด์

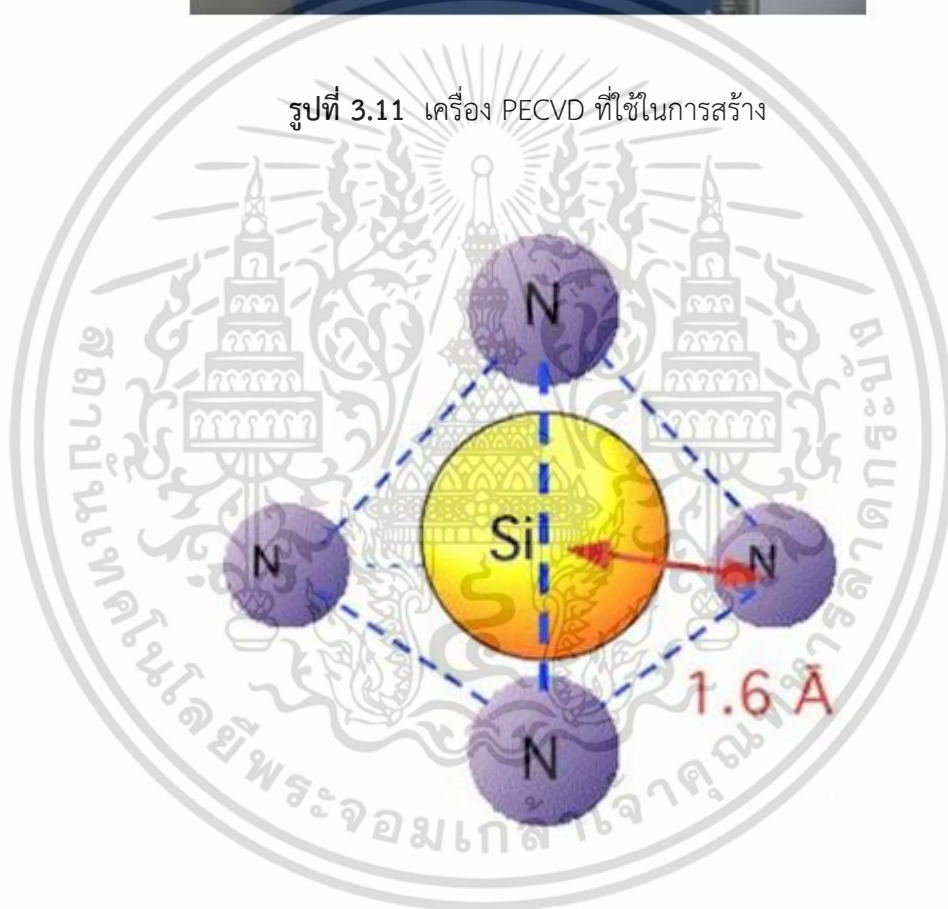
ในกระบวนการสร้างซิลิคอนไนไตรด์ได้มาจากการใช้พลาสมาสร้าง โดยทำหน้าที่ป้องกันการเกิดขึ้นซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อที่จะใช้เป็นพื้นที่ในการสังเคราะห์เพชร โดยใช้ระบบ PECVD ใช้แก๊ส SiH_4 , H_2 , N_2 และใช้คลื่น RF ที่ความถี่ 13.5 MHz ในการสร้าง สมการที่ 3.1 แสดงการเกิดซิลิคอนไนไตรด์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 เครื่อง PECVD ที่ใช้ในการสร้าง



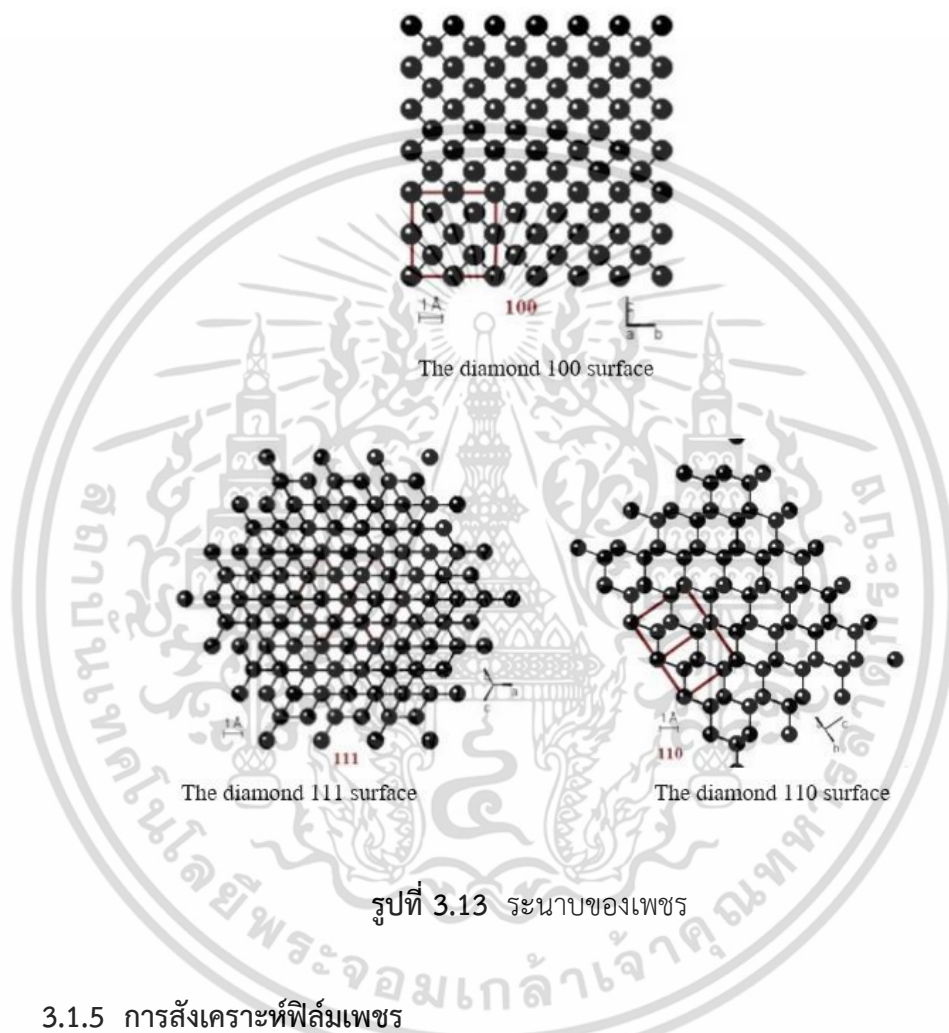
รูปที่ 3.12 พันธะของซิลิคอนไนไตรด์

3.1.4 การเตรียมแผ่นฐานรอง

สำหรับการสังเคราะห์เพชรจะมีพื้นผิวที่สามารถเกาะเกี่ยวและเกิดเพชรบนพื้นผิวระนาบ 100 ระนาบ 111 และระนาบ 110 ดังรูปที่ 3.13 โดยการเกิดเพชรในแต่ละระนาบจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและองค์ประกอบของแก๊ส โดยระนาบ 100 เป็นระนาบเพชรที่เรียบที่สุด การสังเคราะห์เพชรในการวิจัยนี้ได้กำหนดฐานรองในการสังเคราะห์เพชรเป็นซิลิคอน เนื่องจากเป็นวัสดุที่ใช้ในการสร้างอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารกึ่งตัวนำต่างๆ ก่อนที่จะนำฐานรองไปใช้ในการสังเคราะห์เพชรนั้นต้องมีการเตรียมฐานรองก่อน โดยขัดด้วยครีมเพชรที่มีผงเพชรขนาด $0.25 \mu\text{m}$ การขัดฐานรองจะขัดในลักษณะวนไปรอบๆ เป็นเวลาประมาณ 20 นาที หลังจากขัดเสร็จเรียบร้อยแล้ว นำแผ่นไปทำความสะอาด โดยเพชรจะถูกสร้างลงบนฐานรองซิลิคอนที่ขัดผิวหน้าด้วยครีมเพชรเพื่อให้ง่ายต่อนิวเคลิเอชันของผลึกเพชรโดยการเกิดเพชรจะเริ่มต้นเกิดที่รอยขัดก่อนจากนั้นจึงเริ่มขยายขึ้นเรื่อยๆ

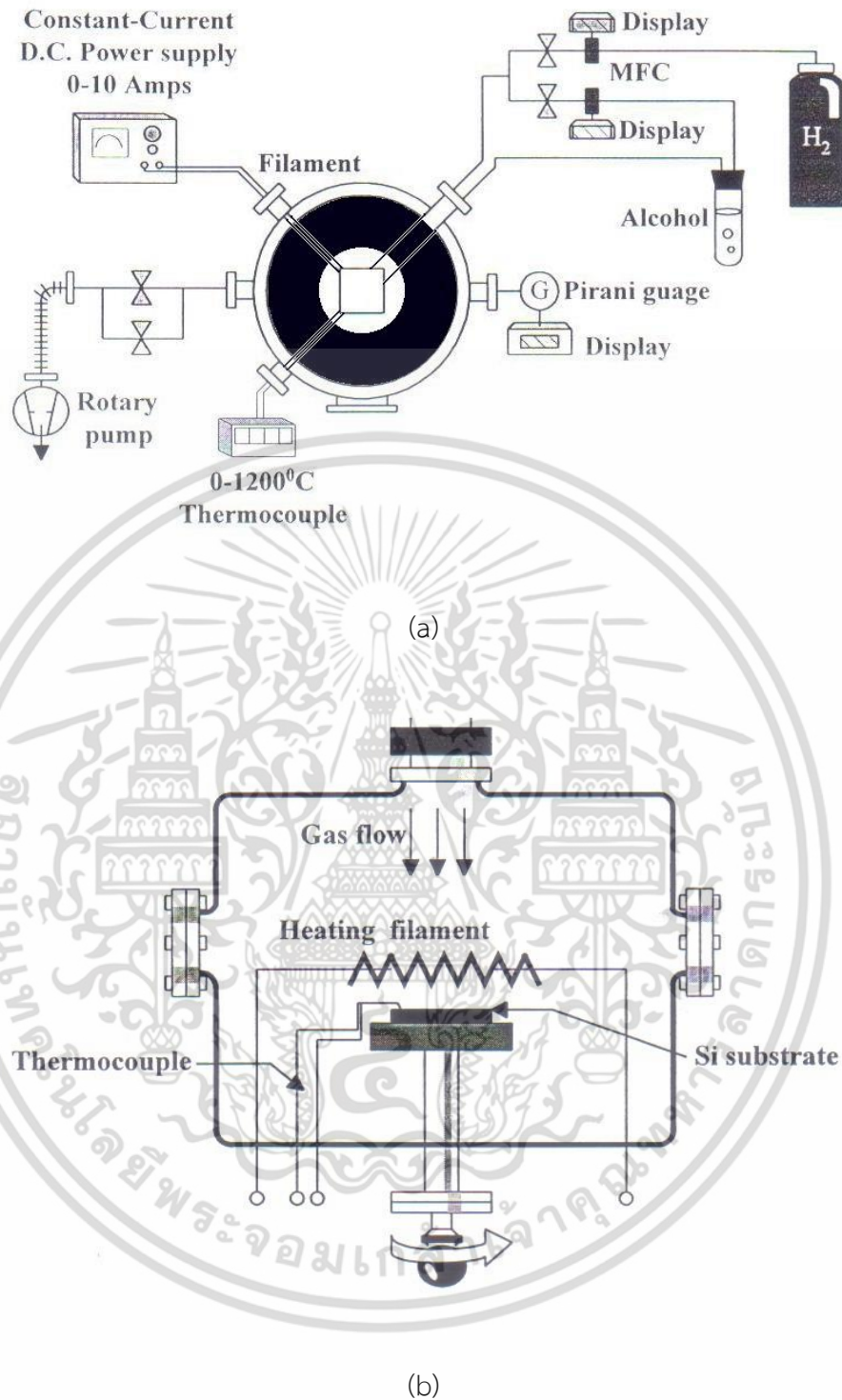


รูปที่ 3.13 ระนาบของเพชร

3.1.5 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

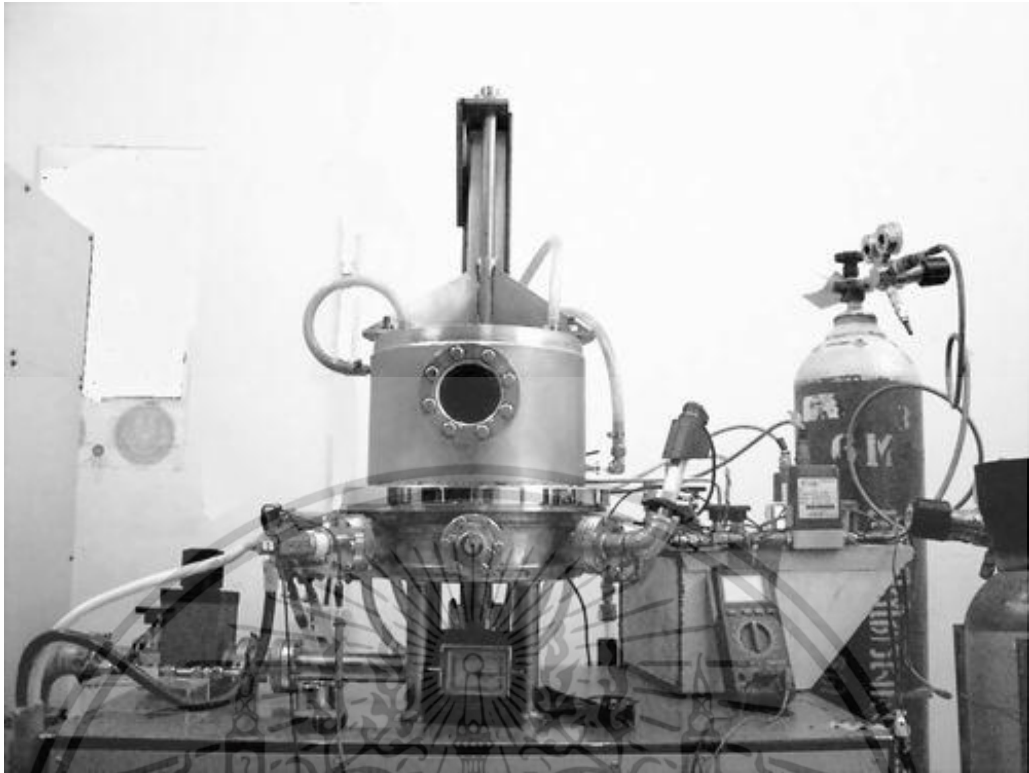
ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดไมโครคริสตัลไลน์จะทำการสังเคราะห์แบบ HFCVD โดยใช้แหล่งจ่ายคาร์บอนเป็นไอระเหยของเอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) ใช้ Thermocouple เป็นตัววัดอุณหภูมิที่ฐานรอง ใช้ลวดทั้งเสตนในการให้ความร้อนมีระยะห่างกับฐานรอง 4 mm ใช้ Mass Flow Controller (MFC) ในการควบคุมอัตราไหลของแก๊ส และควบคุมความดันด้วย Priani Gauge

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

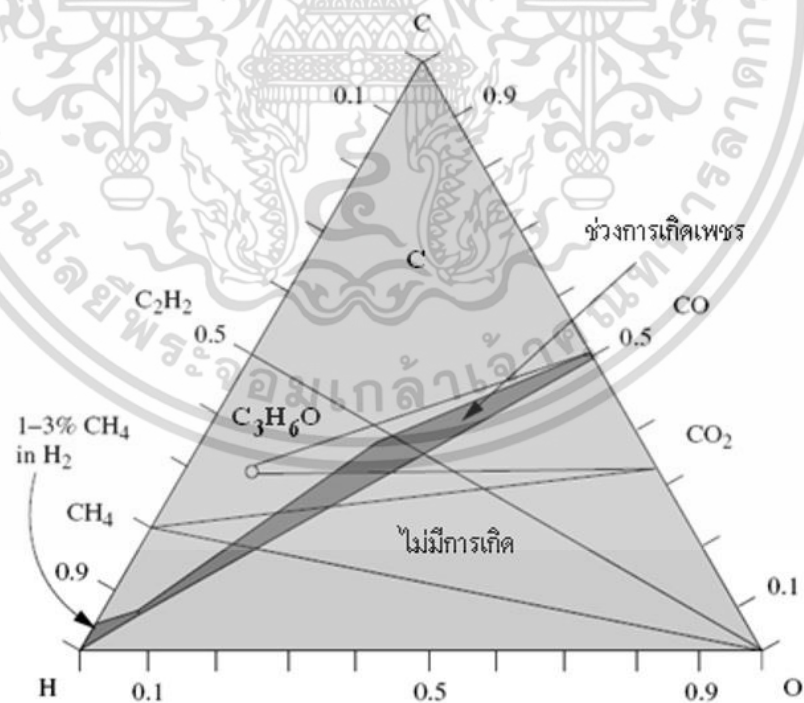


รูปที่ 3.14 แผนภาพโตอะแกรมของระบบเครื่องสังเคราะห์ฟิล์มเพชรแบบลวดความร้อน
(a) ภาพด้านบน (b) ภาพตัดขวางด้านหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 เครื่องสังเคราะห์ฟิล์มเพชรแบบ HFCVD



รูปที่ 3.16 ไดอะแกรมสามเหลี่ยม C-H-O Bachmann

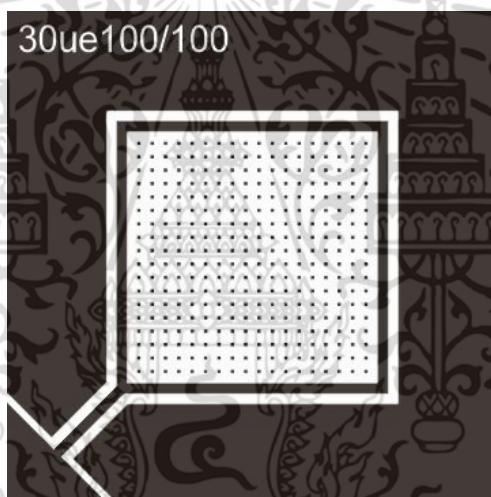
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การสร้างขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชร

การสร้างขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชรที่ใช้ในการทดลองนั้น ได้ทำการสร้างขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชร 2 ชนิด ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชรชนิดโมโนคริสตัลไลน์เจือโบรอนซึ่งมีขั้วไฟฟ้าอ้างอิงและขั้วไฟฟ้าช่วยอยู่ภายในตัว และขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชรชนิดอัตรานาโนคริสตัลไลน์เจือไนโตรเจนซึ่งมีขั้วไฟฟ้าอ้างอิงและขั้วไฟฟ้าช่วยอยู่ภายนอก

3.2.1 การสร้างขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชรชนิดโมโนคริสตัลไลน์เจือโบรอน

กำหนดออกแบบให้ขั้วไฟฟ้าเคมีที่ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าเพชรเจือโบรอนเป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน ขั้วไฟฟ้าเงินเป็นขั้วไฟฟ้าช่วย และขั้วไฟฟ้า เงิน/เงินคลอไรด์ เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ตั้งอยู่บนพื้นที่ฐานรองซิลิคอนดังรูปที่ 3.17 กำหนดตำแหน่งและพื้นที่โลหะเงินของขั้วไฟฟ้าช่วยและขั้วไฟฟ้าอ้างอิง โดยให้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงมีขนาดความกว้าง $100\ \mu\text{m}$ ล้อมรอบขั้วไฟฟ้าทำงานและมีระยะห่าง $100\ \mu\text{m}$ จากขั้วไฟฟ้าทำงานและขั้วไฟฟ้าช่วย



รูปที่ 3.17 ลักษณะของขั้วไฟฟ้าเพชรชนิดโมโนคริสตัลไลน์เจือโบรอน

สำหรับขั้นตอนการสร้างขั้วไฟฟ้ามีดังนี้

3.2.1.1 การเตรียมแผ่นซิลิคอนเริ่มต้น

เป็นขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นฐานรอง โดยใช้แผ่นซิลิคอนชนิดพีระนาบ 100 สภาพต้านทาน $0.001\ \Omega\text{-cm}$ ความหนา $410\ \mu\text{m}$ นำมาตัดให้ได้ขนาดกว้าง $2.3 \times 2.3\ \text{cm}^2$ มีขั้นตอนทำความสะอาดแผ่นฐานรองดังนี้

1. ทำความสะอาดพื้นผิวโดยการต้มฐานรองไนโตรคลอโรเอทิลีนเป็นเวลา 5 นาที
2. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำ DI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. นำไปอัลตราโซนิกในอะซิโตนเป็นเวลา 3 นาที
4. เป่าชิ้นงานให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน
5. อบชิ้นงานเพื่อกำจัดความชื้นอุณหภูมิ 120 °C ใช้เวลา 30 นาที

3.2.1.2 การสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

ในขั้นตอนนี้เป็น การสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อเป็นฉนวนป้องกันการเกิดเพชรในบริเวณที่ไม่ต้องการ มีขั้นตอนการสร้างดังนี้

1. ปรับอุณหภูมิเตาความร้อน 1000 °C วัดด้วยเทอร์โมคัปเปิล
2. จ่ายแก๊สออกซิเจนประมาณ 1000 sccm สำหรับ Dry Oxidation ใช้เวลาทั้งหมดในการสังเคราะห์ประมาณ 6 ชั่วโมง ได้ความหนาประมาณ 2000 Å สีของซิลิคอนไดออกไซด์ที่ได้จะมีสีเหลืองทอง



รูปที่ 3.18 จำลองแผ่นซิลิคอนที่สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ 2000 Å

3.2.1.3 กระบวนการสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

เมื่อทำการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เสร็จแล้ว จะทำสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บริเวณผิวหน้าออกเพื่อที่จะทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรขึ้นบริเวณนี้ โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ทำความสะอาดชิ้นงานโดยจุ่มในสารเคมีอะซิโตนพร้อมสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ใช้เวลา 5 นาที
2. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำ DI 2 ครั้ง
3. เป่าชิ้นงานให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน
4. อบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 120 °C ใช้เวลา 30 นาที
5. เคลือบชิ้นงานด้วยน้ำยาไวแสง AZ 1350
6. อบชิ้นงานที่เคลือบน้ำยาไวแสงแล้วที่อุณหภูมิ 95 °C ใช้เวลา 20 นาที
7. สกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ออกโดยจุ่มชิ้นงานในสารเคมีไฮโดรเจนฟลูออไรด์ผสมกับสารเคมีแอมโมเนียฟลูออไรด์อัตราส่วน 1:5 เป็นเวลา 3 นาที
8. ล้างชิ้นงานในน้ำ DI 2 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. เป่าชิ้นงานให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน
10. ล้างน้ำยาไวแสงออกโดยจุ่มชิ้นงานในสารเคมีอะซิโตนพร้อมทำให้สั้นด้วยเครื่องอัลตราโซนิก ใช้เวลา 5 นาที
11. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำ DI 2 ครั้ง
12. ทำความสะอาดชิ้นงาน

Si

รูปที่ 3.19 จำลองแผ่นซิลิคอนที่ถูกกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บริเวณผิวหน้า

3.2.1.4 การขัดผิวด้านหน้า

ขั้นตอนนี้เป็นการเตรียมผิวหน้าฐานรองโดยการขัดด้วยครีมเพชร เพื่อเพิ่มความหนาแน่นนิวเคลียเอชันในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร มีขั้นตอนดังนี้

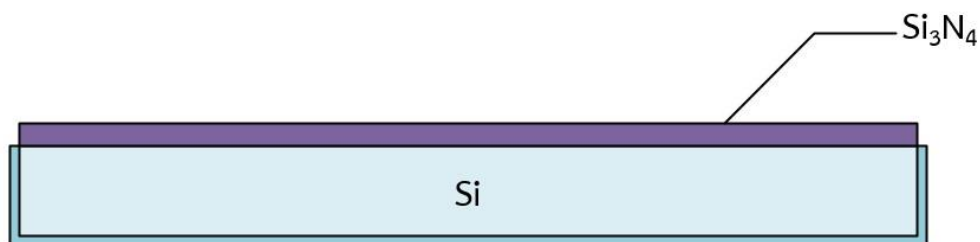
1. ขัดด้วยครีมเพชรขนาด 0.25 μm เป็นเวลา 30 นาที
2. ทำความสะอาดชิ้นงาน

3.2.1.5 กระบวนการสร้างซิลิคอนไนไตรด์

เมื่อขัดผิวหน้าเสร็จแล้วก็จะสร้างซิลิคอนไนไตรด์ด้วยเครื่อง PECVD เพื่อที่จะทำการสร้างมาส์กซิลิคอนไดออกไซด์ต่อไป โดยซิลิคอนไนไตรด์จะทำหน้าที่ป้องกันการเกิดซิลิคอนไดออกไซด์ทำให้ได้มาส์กซิลิคอนไดออกไซด์เป็นลวดลายตามที่ต้องการ โดยมีกระบวนการสร้างซิลิคอนไนไตรด์ดังนี้

1. ปรับอุณหภูมิฐานรอง 300 °C วัตด้วยเทอร์โมคัปเปิลที่สัมผัสอยู่ใต้ผิวของฐานรองซิลิคอน
3. จ่ายแก๊สไนโตรเจนอัตราการไหล 50 sccm
4. จ่ายแก๊สไซเรนอัตราการไหล 10 sccm
5. ควบคุมความดันสุญญากาศในห้องปฏิกิริยาให้ได้ความดัน 0.35 Torr
6. จ่ายกำลังไฟฟ้าให้แผ่นเพลตความถี่ RF 30 W ทำให้เกิดการแตกตัวของแก๊สไซเรนและแก๊สไนโตรเจน ได้ความหนาประมาณ 1500 Å สีของชั้นซิลิคอนไนไตรด์ที่ได้มีสีเหลืองทอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



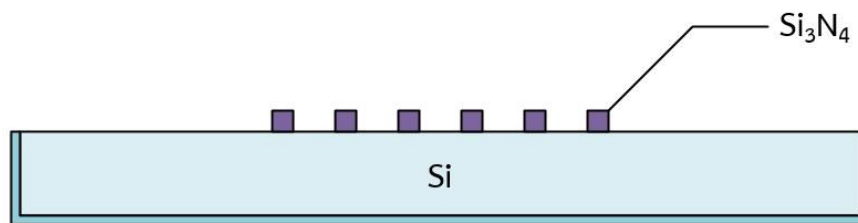
รูปที่ 3.20 จำลองแผ่นซิลิคอนที่ถูกสร้างชั้นซิลิคอนไนไตรด์

3.2.1.6 กระบวนการสร้างลวดลายด้านหน้า

หลังจากสร้างซิลิคอนไนไตรด์เสร็จก็จะสร้างลวดลายด้านหน้าโดยทำการสกัดชั้นซิลิคอนไนไตรด์ให้เหลือแต่บริเวณที่จะทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร โดยมีกระบวนการดังนี้

1. อบชิ้นงานเพื่อกำจัดความชื้นอุณหภูมิ 120 °C ใช้เวลา 30 นาที
2. เคลือบชิ้นงานด้านบนด้วยน้ำยาไวแสง AZ 1350 ด้วยเครื่อง Spinner ความเร็วรอบ 500 รอบ 5 วินาที และต่อด้วย 3000 รอบ 30 วินาที
3. อบชิ้นงานที่เคลือบน้ำยาไวแสงแล้วที่อุณหภูมิ 95 °C ใช้เวลา 20 นาที
4. ปรับซ็อนมาส์กและฉายแสง UV ใช้เวลา 20 วินาที
5. ล้างน้ำยาไวแสงที่ได้ฉายแสง UV แล้วด้วยสารเคมี Developer 400K ผสมกับน้ำอัตราส่วน 1:4 ใช้เวลา 30 นาที จะเหลือส่วนที่น้ำยาไวแสงที่ไม่โดนแสง UV เป็นลวดลายตามที่ต้องการ
6. ล้างน้ำ DI 2 ครั้ง
7. อบชิ้นงานที่ขึ้นลวดลายแล้วที่อุณหภูมิ 95 °C ใช้เวลา 5 นาที
8. เคลือบชิ้นงานด้วยน้ำยาไวแสง AZ 1350 ด้านล่าง
9. อบชิ้นงานที่เคลือบน้ำยาไวแสงแล้วที่อุณหภูมิ 95 °C ใช้เวลา 20 นาที
10. สกัดซิลิคอนไนไตรด์โดยจุ่มชิ้นงานในสารเคมีไฮโดรเจนฟลูออไรด์ผสมกับสารเคมีแอมโมเนียฟลูออไรด์อัตราส่วน 1:5 เป็นเวลา 4 นาที ถึง 5 นาที เพื่อสกัดซิลิคอนไนไตรด์บริเวณที่ไม่มีน้ำยาไวแสงปิดอยู่
11. ล้างชิ้นงานในน้ำ DI 2 ครั้ง
12. เป่าชิ้นงานให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน
13. ทำความสะอาดน้ำยาไวแสงโดยจุ่มชิ้นงานในสารเคมีอะซิโตนพร้อมสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคใช้เวลา 5 นาที
14. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำ DI 2 ครั้ง
15. ทำความสะอาดชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 จำลองแผ่นซิลิคอนที่ถูกสร้างชั้นซิลิคอนไนไตรด์ที่ขึ้นลวดลาย

3.2.1.7 การสร้างมาส์กซิลิคอนไดออกไซด์

เมื่อทำการสกัดชั้นซิลิคอนไนไตรด์เสร็จแล้ว จะทำการสร้างมาส์กซิลิคอนไดออกไซด์ โดยซิลิคอนไดออกไซด์จะไม่เกิดบริเวณที่มีซิลิคอนไนไตรด์ มีขั้นตอนการสร้างดังนี้

1. ปรับอุณหภูมิเตาความร้อน 1000 °C วัดด้วยเทอร์โมคัปเปิล
2. จ่ายแก๊สออกซิเจนประมาณ 1000 sccm สำหรับ Wet Oxidation ให้ได้ความหนาประมาณ 1.5 μm ซิลิคอนไดออกไซด์ที่ได้มีสีม่วงน้ำเงิน
3. สกัดซิลิคอนไนไตรด์โดยจุ่มชิ้นงานในสารเคมีไฮโดรเจนฟลูออไรด์ผสมกับสารเคมีแอมโมเนียฟลูออไรด์อัตราส่วน 1:5 เป็นเวลา 4 นาที ถึง 5 นาที



รูปที่ 3.22 จำลองแผ่นซิลิคอนที่ถูกสร้างมาส์กซิลิคอนไดออกไซด์

3.2.1.8 การสร้างขั้วไฟฟ้าทำงานชนิดไมโครคริสตัลไลน์เจือโบรอน

เป็นการสร้างขั้วไฟฟ้าทำงาน โดยทำการสังเคราะห์เพชรขึ้นด้วยเทคนิค CVD แบบลวดความร้อน ซึ่งผลึกเพชรจะเกิดขึ้นบริเวณที่ไม่มีซิลิคอนไดออกไซด์ ทำให้ได้ขั้วไฟฟ้าทำงานตามลวดลายที่ต้องการ โดยมีเงื่อนไขดังนี้

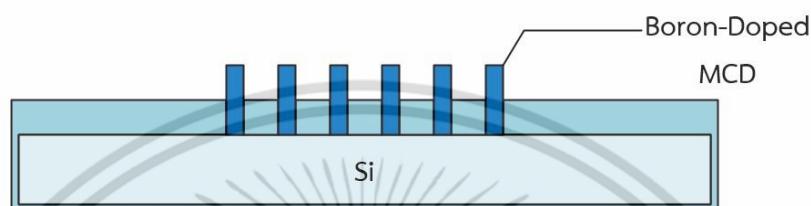
1. อุณหภูมิไส้ทั้งสแตน 2300 °C
2. ระยะห่างระหว่างไส้ลวดทั้งสแตนกับฐานรองซิลิคอน 4 mm ทำให้ได้อุณหภูมิฐานรอง 850 °C
3. อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 200 sccm ควบคุมโดย MFC
4. อัตราการไหล 2.5 sccm ของ $\text{H}_2 + \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + \text{B}_2\text{O}_3$ ที่ B/C 10000 ppm
5. ควบคุมความดันที่ 50 Torr วัดด้วย Pirani guage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เวลาในการสร้างฟิล์ม 6 ชั่วโมง ได้ฟิล์มเพชรความหนาประมาณ $5 \mu\text{m}$ อัตราการก่อตัวของผลึกเพชรประมาณ $0.8 \mu\text{m/hr}$

7. ทำความสะอาดฟิล์มเพชรโดยการต้มในสารละลายอิมตัวของ $\text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4$ ที่อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 10 นาที และต้มในสารละลาย $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{HN}_4\text{OH}$ ในอัตราส่วน 1:1 เป็นเวลา 5 นาที

8. เป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน



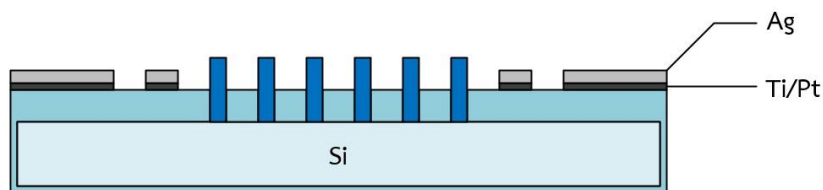
รูปที่ 3.23 จำลองแผ่นซิลิคอนที่ถูกสร้างขั้วไฟฟ้าเพชรเจือโบรอน

3.2.1.9 การสร้างขั้วไฟฟ้าโลหะ

ขั้นตอนนี้เป็นการสร้างขั้วไฟฟ้าโลหะให้เป็นลวดลายตามที่ต้องการโดยใช้เทคนิค Sputtering ซึ่งประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้าช่วยและขั้วไฟฟ้าอ้างอิง โดยจะใช้วัสดุเงินเป็นขั้วไฟฟ้าโลหะ มีชั้น Ti และ Pt เป็นชั้นประสานระหว่างโลหะเงินกับซิลิคอนไดออกไซด์ มีรายละเอียดการสร้างดังนี้

- นำชิ้นงานที่สังเคราะห์เพชรเรียบร้อยแล้ว ทำการเคลือบโลหะ Ti และ Pt ด้วยเครื่องเคลือบโลหะในสุญญากาศโดยเทคนิค Sputtering ให้ได้ความหนา 500 \AA และ 800 \AA ตามลำดับ
- ทำการเคลือบโลหะเงินด้วยเครื่องเคลือบโลหะในสุญญากาศโดยเทคนิค Evaporation ให้ได้ความหนา $1.5 \mu\text{m}$
- ทำการสร้างลวดลายขั้วไฟฟ้าโดยผ่านขั้นตอนลิโทกราฟีที่ให้น้ำยาไวแสงชนิดบวก 4620 ด้วยมาสก์ลวดลายขั้วไฟฟ้าโดย
- กัดชั้นโลหะเงินในสารละลายผสมโดยใช้สาร KI:I_2 อัตราส่วน 6:1 ใช้เวลาในการกัด 10 นาที ล้างด้วยน้ำ DI
- กัดชั้นโลหะ Pt ในสารละลายผสม HCl:HNO_3 ในอัตราส่วน 3:1 ใช้เวลาในการกัด 1 นาที ล้างด้วยน้ำ DI
- กัดชั้นโลหะ Ti ในสารละลายผสม $\text{H}_2\text{O:HF:H}_2\text{O}_2$ ในอัตราส่วน 20:1:1 เป็นเวลา 10 นาที ล้างด้วยน้ำ DI
- ทำการล้างน้ำยาไวแสง AZ 4620 ที่เหลือออกโดยใช้สารละลายอะซิโตน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

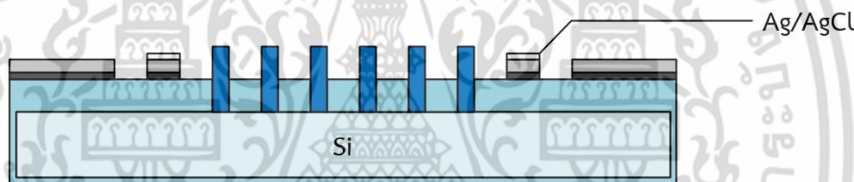


รูปที่ 3.24 จำลองแผ่นซิลิคอนที่ถูกสร้างขั้วไฟฟ้าโลหะ

3.2.1.10 การสร้างขั้วไฟฟ้าอ้างอิง

เมื่อทำการสร้างขั้วไฟฟ้าโลหะเสร็จแล้ว สำหรับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงจะสร้างชั้น AgCl ขึ้นมาด้วยการทำปฏิกิริยากับ FeCl_3 ความเข้มข้น 0.1 M มีรายละเอียดดังนี้

1. นำแผ่นชิ้นงานผ่านขั้นตอนลิโทกราฟีด้วยแบบลวดลายขั้วไฟฟ้าอ้างอิง
2. นำแผ่นชิ้นงานผ่านขั้นตอนการสร้างชั้น AgCl โดยให้ส่วนของโลหะ Ag ทำปฏิกิริยากับ 0.1 M ของ FeCl_3 เป็นเวลา 5 นาที ทำให้ได้ชั้น Ag/AgCl ของขั้วไฟฟ้าอ้างอิง



รูปที่ 3.25 จำลองแผ่นซิลิคอนที่ถูกสร้างขั้วไฟฟ้าอ้างอิง

3.2.2 การสร้างขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์เจือไนโตรเจน

ขั้นตอนการสร้างขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์เจือไนโตรเจนมีดังนี้

3.2.2.1 การเตรียมแผ่นซิลิคอนเริ่มต้น

เป็นขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นฐานรอง โดยใช้ฐานรองซิลิคอนชนิดพีระนาบ 100 สภาพต้านทาน $0.001 \Omega\text{-cm}$ ความหนา $410 \mu\text{m}$ มีรายละเอียดดังนี้

1. ทำความสะอาดด้วยการอัลตราโซนิกในอะซิโตนเป็นระยะเวลา 10 นาที
2. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำ DI
3. เป่าชิ้นงานให้แห้ง
4. จุ่มในกรดไฮโดรฟลูออริก 1% เป็นระยะเวลา 30 วินาที
5. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำ DI และเป่าชิ้นงานให้แห้ง
6. อบชิ้นงานเพื่อกำจัดความชื้นอุณหภูมิ $120 \text{ }^\circ\text{C}$ ใช้เวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2.2 การสร้างชั้นโลหะ

ในขั้นตอนนี้ได้ทำการสร้างชั้นโลหะสำหรับเชื่อมต่อกับลวดตัวนำ จากนั้นนำชิ้นงานไปตัดให้ได้ขนาดตามต้องการ โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ทำการ Sputtering ด้วยเป้า (Target) ไทเทเนียมให้ได้ความหนา 100 nm
2. ทำการ Sputtering ด้วยเป้าโมลิบดีนัมให้ได้ความหนา 1 μm
3. ทำการแอนนีสที่อุณหภูมิ 700 $^{\circ}\text{C}$
4. นำชิ้นงานไปตัดให้ได้ขนาด $2.5 \times 2.5 \text{ mm}^2$
5. ทำความสะอาดชิ้นงาน

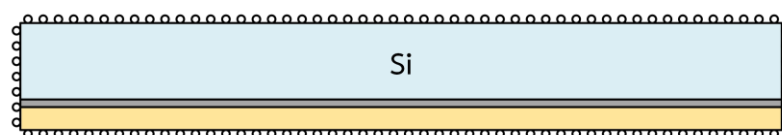


รูปที่ 3.26 จำลองแผ่นซิลิคอนที่ถูกสร้างชั้นโลหะ

3.2.2.3 การเตรียมผิวหน้า

ในขั้นตอนนี้ได้ทำการเตรียมผิวหน้าฐานรองเพื่อเพิ่มความหนาแน่นนิวเคลียสเอชชันด้วยการอัลตราโซนิคในสารละลายที่มีผงเพชรซึ่งเทคนิคนี้ทำให้สามารถเตรียมฐานรองที่มีขนาดเล็กได้ โดยจะทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรบนผิวหน้าซิลิคอน (ด้านที่ไม่มีชั้นโลหะ) มีขั้นตอนดังนี้

1. ทำการเตรียมผิวหน้าด้วยการนำไปอัลตราโซนิคในสารละลายที่มีส่วนผสมของผงเพชรขนาด 30 nm และสารละลาย DMSO (Dimethyl Sulfoxide) ต่อเมทิลแอลกอฮอล์ (CH_3OH) อัตราส่วน 1:1 ระยะเวลา 90 นาที เพื่อให้ผงเพชรเกาะอยู่บนชิ้นงาน
2. ทำความสะอาดด้วยน้ำ DI 2 ครั้ง และเป่าให้แห้ง
3. ทำความสะอาดด้วยการอัลตราโซนิคในอะซิโตนเป็นระยะเวลา 10 นาที
4. ทำความสะอาดแผ่นด้วยน้ำ DI และเป่าให้แห้ง



รูปที่ 3.27 จำลองฐานรองที่ถูกเตรียมผิวหน้าด้วยการอัลตราโซนิคในสารละลายที่มีผงเพชร เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2.4 การสร้างขั้วไฟฟ้าทำงานชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์เจอร์เมเนียม

ทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรบริเวณผิวหน้าซิลิคอนด้านหลังด้วยเทคนิค MPCVD เพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน มีเงื่อนไขการสังเคราะห์ดังนี้

1. อุณหภูมิฐานรอง 800 °C
2. ความถี่ไมโครเวฟ 2.45 GHz กำลัง 800 W
3. อัตราส่วนแก๊ส $\text{CH}_4:\text{N}_2:\text{Ar}$ เท่ากับ 1:20:79
4. ความดัน 90 Torr
6. เวลาในการสร้างฟิล์ม 6 ชั่วโมง ได้ฟิล์มเพชร ความหนาประมาณ 0.6 μm อัตรา

การก่อตัวของผลึกเพชรประมาณ 0.1 $\mu\text{m/hr}$



รูปที่ 3.28 จำลองฐานรองที่ถูกสร้างขั้วไฟฟ้าเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์เจอร์เมเนียม

3.2.2.5 การสร้างขั้วไฟฟ้าช่วยและขั้วไฟฟ้าอ้างอิง

ในการสร้างเซ็นเซอร์วัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายนั้นจะต้องใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงและขั้วไฟฟ้าช่วย ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะใช้ขั้วไฟฟ้าเงินเป็นขั้วไฟฟ้าช่วยและขั้วไฟฟ้าเงิน/เงินคลอไรด์ เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง โดยขั้วไฟฟ้าช่วยนั้นได้ใช้ขั้วไฟฟ้าเงินซึ่งได้จากการนำแร่เงินไปขึ้นรูปส่วนขั้วไฟฟ้าอ้างอิงทำจาก เงิน/เงินคลอไรด์ ซึ่งได้จากการนำขั้วไฟฟ้าอ้างอิงที่ทำจากโลหะเงินทำปฏิกิริยากับสารละลายเฟอริกคลอไรด์ด้วยระยะเวลา 5 นาที จะได้ขึ้น เงิน/เงินคลอไรด์

3.3 การเก็บบรรจุหัววัดออกซิเจนแบบแอมเปอร์เมตริก

การเก็บบรรจุหัววัดเป็นขั้นตอนการประกอบส่วนต่างๆ เข้าด้วยกันเพื่อให้ได้หัววัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลาย ซึ่งประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้าทำงานได้จากขั้วไฟฟ้าเพชรที่ได้ทำการสังเคราะห์ขึ้น ขั้วไฟฟ้าช่วยทำจากวัสดุเงิน ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงทำจากวัสดุ เงิน/เงินคลอไรด์ เยื่อเลือกผ่านใช้สำหรับกันสารละลายอิเล็กโทรไลต์กับสารละลายตัวอย่าง และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ KCl ความเข้มข้น 0.1 M โดยทำการเก็บบรรจุขึ้นส่วนอุปกรณ์ลงในตัวเก็บบรรจุที่ทำจากวัสดุโพลีเอทิลีน (PE)

ดังรูปที่ 3.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.29 ตัวเก็บบรรจุหัววัดออกซิเจนแบบแอมเปอร์เมตริก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

เนื้อหาในส่วนนี้จะกล่าวถึง การทดลองวัดคุณสมบัติต่างๆ การทดลองวัดค่าความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำ

4.1 การศึกษาฟิล์มเพชร

การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรในการทดลองนี้เป็นการศึกษาคุณลักษณะของฟิล์มเพชรที่ทำการสังเคราะห์ขึ้นโดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1.1 การเตรียมฐานรองซิลิคอนด้วยการขัดผิวหน้า

ฐานรองซิลิคอนที่ทำการขัดผิวหน้าด้วยครีมเพชรจะมีความหนาแน่นของนิวคลีโอชันสูง โดยการเกิดเพชรจะเริ่มตันเกิดที่รอยขัดก่อนจากนั้นจึงเริ่มขยายขึ้นเรื่อยๆ การสร้างฟิล์มเพชรในการทดลองนี้ใช้ฐานรองซิลิคอนระนาบ 100 ขัดผิวหน้าด้วยครีมเพชรขนาด $0.25\ \mu\text{m}$ ภาพซิลิคอนที่ขัดผิวหน้าแล้วแสดงในรูปที่ 4.1 จากนั้นจึงนำซิลิคอนที่ขัดผิวหน้าเรียบร้อยแล้วไปทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่าของผิวหน้าแผ่นซิลิคอนที่ขัดด้วยครีมเพชรขนาด $0.25\ \mu\text{m}$

4.1.2 การเตรียมฐานรองซิลิคอนด้วยการอัลตราโซนิก

การอัลตราโซนิกฐานรองด้วยสารละลายที่มีส่วนประกอบของผงเพชรเป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มความหนาแน่นของนิวคลีโอชัน โดยผงเพชรในสารละลายที่ถูกทำให้สั่นด้วยการอัลตราโซนิกจะทำให้ผิวหน้าของฐานรองเกิดร่องรอยและเกิดการยึดเกาะของผงเพชร การสร้างฟิล์มเพชรในการทดลองเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นี้ใช้ฐานรองเป็นซิลิคอนระนาบ 100 ทำให้สั้นด้วยการอัลตราโซนิกในสารละลาย DMSO (Dimethyl Sulfoxide) ต่อเมทิลแอลกอฮอล์ (CH_3OH) อัตราส่วน 1:1 ระยะเวลา 90 นาที โดยใช้ผงเพชรขนาด 3 nm เมื่อนำแผ่นซิลิคอนที่ถูเตรียมแล้วไปมองผ่านกล้องจุลทรรศน์พบว่าไม่สามารถมองเห็นร่องรอยของผงเพชรหรือผงเพชร เนื่องจากขนาดของผงเพชรที่เล็กเพียง 3 nm แต่พบว่าเมื่อนำแผ่นซิลิคอนที่ถูเตรียมและทำความสะอาดแล้วไปจุ่มในน้ำเมื่อนำขึ้นจากน้ำพบว่ามือน้ำเกาะบริเวณผิวหน้าของซิลิคอนทั่วทั้งแผ่นซึ่งแตกต่างจากผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนปกติที่น้ำจะไม่เกาะผิวหน้า แสดงว่าผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนนั้นไม่เรียบ เมื่อทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดอัลตราโนคริสตัลไลน์ด้วย MPCVD พบว่าลักษณะของฟิล์มเพชรที่ได้มีความสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น

4.1.3 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดไมโครคริสตัลไลน์ด้วย HFCVD

การทดลองสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วย HFCVD ที่ความดันต่ำ พบว่าระยะห่างระหว่างไส้ทั้งสแตนกับฐานรองซิลิคอนมีผลต่อขนาดของเม็ดผลึกเพชร ถ้าลดระยะห่างระหว่างไส้ทั้งสแตนกับฐานรองซิลิคอนจะทำให้ขนาดของเม็ดผลึกเพชรใหญ่ขึ้น โดยในการทดลองระยะห่างที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสังเคราะห์ฟิล์มด้วยระบบนี้คือ 4 mm เนื่องจากฐานรองซิลิคอนจะอยู่ใกล้กับหลอดทั้งสแตนมาก โดยบริเวณนี้จะมีความหนาแน่นของแก๊สที่แตกตัวมากทำให้การก่อตัวเป็นผลึกเพชรเกิดขึ้นได้เร็ว ในขณะที่ระยะห่างจากไส้ทั้งสแตนมากขึ้นความหนาแน่นของแก๊สที่แตกตัวจะลดลง ส่งผลให้การก่อตัวของผลึกเพชรช้าลง สำหรับระยะห่างต่ำกว่า 3 mm ลงมา จะเกิดการแพร่กระจายของอุณหภูมิของหลอดทั้งสแตนมายังฐานรองซิลิคอนมาก ทำให้อุณหภูมิฐานรองสูงมากกว่า $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ อีกทั้งความหนาแน่นของแก๊สที่แตกตัวมีปริมาณมากทำให้ได้ผลึกเพชรรูปร่างเป็นแบบบอล (Ball Shape)

นอกจากนี้ในการทดลองยังพบว่าความดันที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรจะมีผลต่อขนาดพื้นที่ของฟิล์มเพชรบนฐานรองซิลิคอน พบว่าที่ความดันต่ำการกระจายตัวของฟิล์มเพชรจะได้พื้นที่มากกว่าที่ความดันสูงเนื่องจากการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรที่ความดันต่ำช่วงอายุ (Lift Time) ของแก๊สที่แตกตัวจะมีค่ามากกว่าช่วงอายุของแก๊สแตกตัวที่ความดันสูง แต่ในขณะเดียวกันถ้าความดันต่ำเกินไปจะทำให้อัตราการเกิดผลึกเพชรลดลงเนื่องจากปริมาณแก๊สที่จะเกิดปฏิกิริยาลดลงทำให้ต้องใช้เวลาในการสังเคราะห์นานขึ้น ในการทดลองพบว่าความดันที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 50 Torr สำหรับอัตราส่วนปริมาณแก๊สไฮโดรเจนต่อไอระเหย $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ จะเป็นตัวแปรสำคัญในการสังเคราะห์เพชร จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนปริมาณของเอทิลแอลกอฮอล์ที่เหมาะสมคือ 1% ทั้งนี้จะได้ฟิล์มเพชรที่มีปริมาณของกราฟไฟท์และอะมอร์ฟัสคาร์บอนน้อยลง

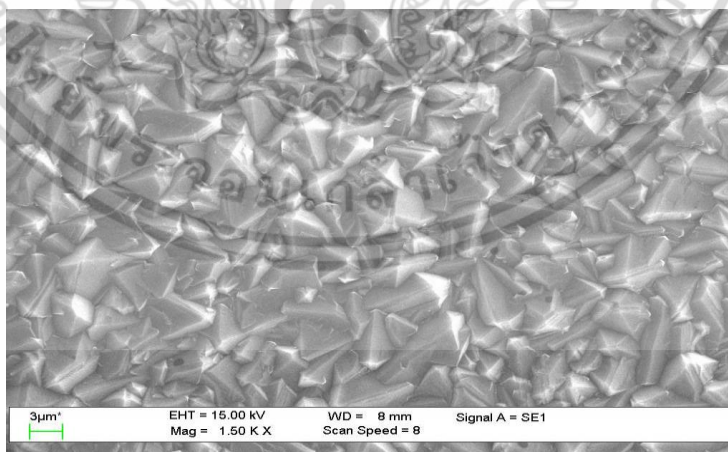
4.1.4 การทดลองสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดอัลตราโนคริสตัลไลน์ด้วย MPCVD

จากการทดลองสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยใช้แก๊ส $\text{CH}_4:\text{N}_2:\text{Ar}$ พบว่าได้ฟิล์มเพชรชนิดอัลตราโนคริสตัลไลน์ที่มีความเรียบของพื้นผิวมากกว่าฟิล์มเพชรชนิดไมโครคริสตัลไลน์ เนื่องจากขนาดของผลึกที่เกิดขึ้นจากการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธีการนี้จะมีขนาดเล็กระดับนาโนเมตร จากการทดลองพบว่าค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดอัลตราโนคริสตัลไลน์เจอเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไนโตรเจนที่เหมาะสมโดยใช้การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค MPCVD จะใช้ความดัน 90 Torr อัตราส่วนแก๊สมีเทนต่อไนโตรเจนต่ออาร์กอน 1:20:79 อุณหภูมิฐานรอง 800 °C กำลังงานไมโครเวฟ 800 W ที่ความถี่ 2.45 GHz ทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง ได้ความหนาฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์เจือไนโตรเจนที่มีความหนา 0.6 μm

4.1.5 การศึกษาพื้นผิวฟิล์มเพชรด้วย SEM

การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค CVD มีพารามิเตอร์หลายอย่างที่มีผลต่อคุณภาพของฟิล์ม จึงต้องทำการศึกษาเงื่อนไขการสังเคราะห์ที่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิฐานรอง ความดันแก๊สภายในห้อง ปฏิกิริยาปริมาณแก๊ส CH_4 ในแก๊ส H_2 และกำลังไฟฟ้า พารามิเตอร์เหล่านี้จะเกี่ยวข้องถึงคุณสมบัติของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้น ดังนั้น รายละเอียดในการทำความเข้าใจรูปร่างลักษณะของฟิล์ม และกลไกการสังเคราะห์จึงมีความสำคัญต่อการนำฟิล์มเพชรไปประยุกต์ใช้งาน สำหรับการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดไมโครคริสตัลไลน์เนื่องจากใช้ระบบ HFCVD ในการสังเคราะห์อุณหภูมิของฐานรอง ได้จากขดลวดความร้อนที่ตั้งอยู่ห่างจากฐานรองประมาณ 0.5 - 1 cm ดังนั้นโดยการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสที่จ่ายให้กับขดลวดความร้อน โดยอุณหภูมิที่ฐานรองทำการควบคุมที่อุณหภูมิ 850 °C ลักษณะรูปร่างของฟิล์มเพชรได้จากการสังเคราะห์ด้วยระบบ HFCVD ที่เงื่อนไขดังกล่าวข้างต้น เมื่อวิเคราะห์ด้วย SEM จะได้ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรดังรูปที่ 4.2 มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมทั่วพื้นที่ฐานรอง พิจารณาจาก Miller Indices ที่ h, k, l มีค่าเป็น 1, 1, 1 พบว่าลักษณะของระนาบเป็นรูปสามเหลี่ยม ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าลักษณะพื้นผิวมีระนาบ 111 สำหรับฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์นั้น เนื่องจากขนาดผลึกที่เล็กมากจึงไม่สามารถมองเห็นลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรได้ด้วยเทคนิค SEM

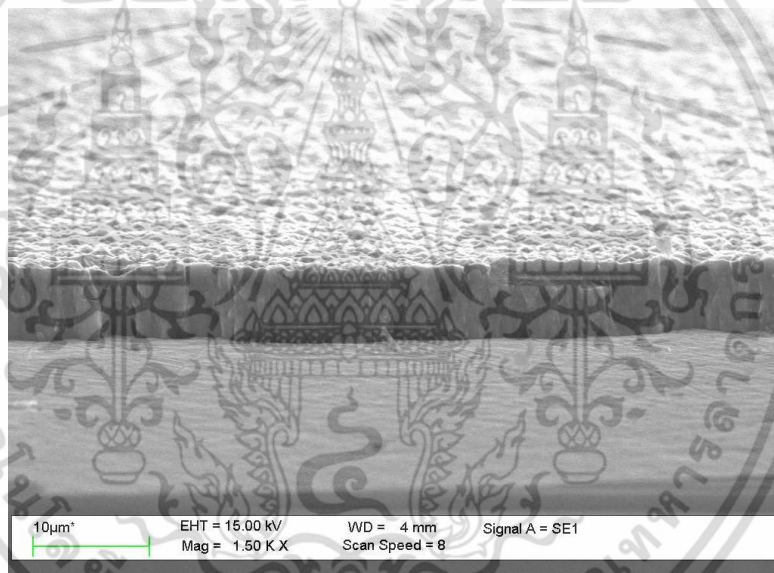


รูปที่ 4.2 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรจากภาพถ่าย SEM ของระนาบ 111

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.6 ผลของเวลาในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

เนื่องจากการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดไมโครคริสตัลไลน์ด้วยระบบ HFCVD ได้ใช้ความดันต่ำ จึงจำเป็นต้องใช้เวลาในการเคลือบนานหลายชั่วโมง สำหรับเงื่อนไขการทดสอบเวลาในการเคลือบฟิล์มเพชรได้ใช้อัตราการไหลแก๊ส H_2 200 sccm และไอระเหย C_2H_5OH 1% ใน H_2 ที่ความดัน 50 Torr อุณหภูมิฐานรอง 850 °C เมื่อทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรเรียบร้อยแล้ว ได้ทำการนำฐานรองที่เคลือบฟิล์มเพชรตัดชิ้นส่วนความกว้างประมาณ 3 mm ทำการวัดความหนาด้วย SEM ดังรูปที่ 4.3 ภาพถ่ายฟิล์มเพชรที่ใช้เวลาในการเคลือบ 6 ชั่วโมง ได้ความหนาประมาณ 5 μm และเมื่อนำข้อมูลของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ในช่วงเวลา 2 ชั่วโมง 4 ชั่วโมง 6 ชั่วโมง และ 10 ชั่วโมง ทำการตรวจวัดความหนาด้วย SEM สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและเวลาซึ่งทำให้ได้อัตราการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร 0.8 $\mu m/hr$ สำหรับฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์นี้มีอัตราการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรอยู่ที่ 0.1 $\mu m/hr$



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายความหนาฟิล์มเพชรชนิดไมโครคริสตัลไลน์ด้วย SEM

4.1.7 การวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

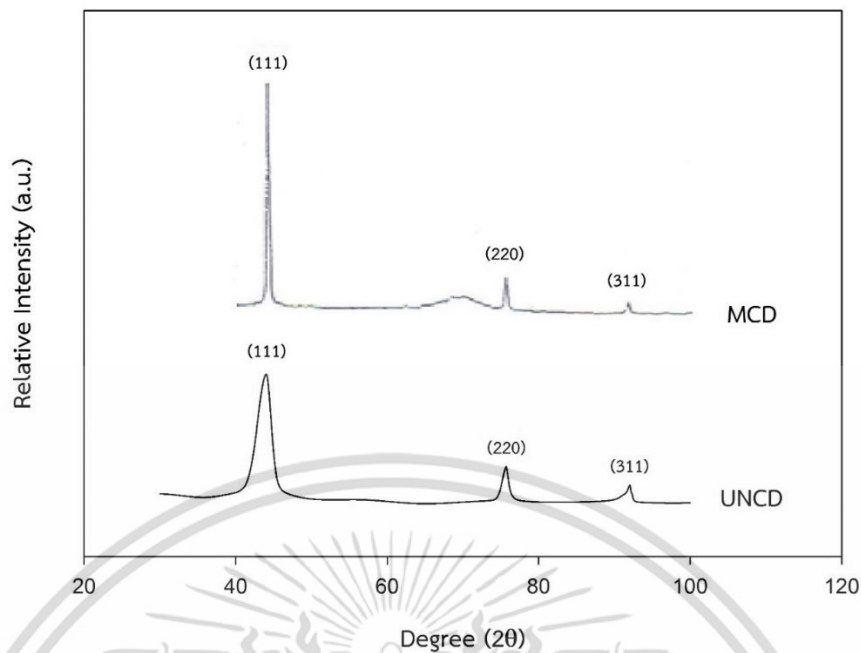
เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์สามารถใช้วัดพารามิเตอร์ของแลตทิซและพิจารณาถึงลักษณะของฟิล์มได้ รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์สามารถใช้อธิบายความแตกต่างระหว่างเฟสของผลึกคาร์บอน คุณสมบัติรูปแบบของผลึกรวมของเพชรที่ได้ เนื่องจากลักษณะโครงสร้างผลึกเพชรเป็นแบบ Cubic ซึ่งมีความสมมาตรสูง การคำนวณแฟกเตอร์ของโครงสร้างทำให้มีระนาบของการเลี้ยวเบนจำนวนน้อยโดยระนาบของการเลี้ยวเบน hkl ที่ได้คือ 111, 220, 311, 400, 331 และอื่นๆ โดย h,k,l จะเป็นคู่ที่ทั้งหมดหรือ h,k,l เป็นคู่ที่ทั้งหมดและ $h+k+l = 4n$ เมื่อ n เป็นจำนวนเต็ม

นอกจากนี้ที่ระนาบผลึกต่างๆ การเลี้ยวเบนที่ระนาบ 111 มีค่าการเลี้ยวเบนสูง เมื่อนำฟิล์มเพชรชนิดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไมโครคริสตัลไลน์ที่ได้จากการสังเคราะห์ ไปทำการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ทำให้ได้มุมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ดังรูปที่ 4.4 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ของแลตทิซพิจารณาได้จาก Bragg's Law $2d \sin\theta = n\lambda$ n คือ ลำดับของการเลี้ยวเบน $n = 1, 2, 3, \dots$ ซึ่งการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์จะทำมุม θ เมื่อเทียบกับ Crystal Plane และทำมุม 2θ เมื่อเทียบกับรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบ การหาค่า Interplanar Spacing (d) ของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ระนาบ 111 ที่ตำแหน่ง $2\theta = 44.09$ หรือ $\theta = 22.045$ เนื่องจากการเลี้ยวเบนอันดับแรก ดังนั้น $n = 1$ และแหล่งจ่ายรังสีเอ็กซ์ที่ใช้เป็นของ $\text{CuK}\alpha$ ซึ่งมีค่าความยาวคลื่น 1.5418 \AA เมื่อแทนค่าในสมการของ Bragg's Law จะได้ $d = 2.054$ เมื่อนำกราฟผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ของฟิล์มเพชรชนิดไมโครคริสตัลไลน์ (MCD) และอัลตรานาโนคริสตัลไลน์ (UNCD) มาเปรียบเทียบกับดังรูปที่ 4.5 พบว่าสัญญาณของฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์ที่ได้มีขนาดของฐานสัญญาณที่กว้าง ซึ่งเป็นผลจากการที่ผลึกมีขนาดเล็กระดับนาโนเมตร



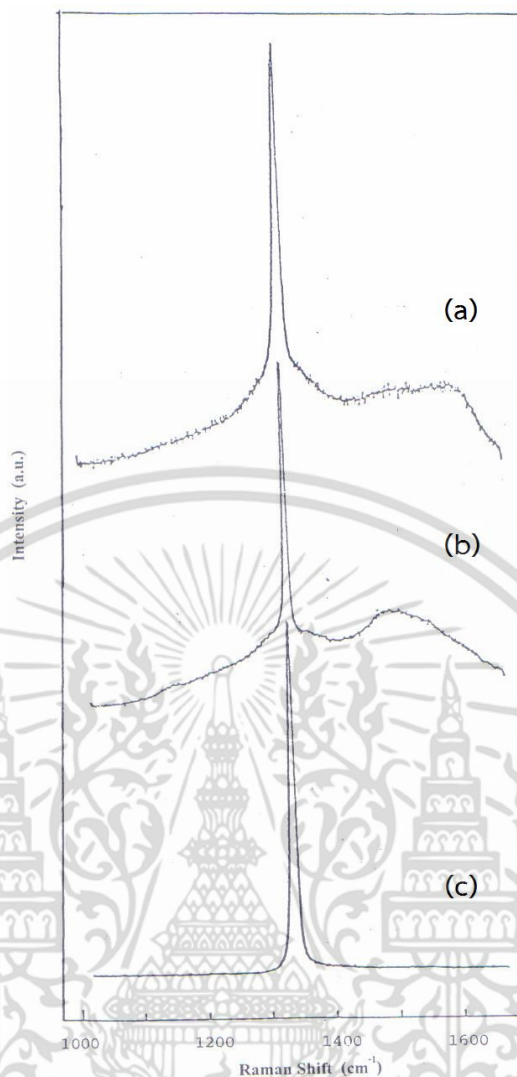
รูปที่ 4.4 ผลการทดลองการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดไมโครคริสตัลไลน์ด้วย XRD



รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบผลการทดลองการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วย XRD

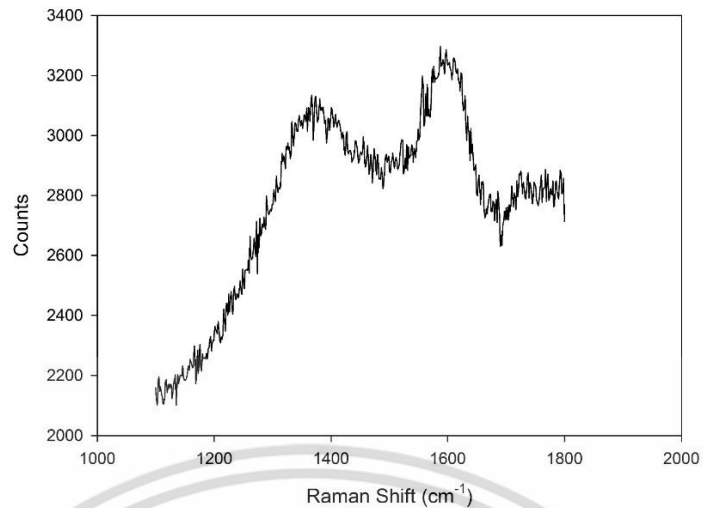
4.1.8 การวิเคราะห์คุณภาพฟิล์มเพชรด้วย Raman Spectroscopy

ฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ด้วยระบบ HFCVD ซึ่งเปลี่ยนแปลงปริมาณของ C_2H_5OH ในแก๊ส H_2 โดยนำตัวอย่างของฟิล์มเพชรที่ใช้ปริมาณ C_2H_5OH 0.75%, 1%, 1.5% และ 2% วิเคราะห์คุณภาพฟิล์มเพชรด้วยเครื่องรามานสเปกโตรสโคปีได้ผลดังรูปที่ 4.6 เป็นการเปรียบเทียบยอดคลื่นจากรามานชิฟท์จากการใช้เงื่อนไขของปริมาณ C_2H_5OH ที่แตกต่างกันดังกล่าวข้างต้น โดยรูปที่ 4.6 (a) ใช้ปริมาณ C_2H_5OH 2% จะเห็นยอดคลื่นของรามานที่ตำแหน่ง 1332 cm^{-1} เป็นยอดคลื่นสูงสุด เป็นยอดคลื่นของเพชรที่มีพันธะเป็น sp^3 ส่วนยอดคลื่นต่ำกว่าเป็นอะมอร์ฟัสคาร์บอนที่ตำแหน่ง 1580 cm^{-1} ในรูปที่ 4.6 (b) ใช้ปริมาณ C_2H_5OH 1.5% สังเกตได้ว่ายอดคลื่นรามานที่ตำแหน่ง 1580 cm^{-1} ได้ลดขนาดลงอย่างมากและมีขนาดยอดคลื่นต่ำกว่า 1480 cm^{-1} ของคาร์บอนกราฟไฟท์ที่เป็นพันธะของ sp^2 แสดงให้เห็นว่าคุณภาพของฟิล์มเพชรยังไม่ดีเท่าที่ควร ยังมีปริมาณคาร์บอนกราฟไฟท์เกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก สำหรับในรูปที่ 4.6 (c) ใช้ปริมาณ C_2H_5OH 0.75% และ 1% ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ด้วยรามานสเปกโตรสโคปีเหมือนกัน โดยจะมียอดคลื่นรามานที่ตำแหน่ง 1332 cm^{-1} แสดงอย่างเด่นชัดเพียงยอดคลื่นเดียวที่เป็นยอดคลื่นของเพชรเท่านั้น แสดงให้เห็นว่าคุณภาพฟิล์มเพชรขึ้นอยู่กับปริมาณของแก๊ส C_2H_5OH ใน H_2 เมื่อปริมาณของแก๊ส C_2H_5OH ลดลงทำให้ฟิล์มเพชรที่มีคุณภาพดีขึ้นอย่างชัดเจน จากผลการวิเคราะห์จึงได้กำหนดเงื่อนไขการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรโดยการใช้ปริมาณแก๊ส C_2H_5OH 1% ในแก๊ส H_2 เพื่อให้ได้อัตราการพอกพูนฟิล์มเพชรที่เร็วและได้คุณภาพฟิล์มเพชรที่ดี

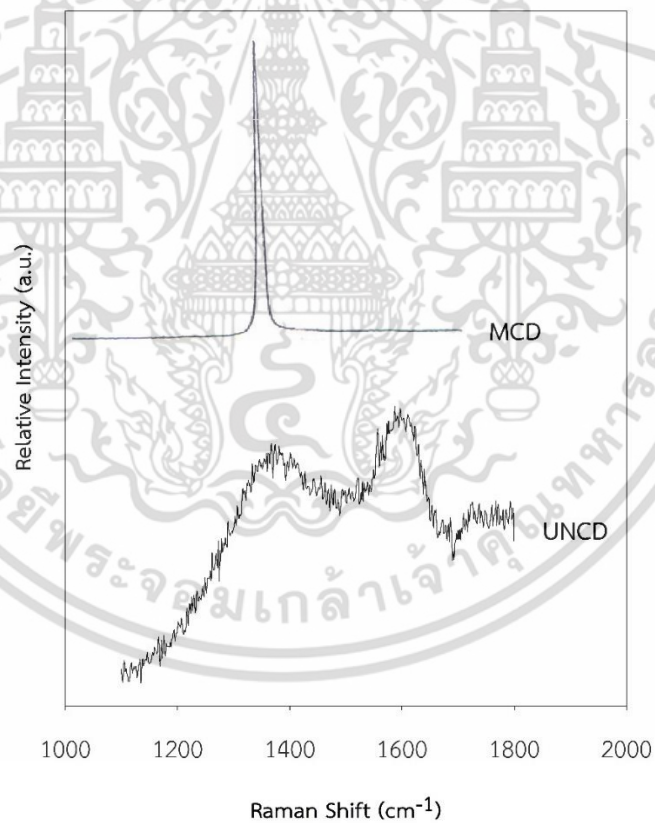


รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดไมโครคริสตัลไลน์ด้วยรามานสเปกโตรสโคปี เมื่อใช้แก๊ส C₂H₅OH ที่ปริมาณ (a) 2% (b) 1.5% (c) 1%

สำหรับฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์นั้นมียอดคลื่นอยู่ที่ตำแหน่ง 1332 cm⁻¹ และตำแหน่งของคาร์บอนกราฟิตดังรูปที่ 4.7 ซึ่งเป็นลักษณะกราฟรามานของฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์ เนื่องจากว่าขนาดของผลึกเพชรมีขนาดเล็กอยู่ในระดับนาโนเมตร จึงทำให้มีพื้นที่ขอบเขตผลึกมากซึ่งเป็นพันธะ sp² ส่งผลให้ความนำไฟฟ้าของฟิล์มเพชรชนิดนี้มีค่าสูงกว่าฟิล์มเพชรชนิดไมโครคริสตัลไลน์ โดยรูปที่ 4.8 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์รามานของฟิล์มเพชรทั้งสองชนิดซึ่งมียอดคลื่นที่ตำแหน่ง 1332 cm⁻¹ ซึ่งเป็นยอดคลื่นของเพชรที่มีพันธะ sp³



รูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดอัลตราโนคริสตัลไลน์ด้วยรามานสเปกโตรสโคปี



รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์รามานสเปกโตรสโคปีของฟิล์มเพชรทั้งสองชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.9 การหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าฟิล์มเพชรชนิด P

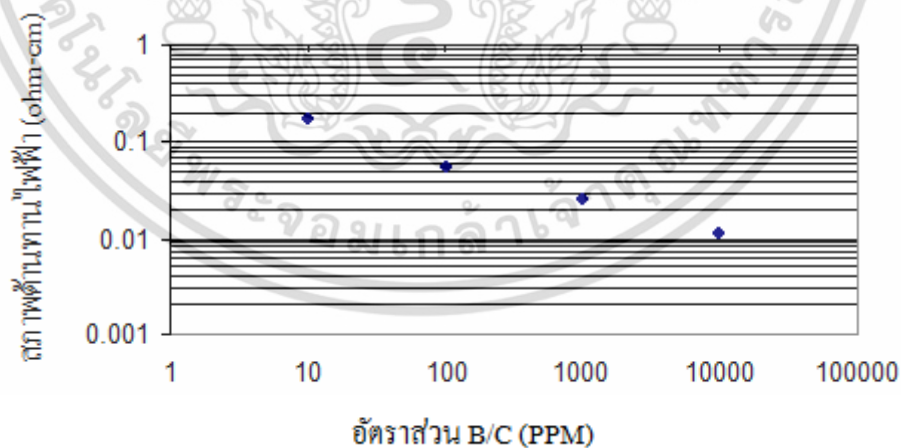
ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าได้ใช้วิธีโฟร์พอยท์โพรบ (Four Point Probe) โดยเครื่องมือวัดมีระยะห่างระหว่างหัวเข็ม (s) 0.5 mm หลักการทำงานโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้า (I) ผ่านเข็มด้านนอกสองเข็ม ส่วนศักย์ไฟฟ้า (V) วัดโดยใช้โวลต์มิเตอร์ระหว่างเข็มด้านในสองเข็ม สภาพต้านทานไฟฟ้าคำนวณจาก ศักย์ไฟฟ้า กระแส ระยะห่างระหว่างหัวเข็ม และความหนาของฟิล์ม

กรณีที่มีความหนามีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับครึ่งหนึ่งของระยะห่างระหว่างหัวเข็ม ($t/s \leq 0.5$) ค่าสภาพต้านทานหาได้จากสมการ

$$\rho = 4.532 \left(\frac{tV}{I} \right) \quad (4.1)$$

โดยที่ ρ คือสภาพต้านทานไฟฟ้า ($\Omega\text{-cm}$)
 V คือศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ (V)
 t คือความหนาของฟิล์ม (cm)
 I คือกระแสจากแหล่งจ่าย (A)

เนื่องจากสารตัวอย่างเป็นฟิล์มเพชรซึ่งมีความหนา $14 \mu\text{m}$ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของระยะห่างระหว่างหัวเข็ม การทดลองทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ค่าอัตราส่วน B/C เป็น 10, 100, 1000 และ 10000 ppm โดยจ่ายกระแสคงที่ $453 \mu\text{A}$ และคำนวณสภาพต้านทานไฟฟ้าได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนของ B/C เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอัตราส่วน B/C

4.1.10 การหาค่าความหนาแน่นของพาหะฟิล์มเพชรชนิด P

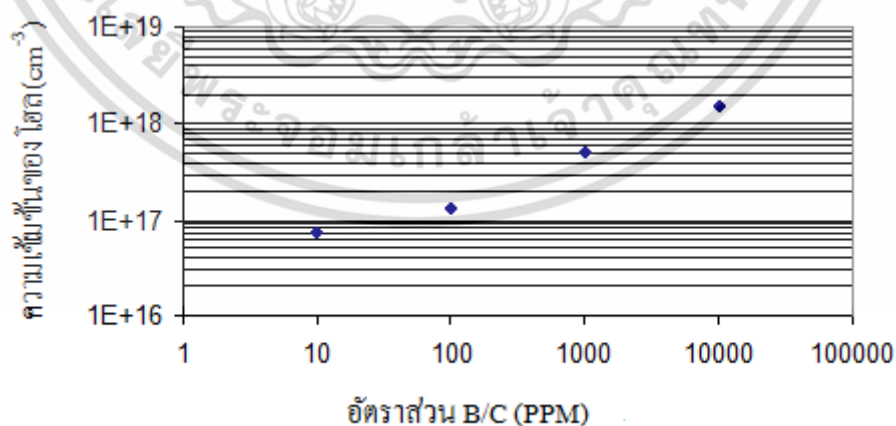
อาศัยหลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่มีประโยชน์อย่างมากในการศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ของสารกึ่งตัวนำ เช่น จากการวัดค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (R_H) ทำให้สามารถศึกษาชนิดพาหะในสารกึ่งตัวนำว่ามีพาหะส่วนมากเป็นโฮลหรืออิเล็กตรอน นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ยังสามารถนำไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นของพาหะและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สำคัญได้อีกด้วย ดังนั้นปรากฏการณ์ฮอลล์จึงมีความสำคัญอย่างมากต่อการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุสารกึ่งตัวนำต่างๆ สำหรับฟิล์มเพชรก่อนที่จะนำไปทำการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ต้องทำการเตรียมชิ้นงาน พื้นที่ฟิล์มเพชรขนาด 5×5 mm ประกอบด้วยขั้วโลหะทองคำสี่ขั้ววางในตำแหน่งที่สมมาตรกัน การวัดศักย์ไฟฟ้าของฮอลล์ โดยการจ่ายสนามแม่เหล็กให้กับชิ้นงานในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางกระแสและทำการวัดศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) จากค่าศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ที่วัดได้นำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ โดยในการทดลองทำการจ่ายกระแสคงที่ (I) $500 \mu\text{A}$ และสนามแม่เหล็กมีค่า (B_z) 2000 Gauss หรือ 0.2 Tesla และฟิล์มมีความหนา (d) $14 \mu\text{m}$ สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ได้ดังสมการ

$$R_H = \frac{V_H d}{I B_z} \quad (4.2)$$

จากนั้นนำค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ไปหาค่าความหนาแน่นของพาหะได้จากสมการ

$$p = \frac{3\pi}{8} \frac{1}{R_H q} \quad (4.3)$$

โดย q คือค่าประจุไฟฟ้ามีค่า 1.602×10^{-19} คูลอมบ์



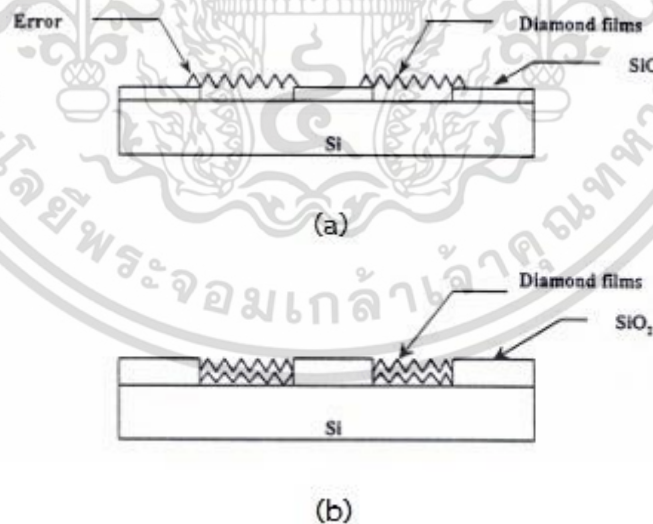
รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของโฮลกับอัตราส่วน B/C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากค่าความหนาแน่นของพาหะที่อัตราส่วน B/C มีค่าต่างๆ สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 4.10 จากกราฟพบว่าค่าความหนาแน่นของพาหะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วน B/C เพิ่มขึ้น

4.2 ผลการศึกษาการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรตามพื้นที่ที่กำหนด

ฟิล์มเพชรจะถูกสังเคราะห์บนพื้นที่ลวดลายตามที่ถูกออกแบบไว้ตามกระบวนการสร้าง เพื่อศึกษาหาข้อจำกัดต่างๆ ที่จำเป็นต้องใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ต่อไป โดยในการทดลองมีการเตรียมผิวหน้าฐานรองซิลิคอนโดยการขัดแผ่นฐานรองซิลิคอนด้วยครีมเพชรขนาด $0.25\ \mu\text{m}$ ภายหลังจากการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร ชิ้นงานจะถูกนำมาวิเคราะห์หาความผิดพลาดเกิดขึ้น เช่น การเกิดฟิล์มเพชรหรือผลึกเพชรบนพื้นที่ที่ไม่ต้องการ ลักษณะฟิล์มเพชรที่เกิดขึ้น ความผิดพลาดของระยะห่างระหว่างลวดลายของฟิล์มเพชร รวมไปถึงค่าความกว้างของลวดลายฟิล์มเพชรที่เกิดขึ้น เมื่อนำแผ่นฐานรองซิลิคอนที่ถูกขัดผิวหน้าด้วยครีมเพชรเรียบร้อยแล้ว ทำการสร้างชั้น SiO_2 ด้วยวิธีออกซิเดชันในเตา ความร้อนแบบเปียกให้ได้ความหนาชั้น SiO_2 $1.5\ \mu\text{m}$ จากนั้นทำการกัดชั้น SiO_2 ออกในส่วนที่ต้องการให้เกิดพื้นที่ฟิล์มเพชร เมื่อแผ่นฐานรองนี้ผ่านขั้นตอนกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรเรียบร้อยแล้วพบว่าจะไม่เกิดฟิล์มเพชรตามลวดลายพื้นที่ที่ต้องการ แต่จะเกิดผลึกเดี่ยวกระจายทั่วไปทั้งผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน และผิวหน้าของชั้น SiO_2 สาเหตุที่ไม่เกิดฟิล์มเพชรตามพื้นที่ที่ต้องการ เนื่องจาก กระบวนการสร้างชั้น SiO_2 ด้วยวิธีการออกซิเดชันแบบความร้อนทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้น



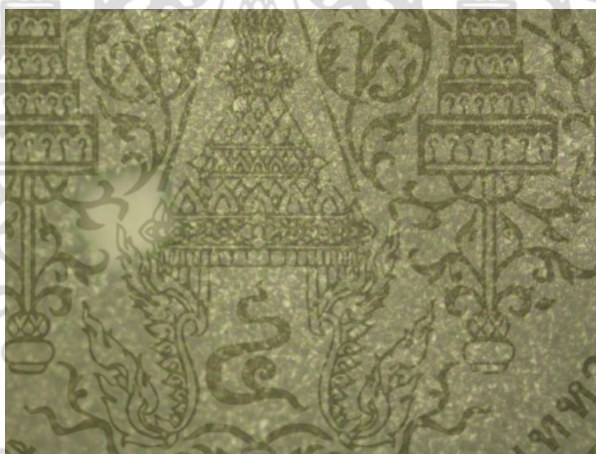
รูปที่ 4.11 จำลองผลของความหนาชั้น SiO_2 ที่มีผลต่อพื้นที่ลวดลายของฟิล์มเพชร

(a) กรณี SiO_2 บาง (b) กรณี SiO_2 หนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างออกซิเจนกับอะตอมของซิลิคอนที่พื้นผิวทำให้เกิดชั้น SiO_2 ลึกลงไปในแผ่นซิลิคอน เมื่อกัดชั้น SiO_2 ออก จะมีผลต่อร่องและมุมของรอยขีดข่วนที่เกิดจากการขัดด้วยครีมเพชรทำให้ความหนาแน่นนิวเคลียสของเพชรน้อยลง ดังนั้นเพื่อป้องกันไม่ให้ออกซิเจนเสียหายจึงได้สร้างชั้น Si_3N_4 ปิดผิวหน้าซิลิคอนบริเวณตำแหน่งที่เป็นพื้นที่สำหรับฟิล์มเพชรก่อนผ่านขั้นตอนออกซิเดชัน

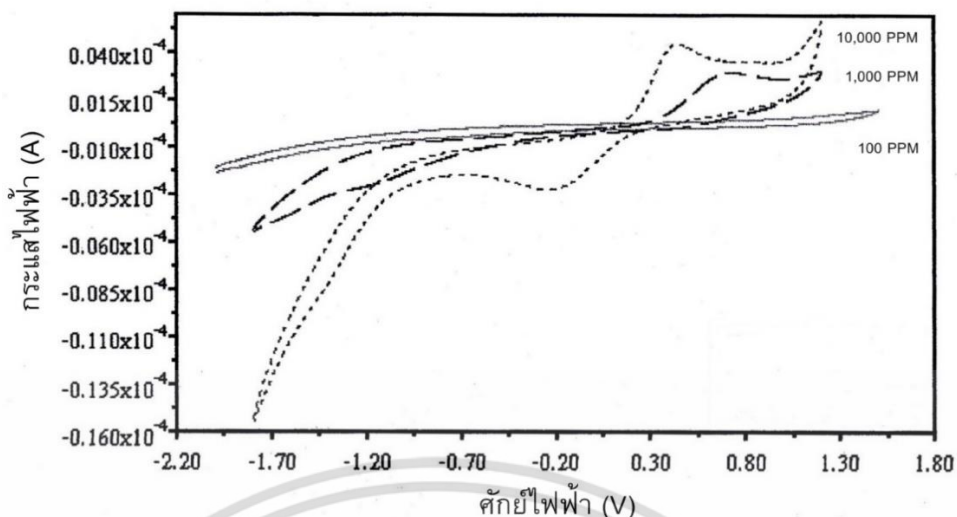
สำหรับความหนาของชั้น SiO_2 ที่มีผลต่อขอบรอยละลายฟิล์มเพชร หากความหนาชั้น SiO_2 น้อยเกินไปรอยละลายของฟิล์มเพชรจะไม่คมชัดและมีความผิดพลาดสูงดังรูปที่ 4.11 เนื่องจากจะเกิดผลึกเพชรขึ้นบนชั้น SiO_2 ที่บริเวณเชื่อมต่อกับขอบรอยละลายของฟิล์มเพชร เมื่อความหนาชั้น SiO_2 เพิ่มขึ้นความผิดพลาดของรอยละลายก็จะมีค่าลดลง เนื่องจากทำให้ผลึกเพชรบริเวณขอบของรอยละลายเกินออกมาที่ชั้น SiO_2 ในระยะทางที่น้อยลง การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรในพื้นที่ที่กำหนดระยะห่างและขนาดความกว้าง หากความกว้างมีขนาดใหญ่ความผิดพลาดจะมีค่าน้อย เนื่องจากขนาดของผลึกที่เกินขอบรอยละลายออกมาขึ้นอยู่กับเวลาในการสังเคราะห์ ดังนั้นเมื่อระยะห่างระหว่างรอยละลายมีค่าน้อยความผิดพลาดก็จะมีค่ามาก แต่ถ้าระยะห่างระหว่างรอยละลายมีค่ามากความผิดพลาดก็จะมีค่าน้อยลง โดยความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นเท่าๆ กันทุกทิศทางของพื้นที่ที่ออกแบบไว้



รูปที่ 4.12 ฟิล์มเพชรที่มีรูคุดบพร่อง

4.3 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าเคมี

ในการพัฒนาขั้วไฟฟ้าเพชรเป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน สำหรับเซ็นเซอร์แบบแอมแปโรเมตริกต้องทดสอบขั้วไฟฟ้าเพชรที่เจือสารโบรอนค่าต่างๆ ทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี เพื่อเลือกเงื่อนไขขั้วไฟฟ้าเพชรที่เหมาะสม



รูปที่ 4.13 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมโดยใช้ขั้วไฟฟ้าเพชรเจือโบรอน B/C 100, 1000 และ 10000 ppm เทียบกับขั้วไฟฟ้า Ag/AgCl

ในการทดลองนี้ได้ใช้ขั้วไฟฟ้าที่เจือสารโบรอน B/C 100 ppm, 1000 ppm และ 10000 ppm ใส่ลงในเซลล์ที่มีสารละลาย 1 mM $K_3(Fe(CN))_6$ ใน 0.1 M KCl ที่มีขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl และขั้วไฟฟ้าช่วยกลาสคาร์บอนอยู่ในเซลล์และให้เซลล์อยู่ในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนให้ศักย์ไฟฟ้าแบบไซคลิกโวลแทมเมทรี โดยใช้เครื่อง Autolab Potentiostat รุ่น PG STAT 20 ในช่วงศักย์ไฟฟ้า -1.8 ถึง 1.2 V ในอัตราสแกน 0.1 V/s และบันทึกโวลแทมโมแกรมที่ได้ดังรูปที่ 4.13

พบว่าขั้วไฟฟ้าเพชรเจือโบรอนที่อัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอน 100 ppm ไม่มียอดสัญญาณของปฏิกิริยารีดอกซ์เนื่องจากมีค่าความเข้มข้นของโพลิต่า แต่ที่อัตราส่วน 10000 ppm มียอดสัญญาณของปฏิกิริยารีดอกซ์สูงกว่าอัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอนค่าอื่นๆ เนื่องจากมีความเข้มข้นของโพลิต่าสูงสุดพบว่าปฏิกิริยารีดอกซ์ที่เกิดขึ้นนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารเจือในขั้วไฟฟ้าเพชรมีค่าเพิ่มขึ้น

4.4 การศึกษาสัญญาณทางไฟฟ้าเคมีของขั้วไฟฟ้าเพชรในสารละลายอิเล็กโทรไลต์

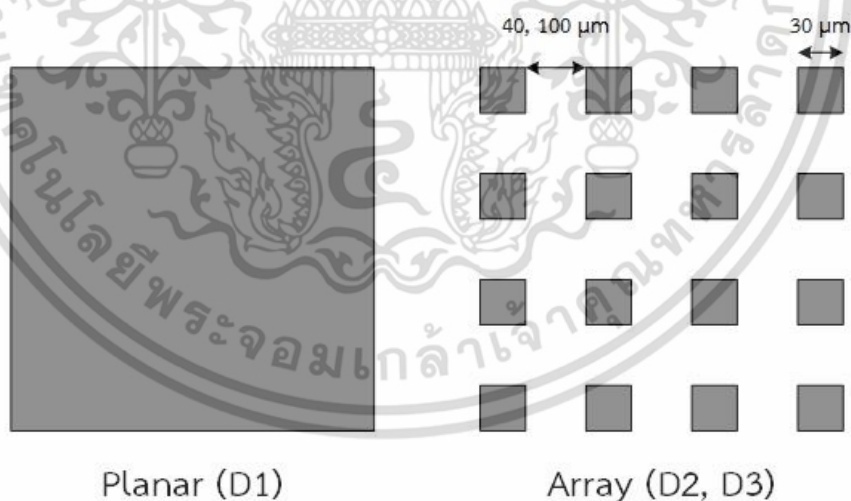
นำขั้วไฟฟ้าเพชรเจือโบรอน B/C 10000 ppm ใส่ลงในเซลล์ที่มีสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.1 M ของ KCl, NaCl, H_2SO_4 , K_2SO_4 , Na_2SO_4 และ NaOH ที่มีขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl และขั้วไฟฟ้าช่วยกลาสคาร์บอนอยู่ในเซลล์ที่บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ให้ศักย์ไฟฟ้าแบบไซคลิกโวลแทมเมทรี ในช่วงต่างๆ กัน โดยใช้อัตราการสแกน 0.1 V/s และบันทึกโวลแทมโมแกรมที่ได้จากการใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่างๆ และค่าของช่วงศักย์ไฟฟ้าใช้งานที่ได้จากขั้วไฟฟ้าเพชรเจือโบรอน B/C 10000 ppm ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ช่วงศักย์ไฟฟ้าทำงานของอิเล็กโทรไลต์ต่างๆ จากไซคลิกโวลแทมโมแกรม โดยใช้
ขั้วไฟฟ้าเพชรเจือโบรอนเทียบกับขั้วไฟฟ้า Ag/AgCl

ชนิดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (ความเข้มข้น 0.1 M)	ช่วงศักย์ไฟฟ้าทำงานเทียบกับ Ag/AgCl (V)
KCl	-2.0 ถึง 1.6
NaCl	-1.7 ถึง 1.6
H ₂ SO ₄	-1.0 ถึง 1.7
K ₂ SO ₄	-2.0 ถึง 1.6
Na ₂ SO ₄	-1.8 ถึง 1.2
NaOH	-1.7 ถึง 1.0

4.5 การวัดค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเคมีของขั้วไฟฟ้าเพชร

การใช้เซ็นเซอร์แบบแอมแปโรเมตริกวัดปริมาณออกซิเจนในกระบวนการไฟฟ้าเคมีที่ออกซิเจนเกิดปฏิกิริยารีดักชันบนผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าทำงานเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วัสดุเพชรเป็นขั้วไฟฟ้าทำงานและได้ออกแบบรูปร่างของขั้วไฟฟ้าเพชรชนิดไมโครคริสตัลไลน์เจือโบรอน B/C 10000 ppm ด้วยกัน 3 แบบ ดังรูปที่ 4.14



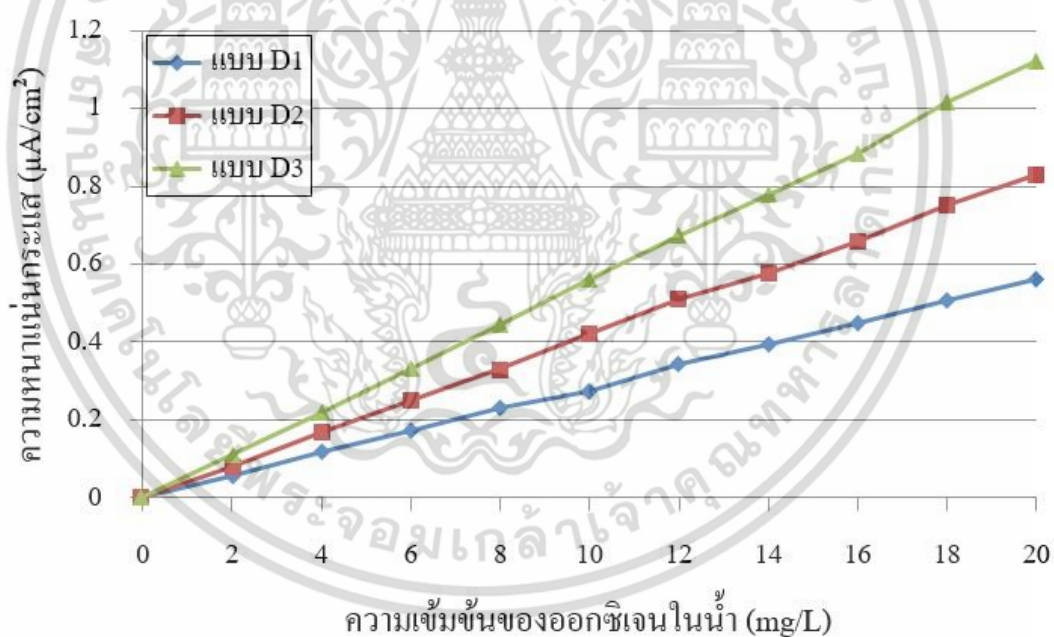
รูปที่ 4.14 แบบขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชร D1, D2 และ D3

1. แบบ D1 เป็นแบบพลาแนร์ (Planar) ขนาด 2x2 mm²
2. แบบ D2 เป็นแบบแถว (Array) ขนาดขั้วไฟฟ้า 30x30 μm² ระยะห่าง 40 μm
3. แบบ D3 เป็นแบบแถว (Array) ขนาดขั้วไฟฟ้า 30x30 μm² ระยะห่าง 100 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้วไฟฟ้าแต่ละตัวนั้นจะถูกประกอบให้เป็นหัววัดเพื่อเชื่อมต่อกับวงจรประมวลผลในการทดลอง อ่านค่าความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลาย โดยทำการกำหนดค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าทำงานและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงที่ค่า -0.6 V เพื่อให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ โดยขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซึ่งทำจากวัสดุเงิน/เงินคลอไรด์ จะมีค่าอิมพีแดนซ์ที่สูงเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่และให้ขั้วไฟฟ้าช่วย ซึ่งทำจากวัสดุเงินเป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า จากนั้นทำการทดลองโดยการจุ่มหัววัดลงในน้ำที่ความเข้มข้นของออกซิเจนตั้งแต่ $0 - 20$ mg/L

การทดลองวัดปริมาณออกซิเจนในน้ำ ได้ดำเนินการโดยใช้ปีเกอร์เติมน้ำบริสุทธิ์ 500 cc แล้วนำไปตั้งบนเครื่องกวนด้วยความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที ทำการจุ่มหัววัดออกซิเจนที่พัฒนาขึ้น พร้อมกับหัววัดออกซิเจนของ Exttech รุ่น 407510 ในการอ่านค่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำในหน่วยของ mg/L จากนั้นเติมด้วยก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์ 99.995% ที่อุณหภูมิ 27 °C ให้ออกซิเจนละลายอยู่ในน้ำจนกระทั่งได้ปริมาณออกซิเจนในน้ำ 20 mg/L ทำการเติมสารละลาย Na_2SO_3 ลงในน้ำจนกระทั่งได้ปริมาณออกซิเจนลดลงตั้งแต่ $20 - 0$ mg/L ทำการบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าของหัววัดที่พัฒนาขึ้น พร้อมค่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำดังรูปที่ 4.15

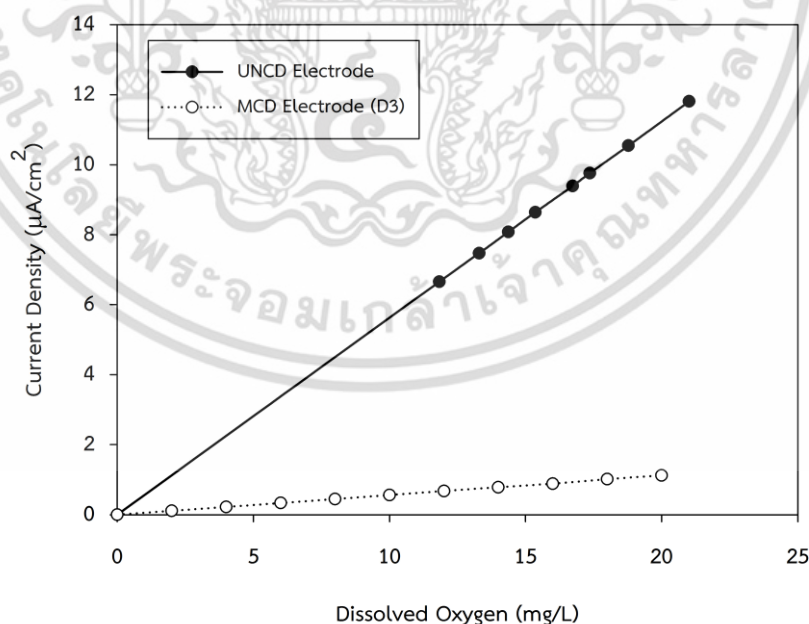


รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากหัววัดขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชรชนิดโมโนคริสตัลไลน์เจือโบรอนต่อความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำ

จากการทดลองพบว่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซ็นเซอร์จะเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นเมื่อความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำเพิ่มขึ้น โดยพบว่าขั้วไฟฟ้า D3 ซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าเพชรเจือโบรอนแบบแถวที่มีระยะห่างแต่ละจุด 100 μm มีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสูงสุด โดยที่ปริมาณเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ใช้เอกสารนี้ในการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกซิเจน 20 mg/L ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าประมาณ $1.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ เนื่องจากพื้นที่ชั้นแพร่ (Diffusion Layer) ซึ่งอยู่บริเวณพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าทำงานจะแปรผันตรงกับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ได้จากปฏิกิริยา ขั้วไฟฟ้า D2 มีระยะห่างที่ไม่เหมาะสม (น้อยเกินไป) จึงทำให้เกิดการแทรกสอดของชั้นแพร่ ขั้วไฟฟ้า D3 มีระยะห่างที่เหมาะสมจึงทำให้ได้ค่าความหนาแน่นกระแสสูงสุด ส่วนขั้วไฟฟ้า D1 ซึ่งเป็นแบบพลาแนร์มีพื้นที่ของชั้นแพร่น้อยที่สุดจึงทำให้ได้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่ำสุด

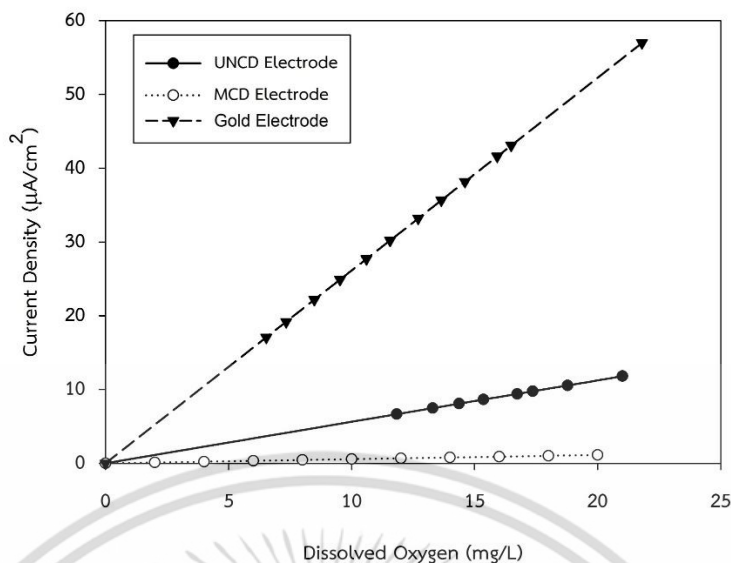
สำหรับขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์เจือไนโตรเจนซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าพลาแนร์ขนาด $2.5 \times 2.5 \text{ mm}^2$ เมื่อทำการทดลองหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า พบว่าที่ปริมาณออกซิเจน 20 mg/L ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าประมาณ $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ จากนั้นนำค่าที่ได้ไปเทียบกับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชรชนิดไมโครคริสตัลไลน์เจือโบรอนแบบ D3 ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.16 พบว่าที่ปริมาณออกซิเจน 20 mg/L ขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์เจือไนโตรเจนให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากกว่าขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชรชนิดไมโครคริสตัลไลน์เจือโบรอนแบบ D3 ประมาณ 10 เท่า จากนั้นนำค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขั้วไฟฟ้าทั้งสองชนิดไปเทียบกับขั้วไฟฟ้าที่ทำจากวัสดุทองซึ่งมีพื้นที่ขั้วไฟฟ้าเป็นลักษณะวงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 mm ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.17 ซึ่งพบว่าที่ปริมาณออกซิเจน 20 mg/L ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าทองนั้นมีค่าประมาณ $50 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ซึ่งมากกว่าขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์เจือไนโตรเจนประมาณ 5 เท่า



รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชรชนิดไมโครคริสตัลไลน์

เจือโบรอน (D3) กับขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์แบบพลาแนร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

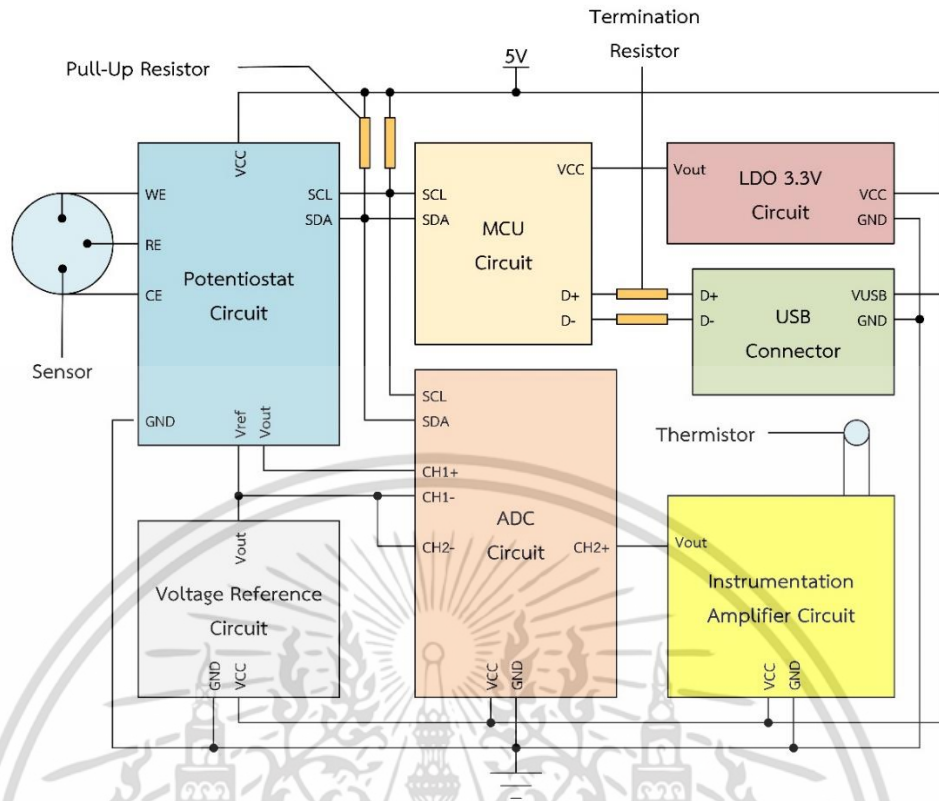


รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชรทั้งสองชนิดกับขั้วไฟฟ้าทอง

จากการทดลองพบว่าขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชรทั้งสองชนิดมีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าแปรผันตรงกับปริมาณออกซิเจนในน้ำในลักษณะเชิงเส้น ซึ่งขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์เจือไนโตรเจนแบบพลาสมารันมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากกว่าขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชรชนิดไมโครคริสตัลไลน์เจือโบรอนแบบแถว (D3) หากนำขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์เจือไนโตรเจนไปสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าแบบแถวที่มีระยะห่างเหมาะสมจะทำให้ได้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอีก

4.6 การประยุกต์ใช้งานหัววัด

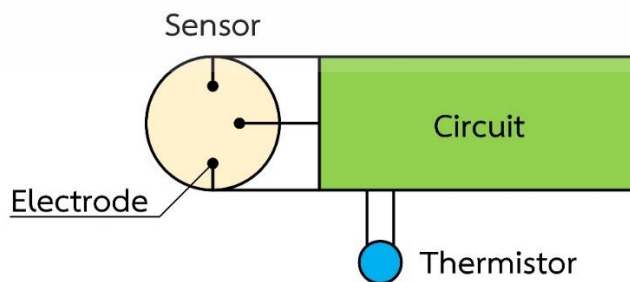
ขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชรที่สร้างเสร็จแล้วนั้นจะถูกนำมาประกอบเข้ากับส่วนต่างๆ เป็นหัววัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายซึ่งมีวงจรวัดบรรจุอยู่ในหัววัด หลังจากนั้นนำหัววัดที่ได้มาเชื่อมต่อกับวงจรประมวลผลทำให้ได้เครื่องมือสำหรับวัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลาย โดยภาพรวมของส่วนประกอบทั้งหมดแสดงได้ดังรูปที่ 4.18 ซึ่งมีรายละเอียดการสร้างส่วนต่างๆ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.18 ส่วนประกอบของหัววัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายและวงจรประมวลผล

4.6.1 การสร้างหัววัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลาย

หัววัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายนั้น ประกอบไปด้วยเซ็นเซอร์วัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายซึ่งสร้างจากขั้วไฟฟ้าเคมีที่สร้างขึ้น เทอร์มิสเตอร์สำหรับวัดค่าอุณหภูมิ และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก (วงจรหัววัด) สำหรับอ่านค่าจากเซ็นเซอร์วัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายและเทอร์มิสเตอร์ เพื่อแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลสำหรับประมวลผล ส่วนประกอบของหัววัดแสดงได้ดังรูปที่ 4.19 ซึ่งมีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้



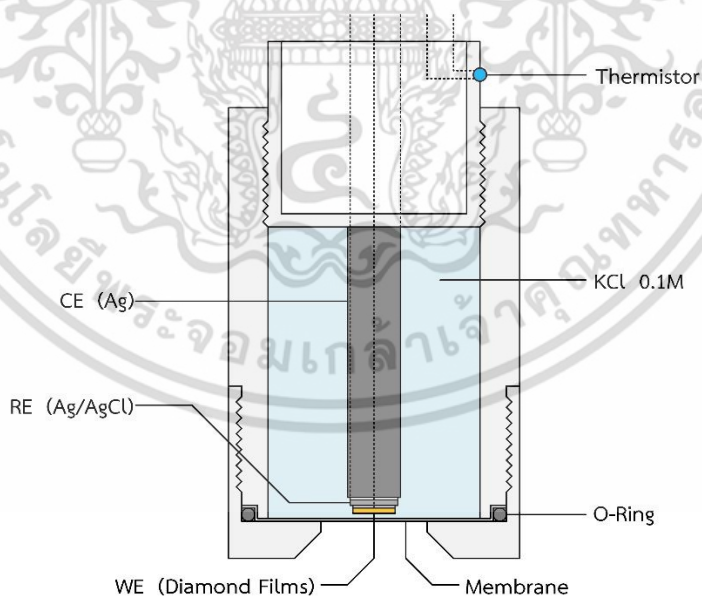
รูปที่ 4.19 ส่วนประกอบของหัววัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.1.1 เซ็นเซอร์วัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลาย

เซ็นเซอร์วัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายนั้นได้จากการนำขั้วไฟฟ้าที่สร้างขึ้นบรรจุลงไปในวัสดุที่ทำจากโพลีเอทิลีนที่ถูกเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยมีเยื่อเลือกผ่าน (Membrane) เป็นตัวกั้นระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์กับสารละลายตัวอย่าง โดยคุณสมบัติของเยื่อเลือกผ่านจะยอมให้ออกซิเจนผ่านเข้าไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ขึ้นบริเวณขั้วไฟฟ้า ใช้ขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชรที่สร้างขึ้นเป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (WE) ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (RE) ใช้วัสดุ เงิน/เงินคลอไรด์ ขั้วไฟฟ้าเงินเป็นขั้วไฟฟ้าช่วย (CE) และใช้ KCl ความเข้มข้น 0.1 M เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ สำหรับขั้วไฟฟ้าทำงานนั้นจะใช้ลวดเงินเชื่อมกับฐานรองซิลิคอนด้วยกาวเงิน (Silver Paste) โครงสร้างของเซ็นเซอร์แสดงได้ดังรูปที่ 4.20

ผลของปฏิกิริยารีดอกซ์ทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าขึ้นซึ่งจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณออกซิเจนที่แพร่ผ่านเยื่อเลือกผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยา ผลที่ได้คือค่ากระแสไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงตามปริมาณออกซิเจนในสารละลาย ทำให้สามารถหาปริมาณออกซิเจนจากกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น โดยมีเทอร์มิสเตอร์เป็นตัววัดอุณหภูมิเพื่อนำไปประมวลผลหาค่าของอุณหภูมิที่มีต่อการวัด อย่างไรก็ตามกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซ็นเซอร์นั้นมีค่าน้อยมาก จึงต้องนำไปเชื่อมต่อกับวงจรหัววัดเพื่อแปลงและขยายค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้เป็นค่าศักย์ไฟฟ้าและแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้เป็นข้อมูลดิจิทัลเพื่อส่งไปยังวงจรประมวลผลเพื่อทำการประมวลผลและแสดงค่าที่วัดได้จากเซ็นเซอร์

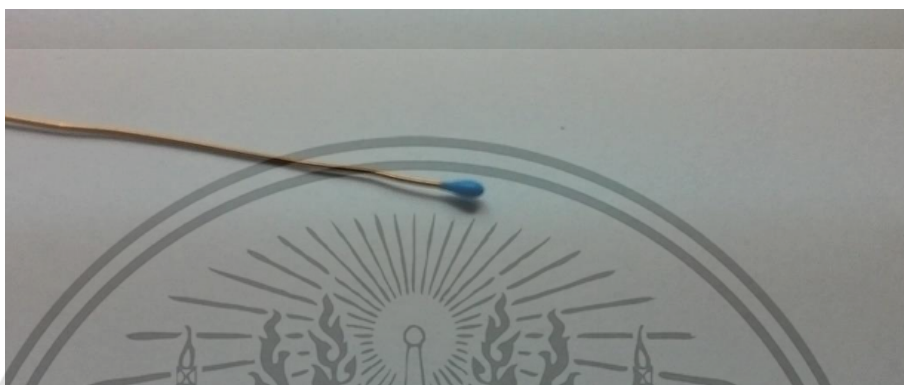


รูปที่ 4.20 โครงสร้างของเซ็นเซอร์วัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.1.2 เทอร์มิสเตอร์สำหรับวัดค่าอุณหภูมิ

อุณหภูมิของสารละลายมีผลต่อความสามารถในการละลายของออกซิเจนในสารละลาย โดยออกซิเจนสามารถละลายในสารละลายได้ดีที่อุณหภูมิต่ำและที่อุณหภูมิสูงความสามารถในการละลายของออกซิเจนในสารละลายนั้นๆ จะลดลง ผลก็คือค่าความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายจะแปรผกผันกับค่าอุณหภูมิ



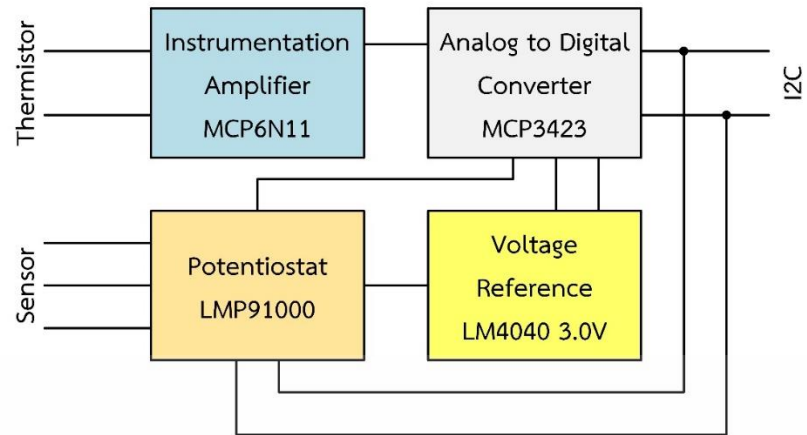
รูปที่ 4.21 เทอร์มิสเตอร์เบอร์ NXFT15XV103FA2B150

แต่เนื่องจากในการวัดจริงนั้นเยื่อเลือกผ่านที่มีคุณสมบัติให้เฉพาะแก๊สออกซิเจนผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารละลายในหัววัดจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิ ดังนั้นจึงต้องนำอุณหภูมิของสารละลายมาประมวลผลร่วมด้วย ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ NTC Thermistor มีค่าความต้านทาน 10k Ω ที่อุณหภูมิ 25 $^{\circ}\text{C}$ เบอร์ NXFT15XV103FA2B150 ดังรูปที่ 4.21

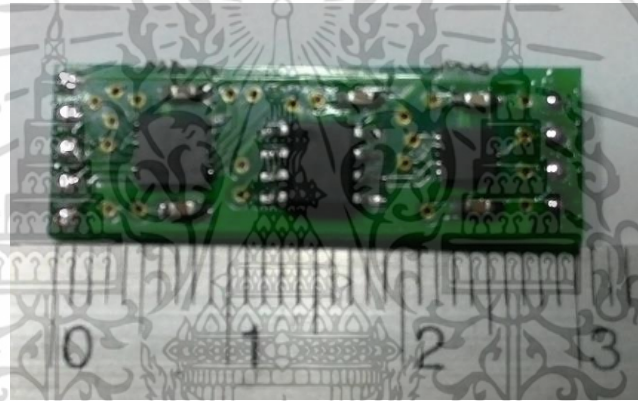
4.6.1.3 วงจรหัววัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลาย

วงจรวัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายมีหน้าที่ในการป้อนศักย์ไฟฟ้าและอ่านค่าจากเซ็นเซอร์และเทอร์มิสเตอร์ จากนั้นค่าที่อ่านได้จะถูกแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิทัลเพื่อใช้ในการประมวลผล โดยมีวงจรโพเทนชิโอสแตทใช้สำหรับควบคุมศักย์ไฟฟ้าและอ่านค่าจากเซ็นเซอร์วัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลาย วงจร Instrumentation Amplifier เพื่อใช้สำหรับอ่านค่าจากเทอร์มิสเตอร์ วงจร Analog to Digital Converter ความละเอียด 18 bits ใช้สำหรับแปลงสัญญาณอนาล็อกที่ได้จากเซ็นเซอร์และเทอร์มิสเตอร์ให้เป็นสัญญาณดิจิทัล และวงจรศักย์ไฟฟ้าอ้างอิงที่จ่ายให้กับวงจรหัววัด ส่วนประกอบของวงจรหัววัดแสดงได้ดังรูปที่ 4.22 ตัววงจรมีจุดเชื่อมต่อสองชุดโดยชุดแรกเป็นจุดเชื่อมต่อกับเซ็นเซอร์และเทอร์มิสเตอร์ ส่วนอีกชุดเป็นจุดเชื่อมต่อกับวงจรประมวลผลซึ่งประกอบไปด้วยจุดเชื่อมต่อสำหรับป้อนศักย์ไฟฟ้าให้กับวงจรและจุดเชื่อมต่อสำหรับการสื่อสารแบบ I2C โดยแผ่น PCB ของวงจรมีขนาด 3x1 cm เพื่อให้สามารถบรรจุอยู่ในหัววัดได้ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.23 (ภาพวงจรทั้งหมดอยู่ในภาคผนวก)

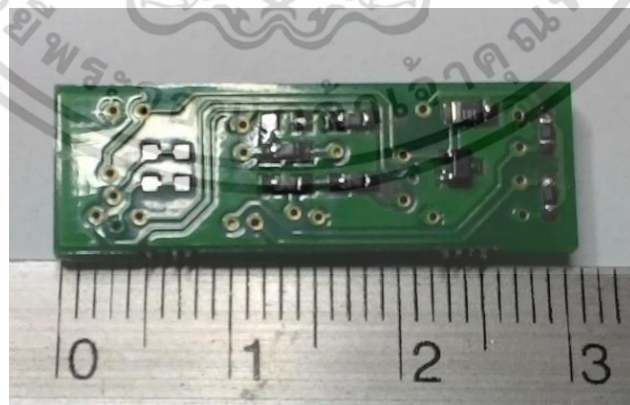
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 ส่วนประกอบของวงจรหัววัด



(a)



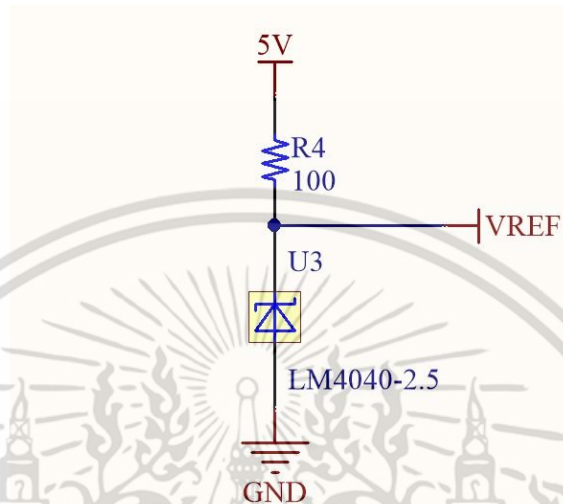
(b)

รูปที่ 4.23 PCB วงจรหัววัด (a) ด้านบน (b) ด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.1.3.1 วงจรศักย์ไฟฟ้าอ้างอิง

วงจรศักย์ไฟฟ้าอ้างอิงเป็นวงจรที่ใช้สำหรับแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับวงจรหัววัดให้เป็นค่าศักย์ไฟฟ้าที่ต้องการเพื่อใช้สำหรับวงจรโพเทนชิโอสแตท โดยใช้ IC เบอร์ LM4040 ค่าศักย์ไฟฟ้าอ้างอิง 2.5 V วงจรแสดงได้ดังรูปที่ 4.24

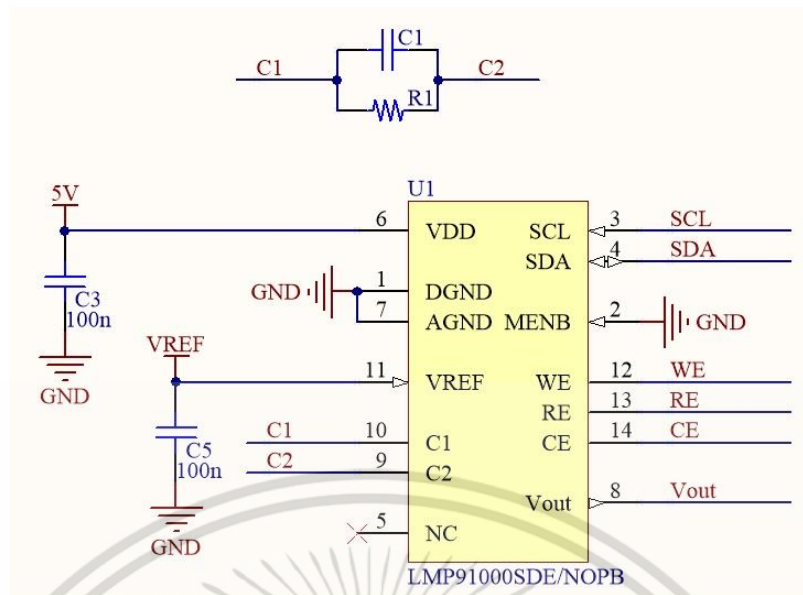


รูปที่ 4.24 วงจรศักย์ไฟฟ้าอ้างอิงที่ใช้ในวงจรหัววัด

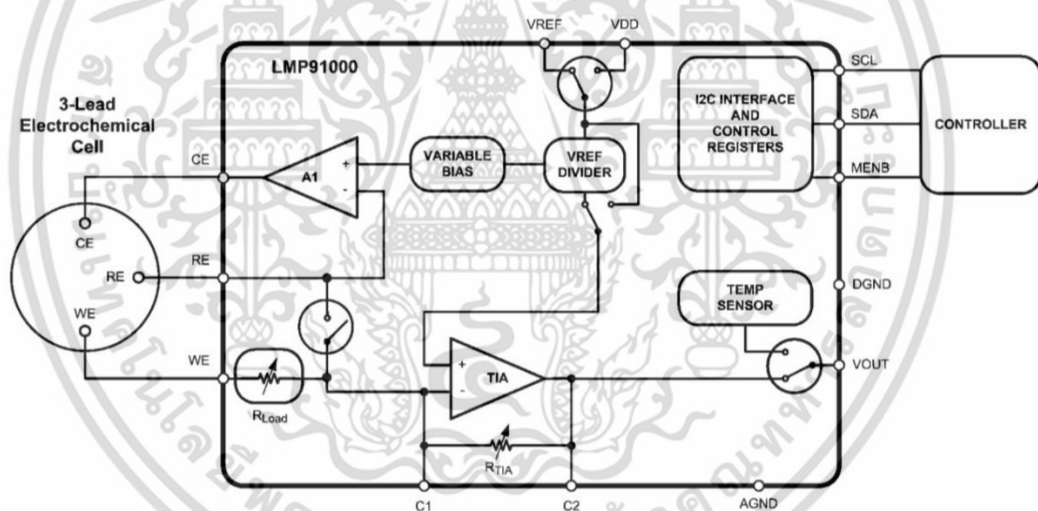
4.6.1.3.2 วงจรโพเทนชิโอสแตท

วงจรโพเทนชิโอสแตทที่ใช้ในวงจรหัววัดนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 4.25 ซึ่งได้ใช้ IC เบอร์ LMP91000 ซึ่งเป็น IC ที่ใช้สำหรับเซ็นเซอร์ไฟฟ้าเคมีโดยเฉพาะ สามารถตั้งค่าศักย์ไฟฟ้าที่อยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าทำงานกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงได้จากศักย์ไฟฟ้าอ้างอิงที่ป้อนให้ ตั้งค่าอัตราขยายสำหรับวงจร Transimpedance Amplifier ที่อยู่ภายในตัว IC ได้ เป็นต้น ค่าสัญญาณที่ได้จาก IC เป็นสัญญาณอนาล็อก โดยตัว IC นั้นใช้การสื่อสารแบบ I2C ในการสื่อสารและควบคุมด้วยวงจรประมวลผล

วงจรภายในตัว IC นั้นแสดงได้ดังรูปที่ 4.26 ซึ่งประกอบไปด้วย A1 เป็นวงจรป้อนศักย์ไฟฟ้าให้กับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (RE) และจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขั้วไฟฟ้าช่วย (CE) โดยขั้วไฟฟ้าทำงาน (WE) นั้นต่ออยู่กับ R_{Load} ที่สามารถตั้งค่าได้ กระแสไฟฟ้าที่ได้จากขั้วไฟฟ้าทำงานนั้นจะถูกแปลงให้เป็นศักย์ไฟฟ้าด้วย TIA โดยสามารถปรับอัตราขยายที่ R_{TIA} ได้ สำหรับศักย์ไฟฟ้าอ้างอิงที่ใช้ภายในตัว IC นั้นได้มาจากศักย์ไฟฟ้าอ้างอิงภายนอก โดยทำการตั้งค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าทำงานและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงที่ -0.6 V เพื่อให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ขึ้นในสารละลายอิเล็กโทรไลต์



รูปที่ 4.25 วงจรโพเทนชิโอสแตทที่ใช้ในวงจรหัววัด



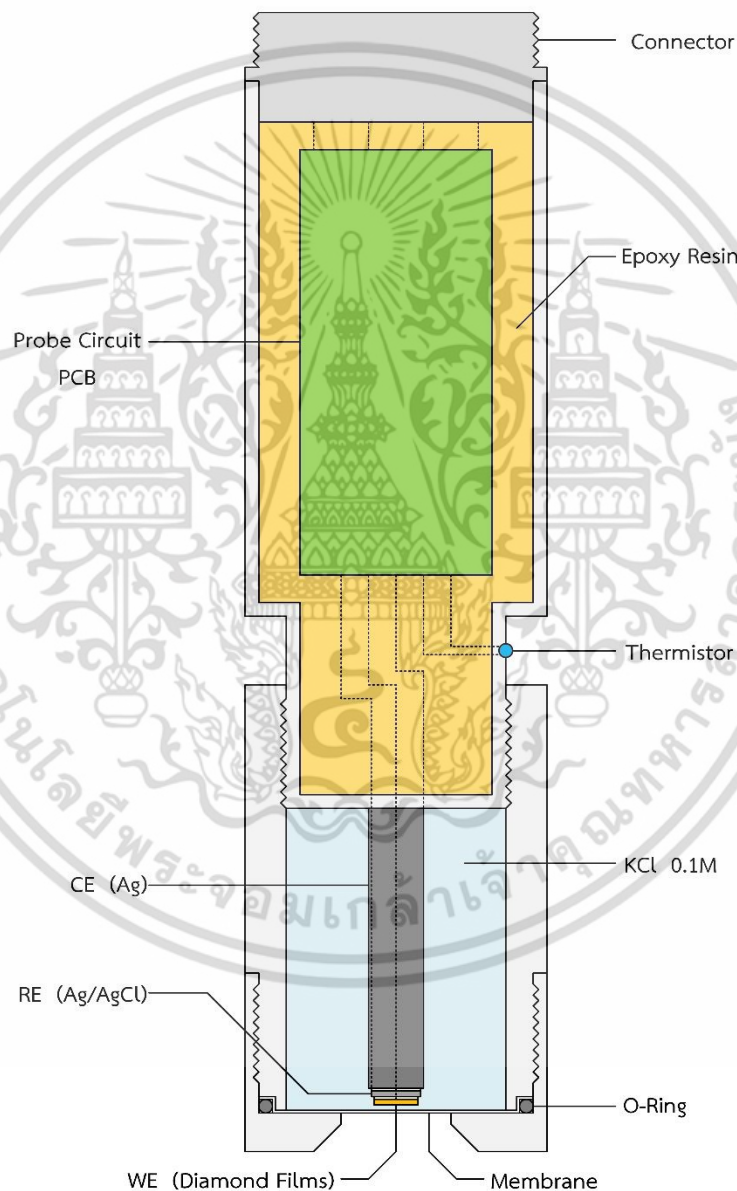
รูปที่ 4.26 วงจรที่อยู่ภายใน IC LMP91000

4.6.1.3.3 วงจร Instrumentation Amplifier

เป็นวงจรที่ใช้สำหรับวัดค่าความแตกต่างของสัญญาณไฟฟ้าโดยใช้ IC เบอร์ MCP6N11 เป็น IC Instrumentation Amplifier สามารถตั้งอัตราขยายได้โดยเชื่อมต่อกับตัวต้านทานภายนอก วงจรนี้มีหน้าที่อ่านค่าความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากวงจร Wheatstone Bridge ที่เชื่อมต่อกับเทอร์มิสเตอร์เพื่ออ่านค่าความเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิดังรูปที่ 4.27 เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจะทำให้ค่าความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์ T1 เปลี่ยนแปลง ส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้า VIP และ VIM ไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงสามารถนำค่าความต่างศักย์นี้ไปใช้หาค่าอุณหภูมิได้ ซึ่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.1.4 หัววัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลาย

หัววัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลาย ได้จากการนำเซ็นเซอร์วัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายที่ได้จากขั้วไฟฟ้าเคมีที่สร้างขึ้นและเทอร์มิสเตอร์สำหรับวัดอุณหภูมิ มาทำการเชื่อมต่อกับวงจรหัววัด โดยอุปกรณ์ต่างๆ ถูกบรรจุอยู่ในวัสดุที่ทำจากโพลีเอทิลีนและหล่อทับด้วยกาวอีพ็อกซี่ โดยมีขั้วเชื่อมต่อกับวงจรประมวลผลดังรูปที่ 4.29 และรูปที่ 4.30 แสดงรูปหัววัดที่ประกอบเสร็จ



รูปที่ 4.29 โครงสร้างของหัววัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลาย

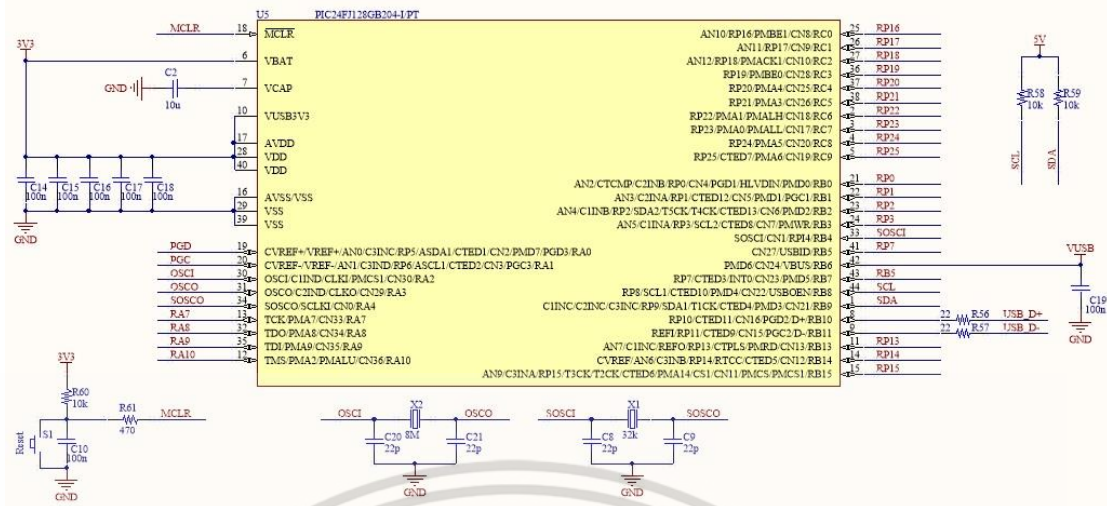
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



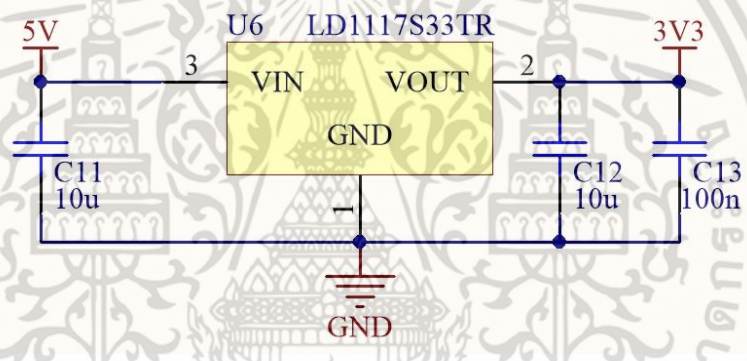
รูปที่ 4.30 หัววัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลาย

4.6.2 การสร้างวงจรประมวลผล

วงจรประมวลผลมีหน้าที่สำหรับเป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 5 V ควบคุมสั่งการ และอ่านค่าจาก หัววัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายด้วยการสื่อสารแบบ I2C ซึ่งใช้ขาสัญญาณเพียงสองเส้น ทำให้สามารถควบคุมสั่งการและอ่านค่าด้วยสายสัญญาณเดียวกันซึ่งสะดวกต่อการใช้งาน โดยวงจรนี้ถูก ออกแบบให้รับแหล่งจ่ายแรงดัน 5 V ผ่านสาย USB และสามารถสื่อสารกับคอมพิวเตอร์ผ่านสาย USB ได้ ทำให่วงจรสามารถสื่อสารผ่านคอมพิวเตอร์และรับแหล่งจ่ายแรงดันจากคอมพิวเตอร์ด้วย สาย USB เพียงเส้นเดียวทำให้ง่ายต่อการใช้งาน ในตัววงจรยังได้ออกแบบให้มีจุดเชื่อมต่อกับขาใช้งาน ของไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้งานด้านอื่นๆ ได้ ซึ่งรูปที่ 4.31 แสดงวงจร ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในวงจรประมวลผลและรูปที่ 4.32 แสดงวงจร Voltage Regulator 3.3 V (ภาพวงจรทั้งหมดอยู่ในภาคผนวก)



รูปที่ 4.31 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในวงจรประมวลผล

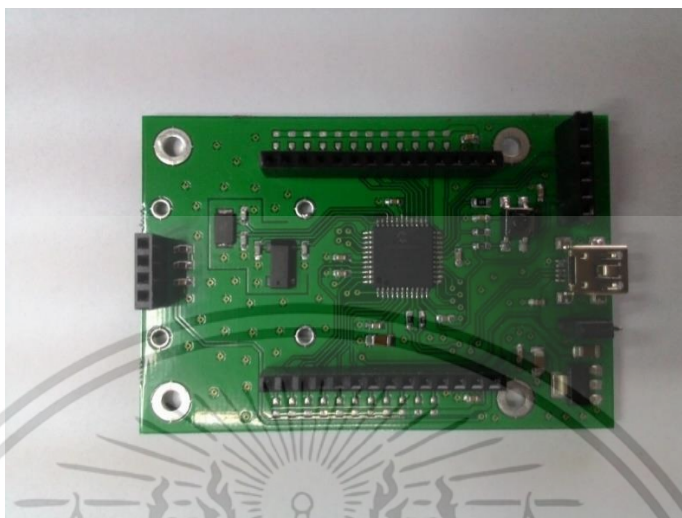


รูปที่ 4.32 วงจร Voltage Regulator 3.3 V ที่ใช้ในวงจรประมวลผล

วงจรประมวลผลนั้นได้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ PIC24FJ128GB204 ในการควบคุมและประมวลผล เนื่องจากมีความเหมาะสมในการใช้งานหลายๆ ด้าน เช่น มีโมดูลสื่อสาร USB ในตัวทำให้สามารถรวมขาแหล่งจ่ายไฟ 5 V และขาสื่อสารที่ใช้เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ไว้ในคอนเนคเตอร์ Mini USB Type B เพียงตัวเดียวทำให้สะดวกต่อการใช้งาน สามารถสลับขาสัญญาณต่างๆ เพื่อให้ประยุกต์ใช้งานได้ง่ายขึ้น มีแหล่งจ่ายสัญญาณนาฬิกาภายในตัวสองชุดทำให้ลดอุปกรณ์เชื่อมต่อลง มีโหมดประหยัดพลังงาน และมีนาฬิกาติจิตอล (Real Time Clock) ภายในตัว เป็นต้น ในวงจรนั้นได้ใช้แหล่งจ่ายสัญญาณนาฬิกาภายนอกความถี่ 8 MHz และความถี่ 32 kHz โดยมีวงจร Phase Lock Loop (PLL) ภายในตัวทำให้สามารถเพิ่มความถี่สัญญาณนาฬิกาเป็นจาก 8 MHz เป็น 32 MHz ใช้ IC เบอร์ LD1117 ขนาด 3.3 V เป็น IC Low Drop Out (LDO) เพื่อใช้ในวงจรลดแรงดัน 5 V ที่จ่ายผ่าน USB คอนเนคเตอร์ ในวงจรนั้นได้ออกแบบให้มีจุดเชื่อมต่อที่เข้ากับหัววัดความเข้มข้นของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกซิเจนในสารละลายโดยเฉพาะและสามารถพัฒนาให้เป็นเครื่องมือพกพา อ่านข้อมูลส่งข้อมูลแบบไร้สาย และมีจอแสดงผลได้ โดยได้ออกแบบ PCB ให้มีขนาด 3x2 นิ้ว ดังรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 PCB วงจรประมวลผล

4.7 โปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง

วงจรประมวลผลได้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมสั่งการ ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นจะต้องมีการเขียนคำสั่งควบคุมการทำงานต่างๆ ในคอมพิวเตอร์แล้วทำการโปรแกรมลงไปในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งภาษาที่ใช้เขียนคำสั่งนั้นมีหลายภาษา ในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม MPLAB XC16 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับเขียนคำสั่งและโปรแกรมลงไปในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ของบริษัท Microchip โดยเฉพาะด้วยภาษา C การทำงานของโปรแกรมแสดงได้ดังรูปที่ 4.34 มีรายละเอียดดังนี้

ตั้งค่าไมโครคอนโทรลเลอร์

- ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการตั้งค่าต่างๆ ให้กับตัวเอง เช่น สัญญาณนาฬิกา การ Interrupt กำหนดขาอุปกรณ์ กำหนดและตั้งค่าพอร์ตสื่อสาร อ่านข้อมูลที่ทำการบันทึกไว้ เป็นต้น เพื่อให้พร้อมสำหรับการทำงานต่อไป
- ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการตั้งค่าต่างๆ ให้กับ IC โทเทินซีไอสแตทและ ADC ที่อยู่ในวงจรหัววัดด้วยการสื่อสารแบบ I2C เช่น อัตราขยาย ศักย์ไฟฟ้าอ้างอิง และความละเอียด ADC เป็นต้น เพื่อใช้ในการอ่านค่าจากเซ็นเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรวจสอบการเรียกใช้ฟังก์ชัน Calibration

- ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการตรวจสอบพอร์ตสื่อสารที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อตรวจสอบว่ามีคำสั่งเรียกใช้ฟังก์ชัน Calibration หรือไม่ หากมีจะเข้าสู่หน้าจอ Calibration หากไม่มีจะเข้าสู่การวัดค่า

ไม่มีคำสั่งเรียกใช้ฟังก์ชัน Calibration

- ไมโครคอนโทรลเลอร์ส่งคำสั่งไปยัง IC ADC เพื่อแปลงค่าสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้จาก IC โปเทนชิโอสแตทและ IC Instrumentation Amplifier ให้เป็นสัญญาณดิจิทัลแล้วทำการส่งให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อนำไปประมวลผล

- ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการประมวลผลค่าสัญญาณที่อ่านได้ให้เป็นค่าความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายและค่าอุณหภูมิ

- ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการประมวลผลค่าความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายกับค่าอุณหภูมิเพื่อทำการชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิของสารละลาย

- ไมโครคอนโทรลเลอร์ส่งข้อมูลที่ประมวลผลเรียบร้อยแล้วไปยังพอร์ตสื่อสาร UART หรือ USB เพื่อแสดงค่าความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายและอุณหภูมิของสารละลาย

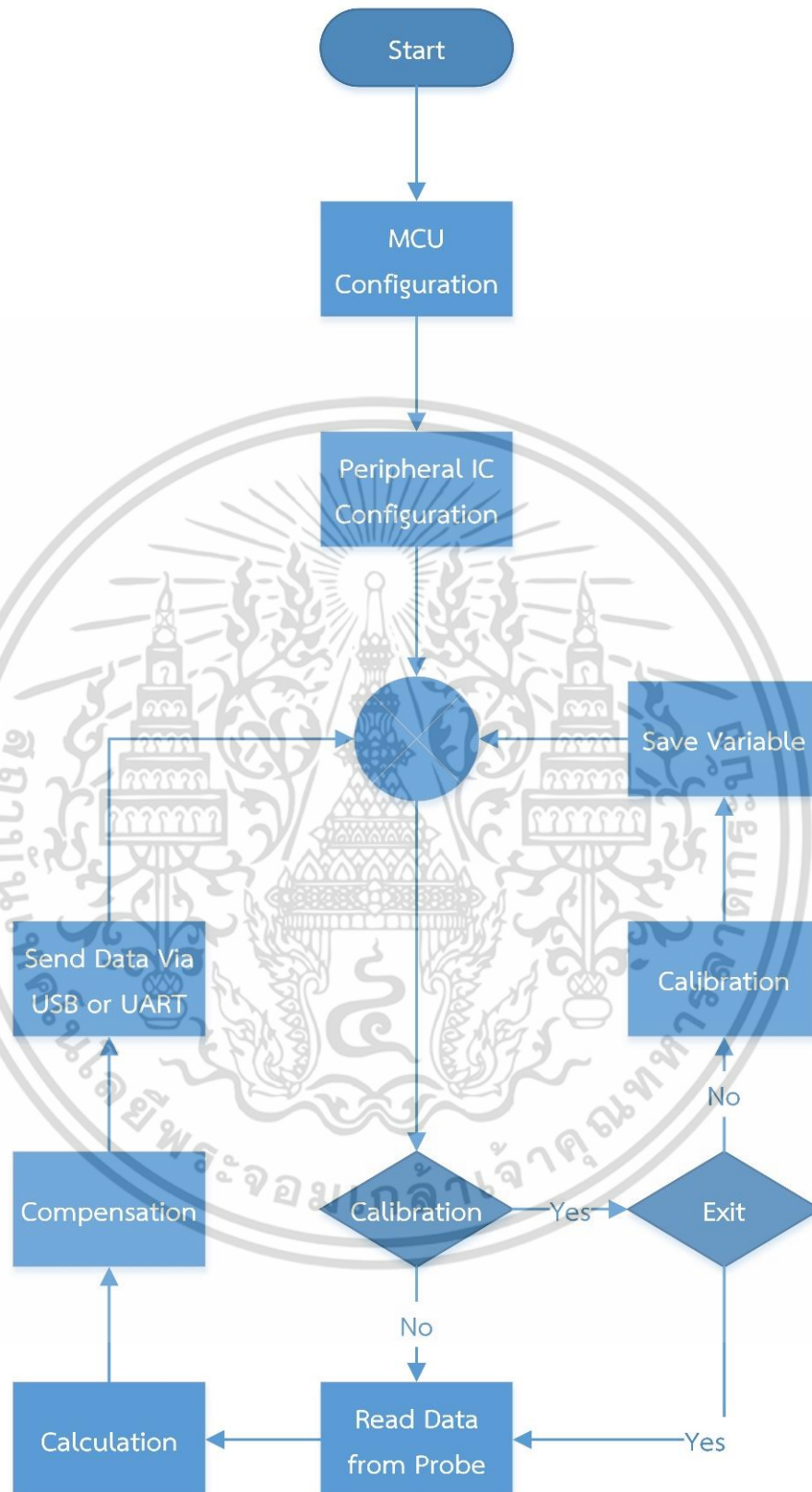
- กลับสู่ขั้นตอนการตรวจสอบการเรียกใช้ฟังก์ชัน Calibration

มีคำสั่งเรียกใช้ฟังก์ชัน Calibration

- คอมพิวเตอร์แสดงหน้าจอ Calibration เพื่อทำการสอบเทียบค่าความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายและค่าอุณหภูมิที่วัดได้ให้ตรงกับค่าจริง โดยค่าความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายจะทำการเทียบกับอากาศซึ่งมีออกซิเจนอยู่ประมาณ 20.9% ส่วนค่าอุณหภูมินั้นจะเทียบกับค่าอุณหภูมิที่วัดได้จริงจากแหล่งอื่น เช่น เทอร์โมมิเตอร์ แล้วทำการพิมพ์ค่าลงไปบนคอมพิวเตอร์เพื่อทำการตั้งค่า

- ทำการบันทึกค่าตัวแปรต่างๆ ลงไปในหน่วยความจำ

- กลับสู่ขั้นตอนการตรวจสอบการเรียกใช้ฟังก์ชัน Calibration



รูปที่ 4.34 แผนภาพการทำงานของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8 การทดสอบเครื่องวัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลาย

4.8.1 การวัดปริมาณออกซิเจนค่าต่างๆ ที่ละลายในน้ำ

จากการทดลองวัดค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเคมีของขั้วไฟฟ้าเพชร นำค่าสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้แปลงเป็นค่าความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายและแสดงค่าด้วยวงจรถรมผลเปรียบเทียบกับเครื่องวัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายยี่ห้อ Extech ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบผลการวัดค่าความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายของเครื่องต้นแบบกับเครื่องวัดยี่ห้อ Extech

เครื่องวัด DO ของ Extech mg/L	เครื่องวัด DO ที่พัฒนาขึ้น mg/L	ความคลาดเคลื่อน %
0	0	0
2.00	2.11	5.5
4.00	4.15	3.75
6.00	6.10	1.6
8.00	8.08	1
10.00	10.13	1.3
12.00	12.18	1.5
14.00	14.19	1.35
16.00	16.20	1.25
18.00	18.25	1.38
20.00	20.22	1.11%

เห็นได้ว่าเครื่องวัดออกซิเจนที่พัฒนาขึ้นสามารถวัดปริมาณออกซิเจนในสารละลายที่ค่า 0 - 20 mg/L ได้และมีค่าการวัดที่แตกต่างจากเครื่องวัดมาตรฐานไม่เกิน 6%

4.8.2 การวัดปริมาณออกซิเจนในน้ำอิมิตัวด้วยอากาศที่อุณหภูมิค่าต่างๆ

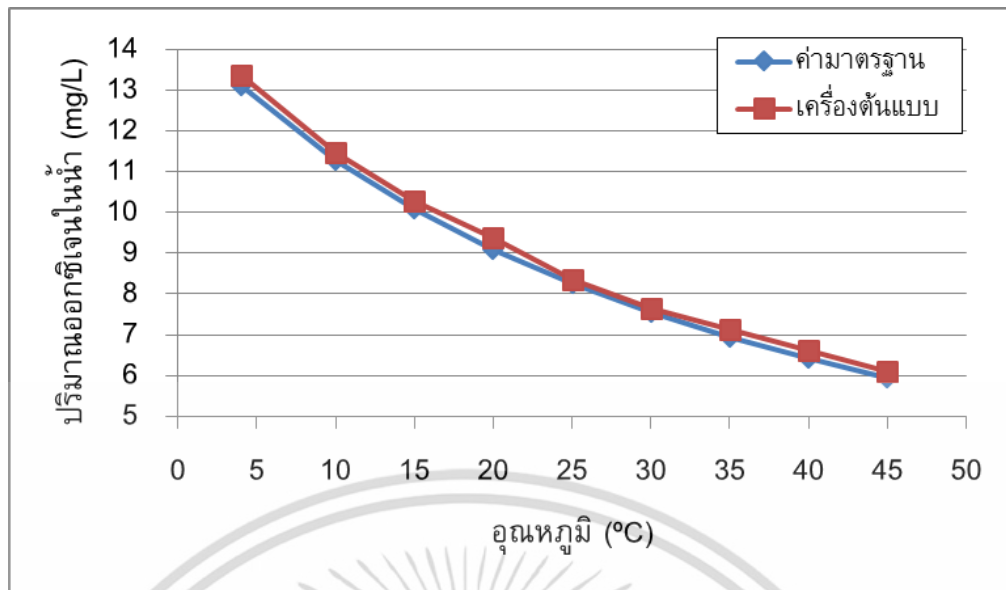
เนื่องจากการวัดออกซิเจนในสารละลายด้วยปฏิกิริยาไฟฟ้าจะมีผลการวัดที่ขึ้นกับอุณหภูมิ อีกทั้งการใช้เยื่อเลือกผ่านปิดกั้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่หัววัดออกซิเจนทำให้ออกซิเจนต้องเคลื่อนที่ผ่านเยื่อเลือกผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีกับขั้วไฟฟ้าทำงาน ซึ่งปริมาณของออกซิเจนที่ผ่านเยื่อเลือกผ่านในขณะที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่าที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง ดังนั้นต้องมีการชดเชยค่าของอุณหภูมิเข้าไปในการประมวลผลเพื่อให้ค่ามีความถูกต้องจากการวัด ซึ่งในการชดเชยค่าทางอุณหภูมิได้ใช้เทอร์มิสเตอร์ทำการชดเชยที่อุณหภูมิ 0 - 45 °C เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการทดสอบวัดปริมาณออกซิเจนในน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศได้เตรียมการโดยใช้ปิเกอร์ใส่น้ำบริสุทธิ์ 500 cc เติมอากาศด้วยปั๊มลมตู้ปลาไปใต้น้ำแบบฟองอากาศเป็นเวลา 15 นาที ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ ตั้งแต่ 4 - 45 °C ทำการบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณออกซิเจนในน้ำด้วยเครื่องวัดออกซิเจนที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานดังตารางที่ 4.3 เพื่อนำข้อมูลที่ได้เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำดังรูปที่ 4.35

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงปริมาณออกซิเจนในน้ำอิ่มตัวด้วยอากาศจากค่ามาตรฐานกับเครื่องต้นแบบที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ °C	ค่ามาตรฐาน mg/L	เครื่องวัดออกซิเจนที่พัฒนาขึ้น mg/L	ความคลาดเคลื่อน %
4	13.11	13.36	1.91
10	11.29	11.47	1.59
15	10.08	10.28	1.85
20	9.09	9.39	3.3
25	8.26	8.35	1.09
30	7.56	7.65	1.45
35	6.95	7.12	2.44
40	6.41	6.60	2.96
45	5.93	6.10	2.86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศต่ออุณหภูมิที่ค่าต่างๆ

จากการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำจะมีปริมาณลดลงและค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดออกซิเจนที่พัฒนาขึ้นเมื่อทำการชดเชยแล้วมีความคลาดเคลื่อนจากค่ามาตรฐานไม่เกิน 4%

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาและทดลองการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดไมโครคริสตัลไลน์เจือโบรอนและฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์เจือไนโตรเจน พบว่าเงื่อนไขการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรทั้งสองชนิดนี้มีความแตกต่างกัน โดยปัจจัยหลักในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรทั้งสองชนิดนี้คือปริมาณของอะตอมไฮโดรเจนที่อยู่ในบรรยากาศการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร โดยพบว่าหากปริมาณอะตอมไฮโดรเจนมีมากจะส่งผลให้ได้ฟิล์มเพชรชนิดไมโครคริสตัลไลน์ซึ่งมีขนาดผลึกอยู่ในระดับไมโครเมตร แต่เมื่อทำการปรับให้มีปริมาณอะตอมไฮโดรเจนน้อยลงโดยใช้แก๊สอาร์กอนแทนแก๊สไฮโดรเจนจะส่งผลให้ได้ฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์ สำหรับการเตรียมผิวหน้าโดยการขัดด้วยครีมเพชรที่มีขนาดของผลึกเพชร $0.25\ \mu\text{m}$ เมื่อนำชิ้นงานไปมองผ่านกล้องจุลทรรศน์จะพบร่องรอยขีดข่วนของผลึกเพชร แต่การเตรียมผิวหน้าด้วยการอัลตราโซนิคในสารละลายที่มีส่วนผสมของผงเพชรขนาด $3\ \text{nm}$ เมื่อนำชิ้นงานไปมองผ่านกล้องจุลทรรศน์จะไม่พบร่องรอยของผลึกเพชรบนแผ่นฐานรองเนื่องจากผงเพชรมีขนาดเล็กระดับนาโนเมตร เมื่อนำฐานรองที่ถูกเตรียมด้วยวิธีการทั้งสองไปทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรทำให้ได้ความหนาแน่นนิวคลีเอชันเพิ่มขึ้น จากนั้นทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรสำหรับใช้เป็นขั้วไฟฟ้าเคมี พบว่าฟิล์มเพชรชนิดไมโครคริสตัลไลน์เจือโบรอนที่สร้างด้วยเทคนิค HFCVD ได้ใช้อุณหภูมิขดลวด $2300\ ^\circ\text{C}$ ระยะห่างระหว่างขดลวดกับฐานรอง $4\ \text{mm}$ ทำให้ได้อุณหภูมิของฐานรอง $850\ ^\circ\text{C}$ ปริมาณ $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 1% ในแก๊ส H_2 อัตราการไหล H_2 อยู่ที่ $200\ \text{sccm}$ อัตราการไหลของ $\text{H}_2 + \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + \text{B}_2\text{O}_3$ อยู่ที่ $2.5\ \text{sccm}$ ความดัน $50\ \text{Torr}$ โดยมีปริมาณสารเจือ B/C 10, 100, 1000 และ 10000 ppm ได้ฟิล์มเพชรชนิดไมโครคริสตัลไลน์ที่อัตราการก่อตัวของผลึก $0.8\ \mu\text{m}/\text{hr}$ พบว่าสภาพด้านทานไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนของ B/C เพิ่มขึ้น สำหรับการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์เจือไนโตรเจนได้ใช้เทคนิค MPCVD อุณหภูมิฐานรอง $800\ ^\circ\text{C}$ ความดัน $90\ \text{Torr}$ อัตราส่วนแก๊ส $\text{CH}_4:\text{N}_2:\text{Ar}$ ที่ 1:20:79 ความถี่ไมโครเวฟ $2.45\ \text{GHz}$ กำลัง $800\ \text{W}$ มีอัตราการก่อตัวของผลึก $0.1\ \mu\text{m}/\text{hr}$ เมื่อทำการศึกษาพื้นผิวด้วย SEM พบว่าฟิล์มเพชรชนิดไมโครคริสตัลไลน์มีขนาดของผลึกอยู่ในระดับไมโครเมตรและมีลักษณะพื้นผิวเป็นระนาบ 111 แต่สำหรับฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยกล้อง SEM จากนั้นทำการศึกษาโครงสร้างผลึกด้วย XRD พบว่าผลการทดลองที่ได้จากฟิล์มเพชรทั้งสองชนิดนั้นมีระนาบเหมือนกันแต่ฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์มีความกว้างของฐานสัญญาณมากกว่าเนื่องจากขนาดของผลึกที่มีขนาดเล็ก เมื่อนำไปเทียบกับตารางมาตรฐานของคาร์บอนพบว่าระนาบที่ได้จากการทดลองนั้นเป็นระนาบเพชร เมื่อทำการศึกษาคูณลักษณะของฟิล์มเพชรด้วย Raman Spectroscopy พบว่าฟิล์มเพชรชนิดไมโครคริสตัลไลน์ที่ปริมาณ $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 1% มียอดของสัญญาณที่ตำแหน่ง $1332\ \text{cm}^{-1}$ เพียง

ตำแหน่งเดียวซึ่งแสดงถึงความเป็นผลึกของเพชรที่ดี แต่สำหรับฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์อันใดประการใด กรุณาแจ้งให้ทราบล่วงหน้า ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั้นกลับพบยอดสัญญาณของกราฟที่ด้วยเนื่องจากคุณลักษณะของฟิล์มเพชรชนิดนี้จะมีขนาดผลึกที่เล็กระดับนาโนเมตรส่งผลให้มีพื้นที่ของขอบเขตผลึกซึ่งเป็นพันธะ sp^2 มากตามไปด้วย เมื่อทำการศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าเคมีของฟิล์มเพชรชนิดไมโครคริสตัลไลน์เจือโบรอนที่ค่าต่างกัน โดยใช้เทคนิคโวลแทมเมตรีเพื่อดูผลของปฏิกิริยารีดอกซ์สำหรับใช้เป็นขั้วไฟฟ้าเคมีเพื่อตรวจวัดปริมาณออกซิเจนจากปฏิกิริยารีดอกซ์ พบว่าที่ปริมาณ B/C 10000 ppm ให้ยอดสัญญาณของปฏิกิริยารีดอกซ์สูงสุด จึงได้เลือกใช้ B/C 10000 ppm จากนั้นทำการทดลองเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าแต่ละแบบ ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชรชนิดไมโครคริสตัลไลน์เจือโบรอนที่มีลวดลายของขั้วไฟฟ้าแตกต่างกันสามแบบ ได้แก่ แบบพลาแนร์ขนาด $2 \times 2 \text{ mm}^2$ (D1) แบบแถวขนาดขั้วไฟฟ้า $30 \times 30 \text{ }\mu\text{m}^2$ มีระยะห่างของขั้ว $40 \text{ }\mu\text{m}$ (D2) และ $100 \text{ }\mu\text{m}$ (D3) ส่วนขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์เจือไนโตรเจนใช้แบบพลาแนร์ขนาด $2.5 \times 2.5 \text{ mm}^2$ พบว่าสำหรับขั้วไฟฟ้าชนิดไมโครคริสตัลไลน์เจือโบรอนขั้วไฟฟ้าแบบแถว D3 ให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ปริมาณออกซิเจน 20 mg/L ได้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าประมาณ $1.2 \text{ }\mu\text{A/cm}^2$ เนื่องจากมีระยะห่างของขั้วที่เหมาะสมทำให้ลดผลของการแทรกสอดของชั้นแพร์ แต่ขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์เจือไนโตรเจนแบบพลาแนร์เมื่อเทียบผลการทดลองกับขั้วไฟฟ้า D3 พบว่าขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์เจือไนโตรเจนแบบพลาแนร์ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ปริมาณออกซิเจน 20 mg/L ประมาณ $10 \text{ }\mu\text{A/cm}^2$ หรือมากกว่าประมาณ 10 เท่า เมื่อเทียบกับขั้วไฟฟ้า D3 และเมื่อนำขั้วไฟฟ้าที่ทำจากวัสดุทองเปรียบเทียบผลการทดลองกับขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์เจือไนโตรเจนพบว่าขั้วไฟฟ้าทองให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ปริมาณออกซิเจน 20 mg/L ประมาณ $50 \text{ }\mu\text{A/cm}^2$ หรือมากกว่าประมาณ 5 เท่า จากนั้นทำการประกอบขั้วไฟฟ้ากับวงจรหัววัดเข้าด้วยกันเป็นหัววัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายและทำการเชื่อมต่อหัววัดเข้ากับวงจรประมวลผลที่ทำการโปรแกรมเพื่อประมวลผลชุดเลขค่าต่างๆ แล้ว จากนั้นทำการทดลองวัดความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำ พบว่าสามารถวัดค่าความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำที่ค่า $0 - 20 \text{ mg/L}$ ได้ โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 6% และเมื่อทำการทดลองวัดค่าความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำที่อุณหภูมิที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ เพื่อดูผลของการชุดเลขค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิเทียบกับค่ามาตรฐาน พบว่าค่าที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกันมากโดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 4% และเมื่อทำการพล็อตกราฟแล้วพบว่ากราฟที่ได้มีลักษณะคล้ายกัน

ข้อเสนอแนะของงานวิจัยนี้ จากการทดลองพบว่าขั้วไฟฟ้าแบบแถวที่มีระยะห่างที่เหมาะสมนั้นให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากกว่าขั้วไฟฟ้าแบบพลาแนร์ สำหรับฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์เจือไนโตรเจนแบบพลาแนร์ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากกว่าขั้วไฟฟ้าชนิดไมโครคริสตัลไลน์เจือโบรอนแบบแถว (D3) หากสร้างลวดลายขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชรชนิดอัลตรานาโนคริสตัลไลน์เจือไนโตรเจนให้เป็นแบบแถวที่มีระยะห่างที่เหมาะสมก็จะทำให้ได้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอีกและสามารถนำไปใช้แทนขั้วไฟฟ้าที่ทำจากวัสดุทองได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Wikipedia., “Carbon–carbon bond.”, Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon–carbon_bond 06/12/2017.
- [2] B. V. Spitsyn, L. L. Bouilov and B. V. Derjaguin, “Vapor growth of diamond on diamond and other surfaces”, *Journal of Crystal Growth*, 52(1), 1981, 219 – 226.
- [3] W. Zhu, A. Inspektor, A. R. Badzian, T. McKenna and R. Messier, “Effect of noble gases on diamond deposition from methane-hydrogen microwave plasma”, *Journal of Applied Physics*, 65(4), 1990, 1489.
- [4] W. Kulisch, A. Malave, G. Lippold, W. Scholz, C. Mihalcea and E. Oesterschulze, “Fabrication of integrate diamond cantilevers with tips for SPM applications”, *Diamond and Related Materials*, 6(5 – 7), 1997, 906 – 911.
- [5] Qingyun Chen, Dieter M. Gruen, Alan R. Krauss, Timothy D. Corrigan, Malgorzata Witek and Greg M. Swain, “The Structure and Electrochemical Behavior of Nitrogen-Containing Nanocrystalline Diamond Films Deposited from CH₄/N₂/Ar Mixtures”, *Journal of The Electrochemical Society*, 148(1), 2001, E44 – E51.
- [6] T.D. Corrigan, D.M. Gruen, A.R. Krauss, P. Zapol and R.P.H. Chang, “The effect of nitrogen addition to Ar/CH₄ plasmas on the growth, morphology and field emission of ultrananocrystalline diamond”, *Diamond and Related Materials*, 11(1), 2002, 43 – 48.
- [7] F G Celii and J E Butler, “Diamond Chemical Vapor Deposition”, *Annual Review of Physical Chemistry*, 42, 1991, 643 – 684.
- [8] E. Kohn, P. Gluche and M. Adamschik, “Diamond MEMS — a new emerging technology”, *Diamond and Related Materials*, 8(2 – 5), 1999, 934 – 940.
- [9] Dieter M. Gruen, Shengzhong Liu, Alan R. Krauss, Jianshu Luo and Xianzheng Pan, “Fullerenes as precursors for diamond film growth without hydrogen or oxygen additions”, *Applied Physics Letters*, 64(12), 1994, 1502.
- [10] Dieter M. Gruen, “NANOCRYSTALLINE DIAMOND FILMS”, *Annual Review of Materials Science*, 29, 1999, 211 – 259.
- [11] S. Jiao, A. Sumant, M. A. Kirk, D. M. Gruen, A. R. Krauss and O. Auciello, “Microstructure of ultrananocrystalline diamond films grown by microwave Ar–CH₄/plasma chemical vapor deposition with or without added H₂”, *Journal of Applied Physics*, 90(1), 2001, 118-122.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] A N Goyette, J E Lawler, L W Anderson, D M Gruen, T G McCauley, D Zhou and A R Krauss, "Spectroscopic determination of carbon dimer densities in Ar-H₂-CH₄ and Ar-H₂-C₆₀ plasma", *Journal of Physics D: Applied Physics*, 31(16), 1998, 1975.
- [13] Dieter M. Gruen, "Nanocrystalline Diamond Films", *Annual Review of Materials Science*, 29, 1999, 211 - 259.
- [14] D. Zhou, D. M. Gruen, L. C. Qin, T. G. McCauley and A. R. Krauss, "Control of diamond film microstructure by Ar additions to CH₄/H₂ microwave plasmas", *Journal of Applied Physics*, 84(4), 1998, 1981.
- [15] Dieter M. Gruen, Paul C. Redfern, David A. Horner, Peter Zapol and Larry A. Curtiss, "Theoretical Studies on Nanocrystalline Diamond: Nucleation by Dicarbon and Electronic Structure of Planar Defects", *The Journal of Physical Chemistry B*, 103(26), 1999, 5459 - 5467.
- [16] Michael Sternberg, Peter Zapol and Larry A. Curtiss, "Carbon dimers on the diamond (100) surface: Growth and nucleation", *Physical Review B*, 68, 2003, 205330.
- [17] Michael Sternberg, Peter Zapol and Larry A. Curtiss, "C₂ adsorption on the (100) diamond surface: periodic and large cluster calculations", *Molecular Physics*, 103(6 - 8), 2005, 1017 - 1025.
- [18] Michael Sternberg, Peter Zapol, Thomas Frauenheim, John Carlisle, Dieter M. Gruen and Larry A. Curtiss, "Density Functional Based Tight Binding Study of C₂ and CN Deposition On (100) Diamond Surface", *Materials Research Society Proceedings (Nanotubes, Fullerenes, Nanostructured and Disordered Carbon)*, 675, 2001, W12.11.1 - W12.11.5.
- [19] Michael Sternberg, David A. Horner, Paul C. Redfern, Peter Zapol and Larry A. Curtiss, "Theoretical Studies of CN and C₂ Addition to a (100)-(2 × 1) Diamond Surface: Nanocrystalline Diamond Growth Mechanisms", *Journal of Computational Theoretical Nanoscience*, 2(2), 2005, 207 - 213.
- [20] Stephen J. Harris, David N. Belton, and Richard J. Blint, "Thermochemistry on the hydrogenated diamond (111) Surface", *Journal of Applied Physics*, 70(5), 1991, 2654.
- [21] David N. Belton and Stephen J. Harris, "A mechanism for growth on diamond (110) from acetylene", *The Journal of Chemical Physics*, 96(2), 1992, 2371.
- [22] R. L. Stolk, M. M. J. W. van Herpen, J. J. ter Meulen and J. J. Schermer, "Relation between gas phase CN radical distributions, nitrogen incorporation, and growth rate in flame deposition of diamond", *Journal of Applied Physics*, 88(6), 2000, 3708.

- [23] Raymond B. Corvin, Joseph G. Harrison, Shane A. Catledge and Yogesh K. Vohra, “Gas-phase thermodynamic models of nitrogen-induced nanocrystallinity in chemical vapor-deposited diamond”, *Applied Physics Letters*, 80(14), 2002, 2550.
- [24] S. Bhattacharyya, O. Auciello, J. Birrell, J. A. Carlisle, L. A. Curtiss, A. N. Goyette, D. M. Gruen, A. R. Krauss, J. Schlueter, A. Sumant and P. Zapol, “Synthesis and characterization of highly-conducting nitrogen-doped ultrananocrystalline diamond films”, *Applied Physics Letters*, 79(10), 2001, 1441.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ออกซิเจน (Oxygen)

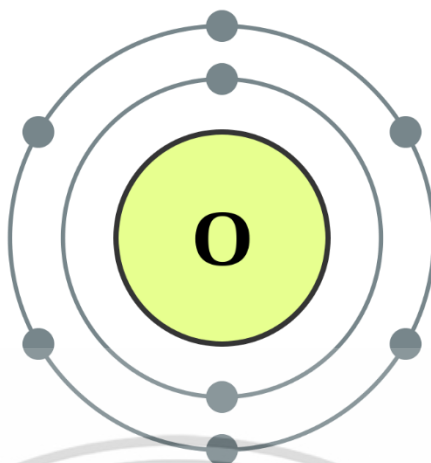
ออกซิเจนถูกค้นพบโดย คาร์ล วิลเฮล์ม เชเลอ (เยอรมัน: Carl Wilhelm Scheele; 9 ธันวาคม ค.ศ. 1742 - 21 พฤษภาคม ค.ศ. 1786) ดังรูปที่ ก.1 เป็นนักเคมีและเภสัชกรชาวเยอรมัน-สวีเดน ผู้ได้รับฉายา เชเลอผู้อำภัพ จากนักเขียน ไอแซค อสิมอฟ จากการค้นพบทางเคมีหลายอย่างแต่ไม่ได้รับการยกย่องในช่วงชีวิตของเขา



รูปที่ ก.1 คาร์ล วิลเฮล์ม เชเลอ ผู้ค้นพบออกซิเจน

เชเลอเป็นผู้ค้นพบธาตุออกซิเจน คลอรีน ทั้งสแตน และสารประกอบอินทรีย์อื่น ๆ เช่น กรดยูริก กรดแล็กติก กรดออกซาลิก เชเลอทำงานร่วมกับอาจารย์ที่มหาวิทยาลัยลุนด์ และเดินทางไปสตอกโฮล์มเพื่อรับตำแหน่งศาสตราจารย์ด้านเคมี จนกระทั่งถึงปี ค.ศ. 1770 เชเลอก็ไปเป็นผู้อำนวยการห้องปฏิบัติการที่อุพโซลา ที่นั่น เขาได้ทำการทดลองโดยให้ความร้อนกับสารต่างๆ เช่น เมอร์คิวริกออกไซด์ ซิลเวอร์คาร์บอเนต ดินประสิว จนพบว่าสารเหล่านี้ให้แก๊สชนิดหนึ่งที่เขาเรียกว่า Fire Air และต่อมารู้จักในชื่อ ออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.2 โครงสร้างอะตอมของออกซิเจน

ตารางที่ ก.1 คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติอะตอมของออกซิเจน

คุณสมบัติ	รายละเอียด
ชื่อ	ออกซิเจน (Oxygen)
สัญลักษณ์	O
เลขอะตอม	8
มวลอะตอมมาตรฐาน	15.9994 amu
การจัดเรียงอิเล็กตรอน	$1s^2 2s^2 2p^4$ (2, 6)
สถานะ	แก๊ส
ความหนาแน่นแก๊ส	101.325 kPa (0 °C)
ความหนาแน่นของเหลวที่จุดเดือด	1.141 g/cm ³
จุดหลอมเหลว	54.36 K, -218.79 °C, -361.82 °F
จุดเดือด	90.188 K, -182.962 °C, -297.332 °F
สถานะออกซิเดชัน	2, 1, -1, -2
อิเล็กโตรเนกาติวิตี	3.44 (Pauling Scale)
รัศมีอะตอม (คำนวณ)	48 pm
รัศมีโควาเลนต์	66±2 pm
รัศมีแวนเดอร์วาลส์	152 pm

ออกซิเจนเป็นธาตุหมู่ 6A ในตารางธาตุ มีสัญลักษณ์เป็น O และมีเลขอะตอมเท่ากับ 8 ดังรูปที่

ก.2 ออกซิเจนเป็นธาตุที่พบบ่อยมากบนโลก ซึ่งโมเลกุลของออกซิเจน (O₂) บนโลกนั้นมีความไม่เสถียร เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางเทอร์โมไดนามิกส์จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับธาตุอื่นๆ ได้ง่าย พบว่าในอากาศ (Air) นั้น จะมีปริมาณออกซิเจนอยู่ประมาณ 21% โดยปริมาตร มีไนโตรเจนอยู่ 78% และอีก 1% จะเป็น คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน และแก๊สอื่นๆ แสดงคุณสมบัติต่างของออกซิเจนได้ดังตารางที่ ก.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลาย (Dissolved Oxygen; DO)

ความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายหรือ DO เป็นค่าที่บอกถึงปริมาณของออกซิเจนที่อยู่ในสารละลาย ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสารละลายและความกดดันของบรรยากาศ ค่า DO นั้นมีความสำคัญมากต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำโดยค่า DO ในแหล่งน้ำธรรมชาติมีค่าอยู่ 5 - 7 mg/L ความสามารถในการละลายของออกซิเจนในน้ำจะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญสามประการได้แก่ อุณหภูมิ ความดันอากาศ และค่าความเค็มของน้ำ (Salinity) ซึ่งปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำจะแปรผกผันกับอุณหภูมิของน้ำและปริมาณเกลือแร่ที่ละลายอยู่ในน้ำ แต่จะแปรผันตรงกับความดันอากาศ กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้นหรือความเข้มข้นของเกลือแร่ที่ละลายอยู่ในน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความสามารถของออกซิเจนในการละลายน้ำลดลง แต่เมื่อความดันอากาศเพิ่มมากขึ้นก็จะส่งผลให้ความสามารถของออกซิเจนในการละลายน้ำเพิ่มมากขึ้นตาม

ค่าความเค็มของน้ำจะสัมพันธ์กับค่าคลอรีนิตี (Chlorinity) ซึ่งหมายถึงปริมาณคลอไรด์ โบรไมด์ และไอโอดีน ที่ละลายอยู่ในน้ำที่มีน้ำหนักหนึ่งกิโลกรัม โดยจะนิยมใช้หน่วยเป็นกรัมต่อกิโลกรัมของน้ำ หรือหนึ่งในพันส่วน (ppt) ซึ่งหาได้จากสมการ

$$\text{Salinity (ppt)} = 0.03 + 1.805 \text{ Chlorinity (ppt)} \quad (\text{ข.1})$$

ความเค็มของน้ำจะมีค่าแตกต่างกันไปตามสถานที่และประเภทของดิน ในด้านการประมงนั้นได้มีการแบ่งประเภทของน้ำตามระดับความเค็มเป็นสามประเภทได้แก่ น้ำจืด (Fresh Water) มีค่าความเค็มอยู่ระหว่าง 0 - 0.5 ppt น้ำกร่อย (Blackish Water) มีค่าความเค็มอยู่ระหว่าง 0.5 - 30.0 ppt และน้ำเค็ม (Sea Water) มีค่าความเค็มมากกว่า 30.0 ppt

ภาคผนวก ค

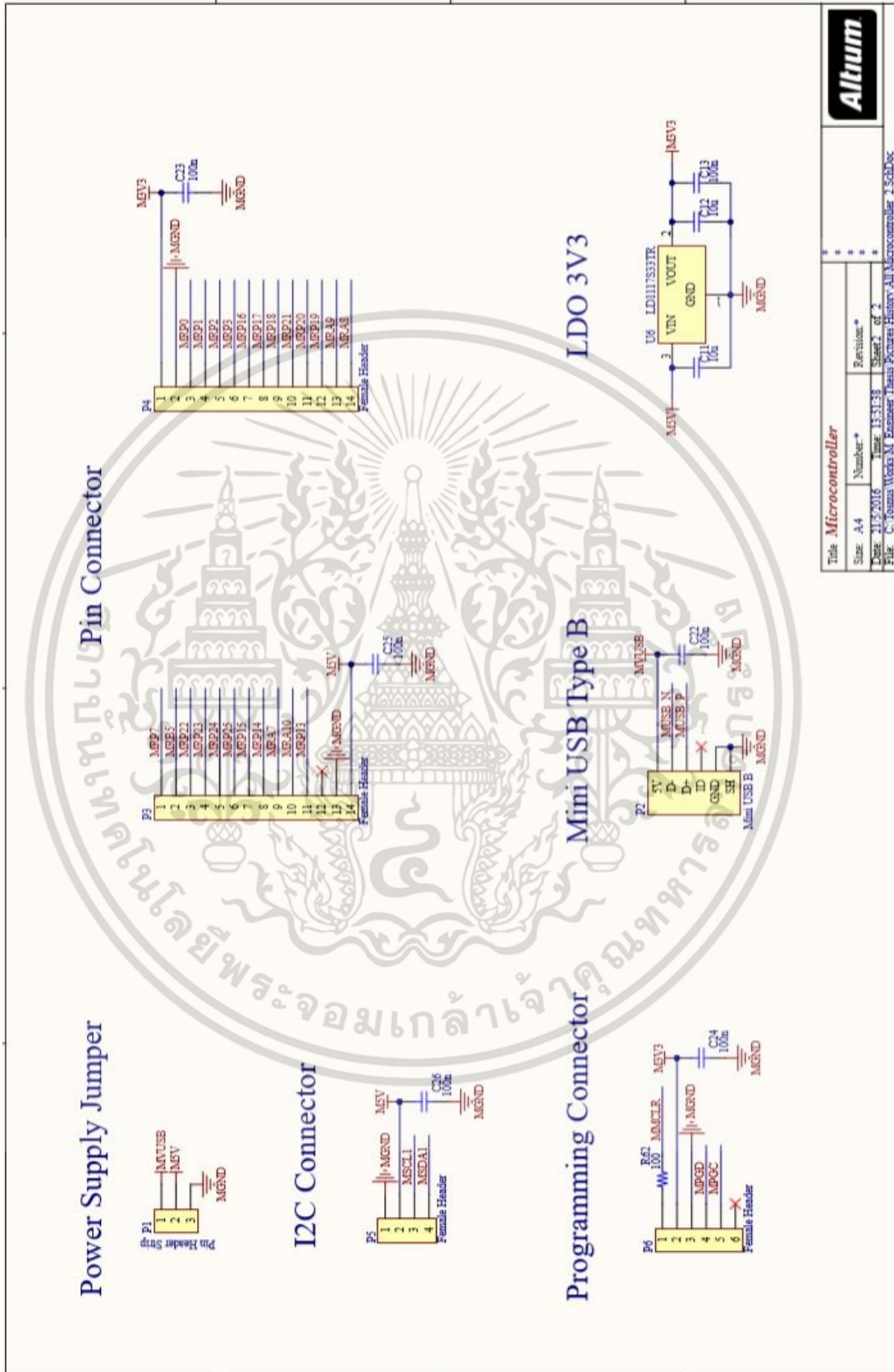
คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเพชร

พิจารณาคูณสมบัติทางไฟฟ้าของเพชรในทางอิเล็กทรอนิกส์สารกึ่งตัวนำ พบว่าเพชรผลึกรูปเดี่ยวที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการ CVD มีช่องว่างแถบพลังงาน 5.47 eV

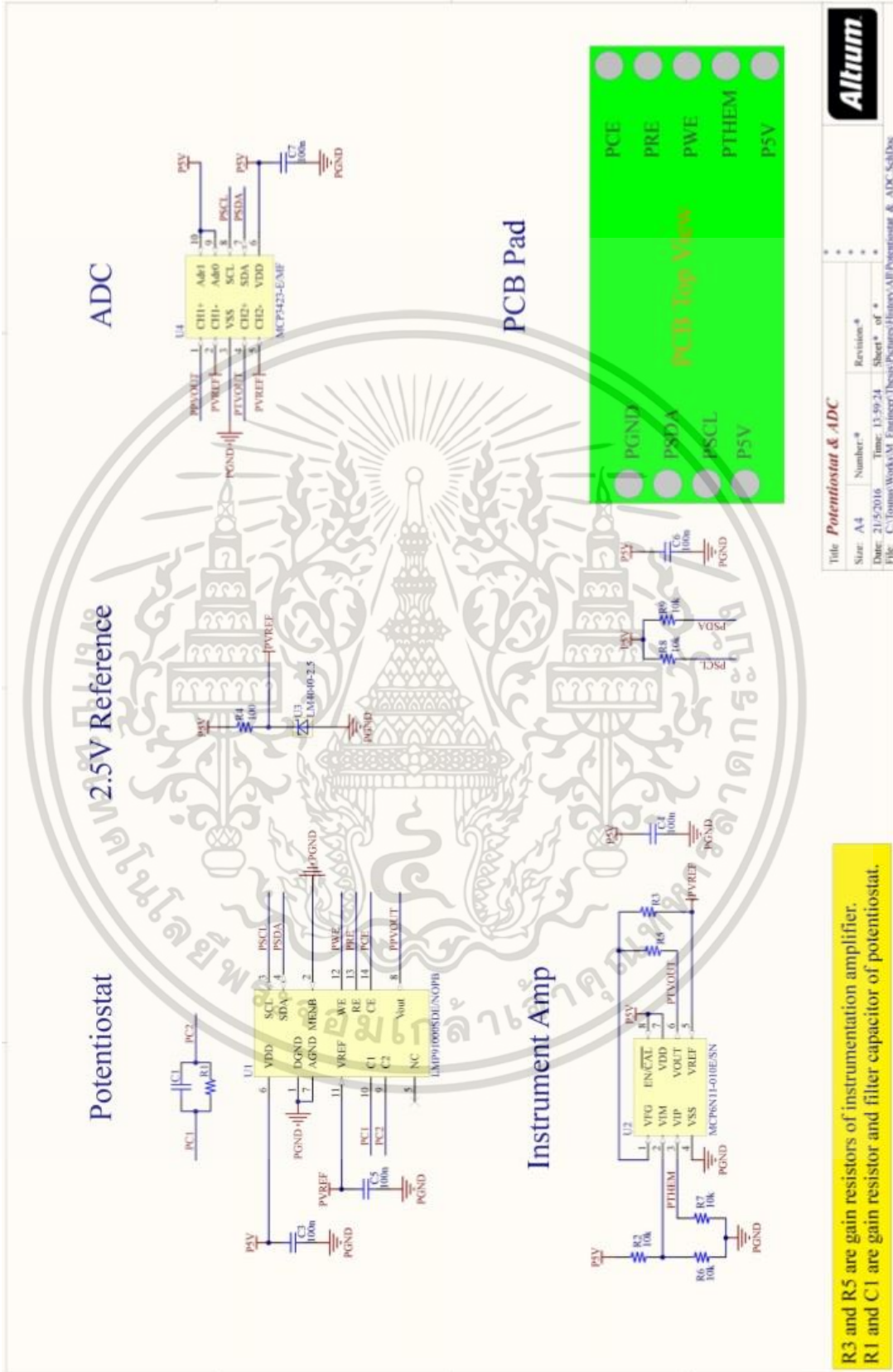
ตารางที่ ค.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ

Property	Natural Diamond	CVD Diamond	Si	4H-SiC	GaN
Bandgap (eV)	5.47	5.47	1.1	3.2	3.44
Breakdown Field (MV/cm)	10	10	0.3	3	5
Electron Saturation Velocity ($\times 10^7$ cm/s)	2	2	0.86	3	2.5
Hole Saturation Velocity ($\times 10^7$ cm/s)	0.8	0.8	n/a	n/a	n/a
Electron Mobility (cm^2/Vs)	2000	4500	1450	900	440
Hole Mobility (cm^2/Vs)	1800	3800	480	120	200
Thermal Conductivity (W/cmK)	22	24	1.5	5	1.3

มีสภาพคล่องของอิเล็กตรอนและโฮลอยู่ที่ $4500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ และ $3800 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ตามลำดับ มีค่าความเร็วอิ่มตัวของอิเล็กตรอนเท่ากับ $1.5 - 2.7 \times 10^7 \text{ cm/s}$ และโฮลเท่ากับ $0.85 - 1.2 \times 10^7 \text{ cm/s}$ มีค่าไดอิเล็กทริกเบรคดาวน์อยู่ในช่วง $5 - 10 \text{ MV/cm}$ มีค่าการนำความร้อนอยู่ที่ 2200 W/mK ที่อุณหภูมิห้อง เปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้ากับวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ ดังตารางที่ ค.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

ตัวอย่าง Datasheet ของอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย


28/44-Pin, General Purpose, 16-Bit Flash Microcontrollers with Cryptographic Engine, ISO 7816, USB On-The-Go and XLP Technology
Cryptographic Engine

- AES Engine with 128, 192 or 256-Bit Key
- Supports ECB, CBC, OFB, CTR and CFB128 modes
- DES/Triple DES (TDES) Engine: Supports 2-Key and 3-Key EDE or DED-TDES
- Supports up to Three Unique Keys for TDES
- Programmatically Secure
- True Random Number Generator
- Pseudorandom Number Generator
- Non-Readable, On-Chip, OTP Key Storages

Universal Serial Bus Features

- USB v2.0 On-The-Go (OTG) Compliant
- Dual Role Capable; can Act as Either Host or Peripheral
- Low-Speed (1.5 Mb/s) and Full-Speed (12 Mb/s) USB Operation in Host mode
- Full-Speed USB Operation in Device mode
- High-Precision PLL for USB
- USB Device mode Operation from FRC Oscillator:
 - No crystal oscillator required
- Supports up to 32 Endpoints (16 bidirectional):
 - USB module can use any RAM locations on the device as USB endpoint buffers
- On-Chip USB Transceiver
- Supports Control, Interrupt, Isochronous and Bulk Transfers
- On-Chip Pull-up and Pull-Down Resistors

Extreme Low-Power Features

- Multiple Power Management Options for Extreme Power Reduction:
 - VBAT allows the device to transition to a backup battery for the lowest power consumption with RTCC
 - Deep Sleep allows near total power-down, with the ability to wake-up on internal or external triggers
 - Sleep and Idle modes selectively shut down peripherals and/or core for substantial power reduction and fast wake-up
 - Doze mode allows CPU to run at a lower clock speed than peripherals
- Alternate Clock modes allow On-the-Fly Switching to a Lower Clock Speed for Selective Power Reduction
- Extreme Low-Power Current Consumption for Deep Sleep:
 - WDT: 270 nA @ 3.3V typical
 - RTCC: 400 nA @ 32 kHz, 3.3V typical
 - Deep Sleep current: 40 nA, 3.3V typical

Device	Memory		Pins	Analog Peripherals			Digital Peripherals							USB OTG	Deep Sleep w/VBAT	AES/DES Cryptographic
	Program Flash (bytes)	Data RAM (bytes)		10/12-BIT A/D (ch)	Comparators	CTMU (ch)	Input Capture	Output Compare/PWM	I ² C™	SPI	UART w/IRDA® 7816	EPMP/SP	16-Bit Timers			
PIC24FJ128GB204	128K	8K	44	12	3	12	6	6	2	3	4	Y	5	Y	Y	Y
PIC24FJ128GB202	128K	8K	28	9	3	9	6	6	2	3	4	N	5	Y	Y	Y
PIC24FJ64GB204	64K	8K	44	12	3	12	6	6	2	3	4	Y	5	Y	Y	Y
PIC24FJ64GB202	64K	8K	28	9	3	9	6	6	2	3	4	N	5	Y	Y	Y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Quartz Crystal Units



NX8045GB

For OA / AV

■ Features

A small surface-mount type crystal unit, ideal for OA (office automation) and AV (audiovisual) applications.

Compatible with frequencies starting from 4 MHz. (8.0 x 4.5 x 1.8 mm typ.)

- Excellent electrical performance, ideal for OA and AV applications.
- Excellent environmental performance, including heat and shock resistance.
- Meets the requirements for re-flow profiling using lead-free solder.



RoHS Compliant
Directive 2002/95/EC

■ Specifications

Item	Model	NX8045GB
Nominal frequency		4 to 48 MHz
Overtone order		Fundamental
Frequency tolerance (25 ±3 °C)		±20 × 10 ⁻⁶
Frequency versus temperature characteristics (with tolerance to ±25 °C)		±30 × 10 ⁻⁶
Operating temperature range		-10 to +70 °C
Storage temperature range		-40 to +85 °C
Equivalent series resistance ^{*)}		Refer to *1
Level of drive		50 µW (Max. 500 µW)
Load capacitance		8 pF

The above specifications are standard for this NDK product.
Custom-made specifications such as load capacitance and temperature characteristics are also available.
Please contact NDK sales with your enquiries.

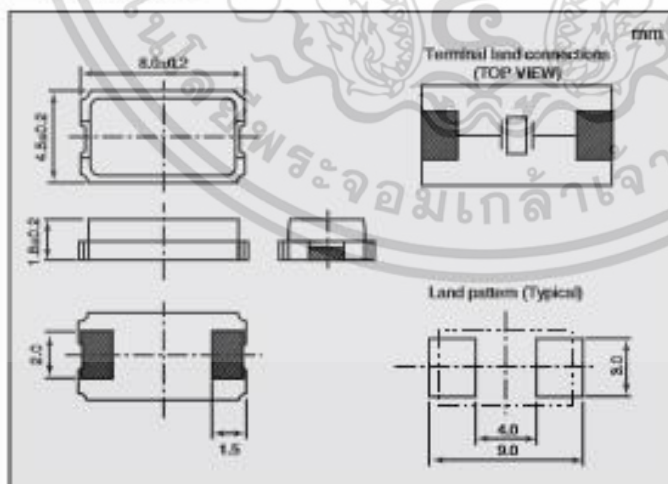
■ How to Specify an Order

When ordering our products, specify them with an "Ordering Code" that consists of the following :

Model name - Frequency (Max : 9 digits) M - Number for specifying an order Example NX8045GB-13.560M-STD-CSF-4

If you have any queries concerning our standard frequencies and numbers for specifying orders, please contact our sales representatives or visit our homepage (<http://www.ndk.com>).

■ Dimensions



*1 Equivalent Series Resistance

Nominal frequency (MHz)	Equivalent Series Resistance max. [Ω]
4 to 5	300
5 to 8	250
8 to 9.5	200
9.5 to 10	120
10 to 12	100
12 to 13	80
13 to 48	50

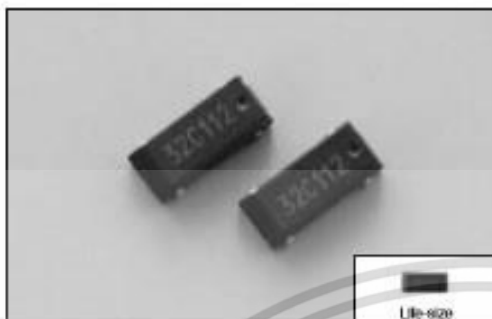
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TUNING FORK CRYSTAL UNITS (SMD - Plastic Package)

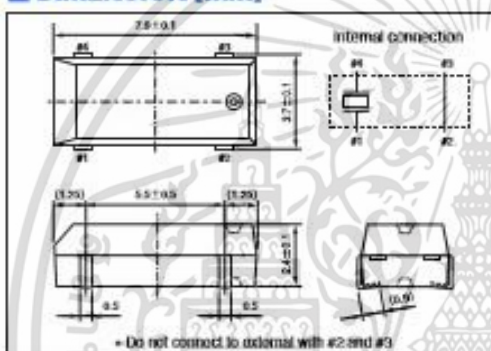
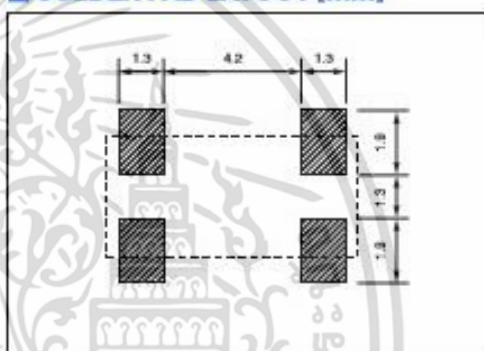
RoHS compliant

CM200C · CM250C

3000pcs/reel


FEATURES

- Molding a heat resistant cylinder with resin.
- Most appropriate for clock source for portable equipment with low power consumption.

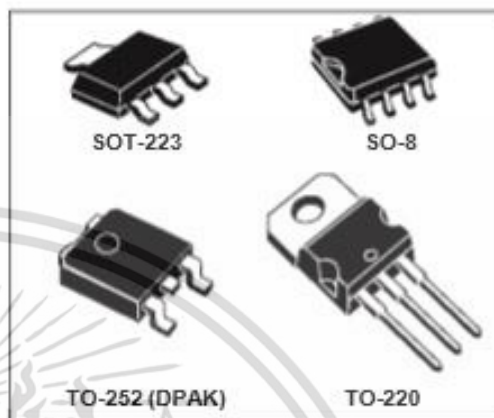
DIMENSION [mm]

SOLDER PAD LAYOUT [mm]

STANDARD SPECIFICATIONS

Item	Model	CM200C	CM250C	Conditions
Nominal Frequency	f_0	32.768kHz	30kHz ~ 100kHz	Need to contact us for the available frequency in CM250C
Frequency Tolerance	$\Delta f/f_0$	$\pm 20\text{ppm}$	$\pm 30\text{ppm}$	at 25°C
Load capacitance	C_L	12.5pF		Need to specify your requirement
Operating Temperature Range	T_{OSR}	-40°C ~ +85°C		
Storage Temperature Range	T_{STR}	-55°C ~ +125°C		
Turnover Temperature	T_{TU}	25°C \pm 5°C		
Temperature Coefficient	β	-0.034 \pm 0.006ppm/°C ²		
Motional (series) resistance	R_f	50K Ω Max.		at 25°C
Level of drive	D_f	1 μ W Max.		
Aging (first year)	$\Delta f/f_0$	$\pm 3\text{ppm}$ Max.	$\pm 5\text{ppm}$ Max.	25°C \pm 3°C
Shunt capacitance	C_0	1.35pF Typ.	0.8pF ~ 1.7pF Typ.	Depend on frequency

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**LOW DROP FIXED AND ADJUSTABLE
POSITIVE VOLTAGE REGULATORS**

- LOW DROPOUT VOLTAGE (1V TYP)
- 2.85V DEVICE PERFORMANCES ARE SUITABLE FOR SCSI-2 ACTIVE TERMINATION
- OUTPUT CURRENT UP TO 800mA
- FIXED OUTPUT VOLTAGE OF: 2.5V, 2.85V, 3.0V, 3.3V, 5.0V
- ADJUSTABLE VERSION AVAILABILITY ($V_{ref}=1.25V$)
- INTERNAL CURRENT AND THERMAL LIMIT
- AVAILABLE IN $\pm 1\%$ (AT 25°C) AND 2% IN ALL TEMPERATURE RANGE
- SUPPLY VOLTAGE REJECTION: 75 dB (TYP)
- TEMPERATURE RANGE: 0°C TO 125°C

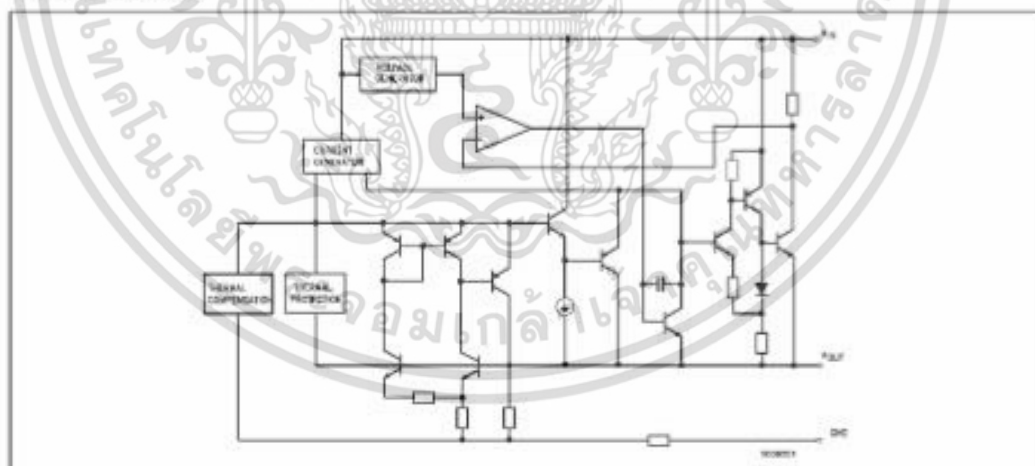


DESCRIPTION

The LD1117 is a LOW DROP Voltage Regulator able to provide up to 800mA of Output Current, available even in adjustable version ($V_{ref}=1.25V$). Concerning fixed versions, are offered the following Output Voltages: 2.5V, 2.85V, 3.0V 3.3V and 5.0V. The 2.85V type is ideal for SCSI-2 lines active termination. The device is supplied in: SOT-223, DPAK, SO-8 and TO-220. The SOT-223 and DPAK surface mount packages optimize the thermal characteristics even offering a relevant space saving effect. High efficiency is assured by NPN

pass transistor. In fact in this case, unlike than PNP one, the Quiescent Current flows mostly into the load. Only a very common 10µF minimum capacitor is needed for stability. On chip trimming allows the regulator to reach a very tight output voltage tolerance, within $\pm 1\%$ at 25 °C. The ADJUSTABLE LD1117 is pin to pin compatible with the other standard Adjustable voltage regulators maintaining the better performances in terms of Drop and Tolerance.

BLOCK DIAGRAM



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LM4040-N/-Q1 Precision Micropower Shunt Voltage Reference

1 Features

- SOT-23 AEC Q-100 Grades 1 and 3 available
- Small Packages: SOT-23, TO-92, and SC70
- No Output Capacitor Required
- Tolerates Capacitive Loads
- Fixed Reverse Breakdown Voltages of 2.048 V, 2.5 V, 3 V, 4.096 V, 5 V, 8.192 V, and 10 V
- Key Specifications (2.5-V LM4040-N)
 - Output Voltage Tolerance (A Grade, 25°C): $\pm 0.1\%$ (Maximum)
 - Low Output Noise (10 Hz to 10 kHz): $35 \mu\text{V}_{\text{rms}}$ (Typical)
 - Wide Operating Current Range: 60 μA to 15 mA
 - Industrial Temperature Range: -40°C to 85°C
 - Extended Temperature Range: -40°C to 125°C
 - Low Temperature Coefficient: 100 ppm/ $^\circ\text{C}$ (Maximum)

2 Applications

- Portable, Battery-Powered Equipment
- Data Acquisition Systems
- Instrumentation
- Process Controls
- Energy Management
- Product Testing
- Automotives
- Precision Audio Components

3 Description

Ideal for space-critical applications, the LM4040-N precision voltage reference is available in the sub-miniature SC70 and SOT-23 surface-mount package. The advanced design of the LM4040-N eliminates the need for an external stabilizing capacitor while ensuring stability with any capacitive load, thus making the LM4040-N easy to use. Further reducing design effort is the availability of several fixed reverse breakdown voltages: 2.048 V, 2.5 V, 3 V, 4.096 V, 5 V, 8.192 V, and 10 V. The minimum operating current increases from 60 μA for the 2.5-V LM4040-N to 100 μA for the 10-V LM4040-N. All versions have a maximum operating current of 15 mA.

The LM4040-N uses a fuse and Zener-zap reverse breakdown voltage trim during wafer sort to ensure that the prime parts have an accuracy of better than $\pm 0.1\%$ (A grade) at 25°C. Bandgap reference temperature drift curvature correction and low dynamic impedance ensure stable reverse breakdown voltage accuracy over a wide range of operating temperatures and currents.

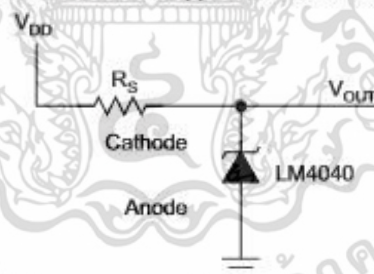
Also available is the LM4041-N with two reverse breakdown voltage versions: adjustable and 1.2 V. See the LM4041-N data sheet (SNOS641).

Device Information⁽¹⁾

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
LM4040-N	TO-92 (3)	4.30 mm × 4.30 mm
	SC70 (5)	2.00 mm × 1.25 mm
	SOT-23 (3)	2.92 mm × 1.30 mm
LM4040-N-Q1	SOT-23 (3)	2.92 mm × 1.30 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the data sheet.

Shunt Reference Application Schematic



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



MCP6N11

500 kHz, 800 μ A Instrumentation Amplifier

Features

- Rail-to-Rail Input and Output
- Gain Set by 2 External Resistors
- Minimum Gain (G_{MIN}) Options:
1, 2, 5, 10 or 100 V/V
- Common Mode Rejection Ratio (CMRR): 115 dB (typical, $G_{MIN} = 100$)
- Power Supply Rejection Ratio (PSRR): 112 dB (typical, $G_{MIN} = 100$)
- Bandwidth: 500 kHz (typical, Gain = G_{MIN})
- Supply Current: 800 μ A/channel (typical)
- Single Channel
- Enable/ V_{OS} Calibration pin: (EN/CAL)
- Power Supply: 1.8V to 5.5V
- Extended Temperature Range: -40°C to $+125^{\circ}\text{C}$

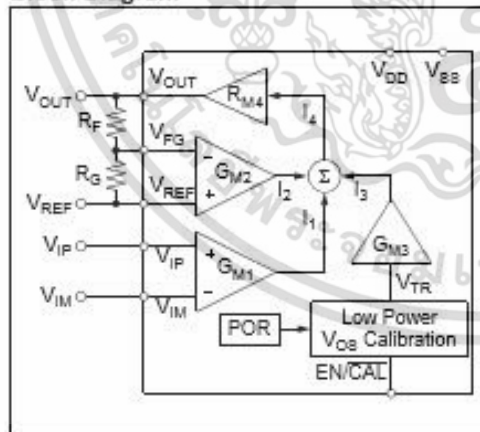
Typical Applications

- High Side Current Sensor
- Wheatstone Bridge Sensors
- Difference Amplifier with Level Shifting
- Power Control Loops

Design Aids

- Microchip Advanced Part Selector (MAPS)
- Demonstration Board
- Application Notes

Block Diagram



Description

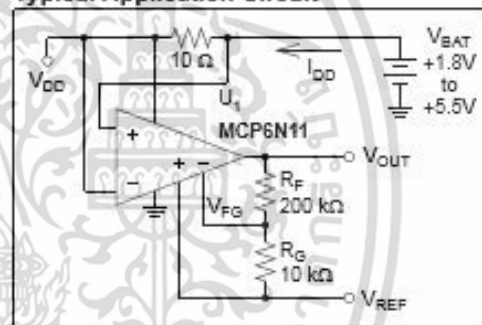
Microchip Technology Inc. offers the single MCP6N11 instrumentation amplifier (INA) with Enable/ V_{OS} Calibration pin (EN/CAL) and several minimum gain options. It is optimized for single-supply operation with rail-to-rail input (no common mode crossover distortion) and output performance.

Two external resistors set the gain, minimizing gain error and drift-over temperature. The reference voltage (V_{REF}) shifts the output voltage (V_{OUT}).

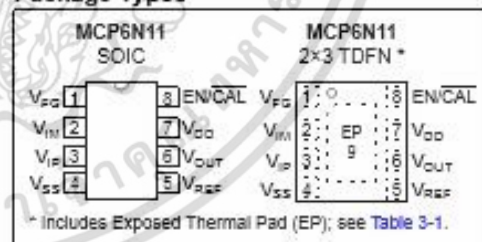
The supply voltage range (1.8V to 5.5V) is low enough to support many portable applications. All devices are fully specified from -40°C to $+125^{\circ}\text{C}$.

These parts have five minimum gain options (1, 2, 5, 10 and 100 V/V). This allows the user to optimize the input offset voltage and input noise for different applications.

Typical Application Circuit



Package Types



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



MCP3422/3/4

18-Bit, Multi-Channel $\Delta\Sigma$ Analog-to-Digital Converter with I^2C^{TM} Interface and On-Board Reference

Features

- 18-bit $\Delta\Sigma$ ADC with Differential Inputs:
 - 2 channels: MCP3422 and MCP3423
 - 4 channels: MCP3424
- Differential Input Full-Scale Range: $-V_{\text{REF}}$ to $+V_{\text{REF}}$
- Self Calibration of Internal Offset and Gain per Each Conversion
- On-Board Voltage Reference (V_{REF}):
 - Accuracy: $2.048\text{V} \pm 0.05\%$
 - Drift: $15 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$
- On-Board Programmable Gain Amplifier (PGA):
 - Gains of 1, 2, 4 or 8
- INL: 10 ppm of Full-Scale Range
- Programmable Data Rate Options:
 - 3.75 SPS (18 bits)
 - 15 SPS (16 bits)
 - 60 SPS (14 bits)
 - 240 SPS (12 bits)
- One-Shot or Continuous Conversion Options
- Low Current Consumption:
 - $135 \mu\text{A}$ typical ($V_{\text{DD}} = 3\text{V}$, Continuous Conversion)
 - $36 \mu\text{A}$ typical ($V_{\text{DD}} = 3\text{V}$, One-Shot Conversion with 1 SPS)
- On-Board Oscillator
- I^2C^{TM} Interface:
 - Standard, Fast and High Speed Modes
 - User configurable two external address pins for MCP3423 and MCP3424
- Single Supply Operation: 2.7V to 5.5V
- Extended Temperature Range: -40°C to $+125^{\circ}\text{C}$

Typical Applications

- Portable Instrumentation and Consumer Goods
- Temperature Sensing with RTD, Thermistor, and Thermocouple
- Bridge Sensing for Pressure, Strain, and Force
- Weigh Scales
- Battery Fuel Gauges
- Factory Automation Equipment

Description

The MCP3422, MCP3423 and MCP3424 devices (MCP3422/3/4) are the low noise and high accuracy 18-Bit delta-sigma analog-to-digital ($\Delta\Sigma$ A/D) converter family members of the MCP342X series from Microchip Technology Inc. These devices can convert analog inputs to digital codes with up to 18 bits of resolution.

The on-board 2.048V reference voltage enables an input range of $\pm 2.048\text{V}$ differentially (full-scale range = $4.096\text{V}/\text{PGA}$).

These devices can output analog-to-digital conversion results at rates of 3.75, 15, 60, or 240 samples per second depending on the user controllable configuration bit settings using the two-wire I^2C serial interface. During each conversion, the device calibrates offset and gain errors automatically. This provides accurate conversion results from conversion to conversion over variations in temperature and power supply fluctuation.

The user can select the PGA gain of $\times 1$, $\times 2$, $\times 4$, or $\times 8$ before the analog-to-digital conversion takes place. This allows the MCP3422/3/4 devices to convert a very weak input signal with high resolution.

The MCP3422/3/4 devices have two conversion modes: (a) One-Shot Conversion mode and (b) Continuous Conversion mode. In One-Shot conversion mode, the device performs a single conversion and enters a low current standby mode automatically until it receives another conversion command. This reduces current consumption greatly during idle periods. In Continuous conversion mode, the conversion takes place continuously at the set conversion speed. The device updates its output buffer with the most recent conversion data.

The devices operate from a single 2.7V to 5.5V power supply and have a two-wire I^2C compatible serial interface for a standard (100 kHz), fast (400 kHz), or high-speed (3.4 MHz) mode.

The I^2C address bits for the MCP3423 and MCP3424 are selected by using two external I^2C address selection pins (Adr0 and Adr1). The user can configure the device to one of eight available addresses by connecting these two address selection pins to V_{DD} , V_{SS} or float. The I^2C address bits of the MCP3422 are programmed at the factory during production.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

1. S. Cheirsirikul, T. Mongkolkiartichai, "Diamond Microelectrodes for Amperometric Oxygen Sensor", *Advanced Materials Research*, 911, 2014, 276-280.
2. ทศน์ศวี มงคลเกียรติชัย และ สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล, “เซ็นเซอร์วัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายแบบแอมเปอร์เมตริก”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8 (EENET 2016), 2559, 225 - 228.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายทศน์ศรั มงคลเกียรติชัย
 วัน เดือน ปีเกิด 19 กันยายน 2531
 สถานที่เกิด จังหวัดน่าน
 ที่อยู่ บ้านเลขที่ 176 หมู่ที่ 3 ตำบลผาสิงห์ อำเภอเมือง จังหวัดน่าน 55000
 ประวัติการศึกษา 2554 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผลงานวิจัยที่ได้รับการยอมรับ

1. S. Cheirsirikul, T. Mongkolkiartichai, "Diamond Microelectrodes for Amperometric Oxygen Sensor", Advanced Materials Research, 911, 2014, 276-280.
2. ทศน์ศรั มงคลเกียรติชัย และ สมศักดิ์ เขียวศิริกุล, "เซ็นเซอร์วัดความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายแบบแอมแปโรเมตริก", การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8 (EENET 2016), 2559, 225 - 228.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้