

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เซนเซอร์ตรวจจับรังสีเอ็กซ์เรย์ชนิดฟิล์มเพชร
DIAMOND X-RAY SENSOR

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล

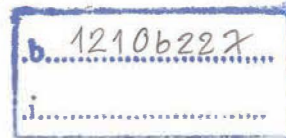
จัดทำโดย

นาย กิตติพล ศรีพลี เลขประจำตัว 49015227
นาย จักรพล ธรรมรียา เลขประจำตัว 49015228
นาย พงศ์พัฒน์ เกตุเอม เลขประจำตัว 49015239

รฟ.
๗๖๗๔
๒๕๕๑



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 103973
วัน,เดือน,ปี 28 ต.ค. 2552



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาอิเล็กทรอนิกส์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อเรื่อง

เซนเซอร์ตรวจจับรังสีเอ็กซ์เรย์ชนิดฟิล์มเพชร

DIAMOND X-RAY SENSOR

จัดทำโดย นาย กิตติพล ศรีพลี เลขประจำตัว 49015227
นาย จักรพล ธรรมรียา เลขประจำตัว 49015228
นาย พงศ์พัฒน์ เกตุเอม เลขประจำตัว 49015239

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ ปีการศึกษา 2551



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซนเซอร์ตรวจจับรังสีเอ็กซ์เรย์ชนิดฟิล์มเพชร

นายกิตติพล ศรีพลี รหัส 49015227

นายจักรพล ธรรมรียา รหัส 49015228

นายพงศ์พัฒน์ เกตุเฒ่า รหัส 49015239

รศ.สมศักดิ์ เข็ชรศิริกุล อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2551

บทคัดย่อ

รายงานฉบับนี้ได้ทำการศึกษาระบบการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับรังสีเอ็กซ์เรย์ชนิดฟิล์มเพชร เพื่อประยุกต์และนำไปใช้งานเป็นอุปกรณ์เซนเซอร์ในการตรวจจับรังสีเอ็กซ์เรย์ซึ่งฟิล์มเพชรในโครงการนี้ได้จากการสังเคราะห์ในกระบวนการ CVD แบบลดความร้อนที่ความดัน 50 ทอร์ ควบคุมเงื่อนไขให้ได้ฟิล์มเพชรหนา 10 μm บนฐานรองซิลิคอน มีการควบคุมพื้นที่ฟิล์มเพชร โดยเทคนิคใช้ชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์เป็นหน้าปกป้องกันการเกิดฟิล์มเพชร สำหรับการวัดและทดสอบตรวจสอบลักษณะพื้นผิวรูปร่างวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้ากระแสและคุณสมบัติการวัดความเข้มของรังสีเอ็กซ์เรย์โดยนำมาทดลองร่วมกับวงจรอ่านค่าความเข้มรังสีเอ็กซ์เรย์ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงผลทางจอ LCD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DIAMOND X-RAY SENSOR

Mr.Kittipol Sripree ID.49015227

Mr.Jakapol Thammariya ID.49015228

Mr.Pongpat Ketem ID.49015239

Associate Prof. Somsak Cheersirikul

Education Year 2008

Abstract

This report shows the study of the construction process of X-ray detector with diamond film. This will apply to be the X-ray sensor. The diamond film used in this project is from the synthesis in CVD process with heating coil at the pressure at 50 torr. The film is controlled to 10 um thick on silicon base. Silicon dioxide is used to control the area of diamond film as a shield to protect the diamond film. For the test and measurement, the surface, shape and electric current property and X-ray density measuring property are tested with density reading circuit with microcontroller. The data will be shown on LCD.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

รายงานฉบับนี้ได้จัดทำขึ้นจนประสบความสำเร็จได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจากทุกฝ่าย โดยขอกราบขอบพระคุณ รศ.สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ช่วยกรุณาให้คำปรึกษาแนวทางในการทำการวิจัย การแก้ปัญหา การคิดริเริ่มตลอดจนชี้แนะ ทำให้รายงานฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามเป้าหมาย

ขอกราบขอบคุณรุ่นพี่ปริญญาโทที่ช่วยให้คำปรึกษาทั้งทางด้านทฤษฎีและปฏิบัติ ร่วมกับอาจารย์ที่ปรึกษา ในการทำโครงการนี้

ขอกราบขอบพระคุณศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้ความอำนวยความสะดวกในการใช้สถานที่และเครื่องมือต่างๆในการทำโครงการ

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาและพี่น้อง ที่ให้กำลังใจและสนับสนุนการศึกษามาโดยตลอด



ผู้จัดทำ

นาย กิตติพล ศรีพลี

นาย จักรพล ธรรมรียา

นาย พงศ์พัฒน์ เกตุเอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตโครงการ	2
1.4 ภาคหลักของโครงการ	2
บทที่ 2 ทฤษฎี	3
2.1 फिल्मเพชร	3
2.2 รอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ	7
2.3 พฤติกรรมทางแสงของสารกึ่งตัวนำ	16
2.4 อุปกรณ์ขอตักกีโฟโตไดโอด	19
2.5 ทฤษฎีไมโครคอนโทรลเลอร์	23
บทที่ 3 การออกแบบและการสร้าง	28
3.1 การออกแบบขอตักกีโฟโตไดโอดฟิล์มเพชร	28
3.2 การออกแบบไดอะแฟรม	31
3.3 ขั้นตอนกระบวนการสร้าง	34
3.4 การออกแบบและการสร้างวงจร	44
บทที่ 4 ผลการทดลอง	51
4.1 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชร	51
4.2 การประยุกต์ใช้งาน	56
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	63
เอกสารอ้างอิง	64
ภาคผนวก ก	65
ภาคผนวก ข	66
ภาคผนวก ค	67
ภาคผนวก ง	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1	แบบจำลองโครงสร้างผลึกเพชร	3
รูปที่ 2.2	ระนาบต่างๆ ของเพชร	4
รูปที่ 2.3	ภาพไดอะแกรมระบบ CVD แบบลดความร้อน	6
รูปที่ 2.4	แสดงภาพจำลองการก่อตัวของฟิล์มเพชรที่มีลักษณะเป็นแบบ โพลีคริสตัลไลน์	7
รูปที่ 2.5	โครงสร้างแถบพลังงานของ โลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น(N)	8
รูปที่ 2.6	โครงสร้างแถบพลังงานของ โลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P)	8
รูปที่ 2.7	โครงสร้างและแถบพลังงานของรอยต่อระหว่าง โลหะกับสารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับไบอัสแรงดันไปข้างหน้า (สารกึ่งตัวนำชนิดพีให้ศักย์บวกและ โลหะให้ศักย์ลบ)	10
รูปที่ 2.8	โครงสร้างและแถบพลังงานของรอยต่อระหว่าง โลหะกับสารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับไบอัสแรงดันไปข้างหน้า (สารกึ่งตัวนำชนิดพีให้ศักย์ลบและ โลหะให้ศักย์บวก)	11
รูปที่ 2.9	โครงสร้างแถบพลังงานของฟิล์มเพชรและ โลหะอลูมิเนียมทั้งก่อนและหลังนำมาสัมผัสกัน	15-16
รูปที่ 2.10	การลดลงของ โฟตอนฟลักซ์ที่ผ่านเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ	17
รูปที่ 2.11	แสดงการดูดกลืนแสงขากระดับพลังงานต่างๆในช่องว่างแถบพลังงาน	18
รูปที่ 2.12	แสดงโครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ โฟโตไดโอด	20
รูปที่ 2.13	กลไกการดูดกลืนแสงแบบต่างๆในรอยต่อเซมิคอนดักเตอร์ โฟโตไดโอด(ไบอัสย้อนกลับ)	22
รูปที่ 2.15	โครงภายในของไมโครคอนโทรลเลอร์	23
รูปที่ 2.16	ตำแหน่งขาของ PIC 16F867A	27
รูปที่ 3.5	มาร์คไดอะแฟรม	29
รูปที่ 3.2	มาร์คขั้วโลหะ	30
รูปที่ 3.3	ภาพจำลองโครงสร้างอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ โฟโตไดโอดฟิล์มเพชร	31
รูปที่ 3.4	ภาพตัดขวางแสดงลักษณะการกัดแบบแอนไอโซโทรปิก	32
รูปที่ 3.6	ภาพถ่ายเครื่องสังเคราะห์ฟิล์มเพชร	33
รูปที่ 3.7	แผ่นซิลิคอนเริ่มต้น	34
รูปที่ 3.8	แสดงการสร้างชั้นออกไซด์	34
รูปที่ 3.9	แสดงการลอกชั้นออกไซด์ด้านหน้าออก	35
รูปที่ 3.10	แสดงการสร้างชั้นไนไตรด์	35
รูปที่ 3.11	แสดงการสร้างชั้นไนไตรด์และปิดมาร์คด้านบน	36
รูปที่ 3.12	แสดงการสร้างชั้นไนไตรด์และปิดมาร์คด้านล่าง	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ 3.13	แสดงการสร้างชั้นออกไซด์เพิ่ม	37
รูปที่ 3.14	แสดงการทำความสะอาดเอาชั้นไนโตรไดออกไซด์ออก	38
รูปที่ 3.15	แสดงการสร้างฟิล์มเพชร	38
รูปที่ 3.16	แสดงการกัดออกไซด์ด้านล่างออก	39
รูปที่ 3.17	แสดงการกัดซิลิคอนออกเหลือแต่ไดอะแฟรมฟิล์มเพชร	39
รูปที่ 3.18	แสดงเทคนิคลิโทกราฟี	40
รูปที่ 3.19	แสดงการการลอกชั้นน้ำยาไวแสง	41
รูปที่ 3.20	แสดงภาพจำลองขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์ขอตักโฟโตไดโอดฟิล์มเพชร	42
รูปที่ 3.1	บล็อกการทำงานของวงจร	43
รูปที่ 3.2	วงจรมายของภาคดีเทคเตอร์	43
รูปที่ 3.3	แสดงการต่อวงจร ADC ภายนอกกับไมโครคอนโทรลเลอร์	44
รูปที่ 3.4	Timing Diagram ของวงจรมายแปลงสัญญาณ อะนาลอกเป็นดิจิตอล (Analog to Digital)	45
รูปที่ 3.5	วงจรมายประมวลผล	46
รูปที่ 3.6	วงจรมายจ่ายไฟ	47
รูปที่ 3.7	แสดงตำแหน่งขาของ LCD	48
รูปที่ 3.8	วงจรมายประมวลผลและแสดงผลในการทดลอง	49
รูปที่ 3.9	วงจรมายประมวลผลและแสดงผลที่เสร็จสมบูรณ์	49
รูปที่ 3.10	วงจรมายประมวลผลและแสดงผลที่ประกอบกล่องเสร็จสมบูรณ์	50
รูปที่ 4.1	แสดงขีดด้วยครีမ်เพชร	51
รูปที่ 4.2	แสดงชั้นออกไซด์ที่กั้นระหว่างฟิล์มเพชร	52
รูปที่ 4.3	แสดงการสร้างออกไซด์ที่ไม่สมบูรณ์	52
รูปที่ 4.4	แสดงการสร้างฟิล์มเพชรที่ไม่สมบูรณ์	53
รูปที่ 4.5	แสดงฟิล์มเพชรด้านหน้าที่สมบูรณ์	53
รูปที่ 4.6	ภาพถ่ายไดอะแฟรมฟิล์มเพชรที่เกิดจากการกัดฐานรองซิลิคอนด้วยสารละลาย EPD	54
รูปที่ 4.7	อุปกรณ์ขอตักโฟโตไดโอดฟิล์มเพชรสร้างบนฟิล์มเพชรขนาด 2.3x2.3 cm ²	54
รูปที่ 4.8	ภาพถ่ายอุปกรณ์ขอตักโฟโตไดโอดฟิล์มเพชรที่สร้างได้	55
รูปที่ 4.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันขณะไม่มีแสงตกกระทบ	56
รูปที่ 4.10	กราฟแสดงการตอบสนองค่าแรงดันที่ความเข้มแสง 1 mW/Cm ² ของพื้นที่รับแสง	57
รูปที่ 4.11	กราฟแสดงการตอบสนองค่ากระแสที่ความเข้มแสง 1 mW/Cm ² ของพื้นที่รับแสง	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ 4.12 เครื่อง Mask Aliment	58
รูปที่ 4.13 เครื่อง UNI METER	58
รูปที่ 4.14 เครื่องวัดที่สร้างขึ้น	59
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ยแรงดันต่อความเข้มรังสี UV ระดับต่างๆ	60
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดันกับค่าความเข้มของรังสี UV	60
รูปที่ 4.17 แสดงการหาค่าสมการเชิงเส้น โดยประมาณจากกราฟแสดงการเปรียบเทียบ ค่าแรงดันกับค่าความเข้มของรังสี UV	61
รูปที่ 4.18 กราฟเปรียบเทียบค่าความเข้มของรังสี UV ที่ได้	62



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเพชรกับสารกึ่งตัวนำอื่นๆ	5
ตารางที่ 4.1 แสดงการวัดค่าแรงดันเทียบกับค่าความเข้ม UV	59
ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเข้มรังสี UV จากเครื่องวัดที่สร้างขึ้นกับเครื่อง UNI METER	61



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์

ความหมาย

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์

ความหมาย

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ผู้ที่ทำการค้นพบเอ็กซเรย์เป็นคนแรกคือ นักฟิสิกส์ชาวเยอรมันชื่อ วิลเฮล์ม คอนราด เรินท์เกน (Wilhelm Conrad Roentgen) การพบนี้เกิดขึ้นในตอนเย็นวันที่ 8 พฤศจิกายน พ.ศ. 2438 ภายในห้องทดลอง ณ มหาวิทยาลัยฮุมบรูด ประเทศเยอรมัน เรินท์เกนได้พบเอ็กซเรย์ในขณะที่กำลังทำการทดลองในเรื่อง “Absorption of Cathode rays” โดยใช้หลอดทดลองที่เรียกว่า Crookes’ tube เขาได้สังเกตเห็นว่า Cathode rays ที่ออกมาจากหลอดทดลองนั้นทำปฏิกิริยาให้กระดาษแข็งที่ฉาบด้วยธาตุ “แบเรียมพลาทิโนไซยาไนด์” (Barium platinocyanide) เกิดการเรืองแสงขึ้น โดยที่ระยะที่ไกลที่สุดที่ยังมีการเรืองแสงบนกระดาษแข็งคือ 120 เซนติเมตร ในขณะที่เดียวกันเขาสังเกตเห็นอีกว่าตัวอักษร A ที่ทำด้วยธาตุแบเรียมพลาทิโนไซยาไนด์ซึ่งวางอยู่นางออกไปเกือบสิบฟุตเกิดเรืองแสงขึ้นด้วยทั้งๆที่ไม่อยู่ในระยะของ Cathode rays เรินท์เกนจึงคิดว่าเขาค้นพบชนิดใหม่ขึ้นแล้วและให้ชื่อว่า X-ray และเขาได้ใช้เวลาอีกหลายสัปดาห์ต่อมาทำการทดลองและสังเกตถึงอำนาจในการทะลุทะลวงของเอ็กซเรย์ผ่านกระดาษ, โลหะและแม้กระทั่งผ่านเนื้อของมนุษย์และเขาได้ถ่ายภาพรังสีของมือของภรรยาเขาไว้โดยในบริเวณที่เป็นเนื้อหนังจะเห็นเป็นรอยสีเทาหรือสีดำ ส่วนบริเวณที่เป็นกระดูกนิ้วมือจะเห็นเป็นรอยสีขาว ดังรูปที่ 2.1 (b) จึงนับได้ว่าเป็นจุดเริ่มต้นของวิชารังสีวิทยาทางการแพทย์

เพื่อเป็นการป้องกันอันตรายที่อาจจะเกิดการรับปริมาณรังสีที่มากเกินไป ซึ่งเราทราบถึงผลอันตรายกันคืออยู่แล้ว ดังนั้นเครื่องวัดปริมาณรังสีก็ถือได้ว่าเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นมาก ซึ่งขณะนี้ประเทศได้มีการพัฒนาในการใช้เครื่องเอ็กซเรย์ทั้งการแพทย์และในงานด้านอุตสาหกรรมในปริมาณที่มากกว่าระดับหนึ่ง ซึ่งจะต้องใช้เครื่องวัดปริมาณรังสีเพื่อทำการตรวจสอบหรือปรับแต่งเครื่องกำเนิดรังสีอยู่เสมอ เพื่อให้เครื่องกำเนิดรังสีมีความถูกต้องในการใช้งานทุกครั้ง โดยตรวจสอบเครื่องกำเนิดรังสีกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์กระทรวงสาธารณสุขโดยใช้ IONIZATION CHAMBER ซึ่งได้ผลการตรวจสอบรังสีที่แม่นยำ แต่มีราคาต่อเครื่องที่แพง และมีจำนวนค่อนข้างน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนของเครื่องกำเนิดรังสีเอ็กซเรย์ ดังนั้นการตรวจสอบเครื่องกำเนิดรังสีเป็นสิ่งสำคัญ ฉะนั้นการวัดปริมาณรังสีโดยใช้ เซนเซอร์ตรวจจับรังสีเอ็กซเรย์แบบฟิล์มเพชร น่าจะมีประโยชน์และสามารถทำการตรวจสอบคุณภาพของรังสีเอ็กซเรย์ได้อย่างกว้างขวางและรวดเร็วยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการสร้าง เซนเซอร์ตรวจจับรังสีเอกซ์เรย์แบบฟิล์มเพชร
2. เพื่อนำ เซนเซอร์ตรวจจับรังสีเอกซ์เรย์แบบฟิล์มเพชร ไปประยุกต์ใช้งานในการวัดรังสีเอกซ์เรย์
3. เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์เข้ามาช่วยในการประมวลผล
4. เพื่อประดิษฐ์เครื่องวัดรังสีเอกซ์เรย์เพื่อใช้เป็นแบบที่สามารถนำมาปรับปรุงและพัฒนาได้ในอนาคต

1.3 ขอบเขตโครงการ

1. ศึกษาการสร้าง เซนเซอร์ตรวจจับรังสีเอกซ์เรย์แบบฟิล์มเพชรที่สามารถตรวจจับรังสีเอกซ์เรย์ได้
2. สามารถใช้ประยุกต์ใช้งานเป็นเครื่องตรวจจับรังสีเอกซ์เรย์ได้

1.4 ภาคลักษณ์ของโครงการ

ภาคตรวจจับรังสีเอกซ์เรย์

ภาคตรวจจับรังสีเอกซ์เรย์จะนำเอาฟิล์มเพชรซึ่งเป็นเป็นรูปแบบหนึ่งของคาร์บอนซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำอยู่ในหมู่ 4 ของตารางธาตุเช่นเดียวกับซิลิคอน ซึ่งฟิล์มเพชรมีคุณสมบัติที่สามารถนำมาสร้างเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำได้เช่นเดียวกับซิลิคอนเช่นกัน นอกจากนี้ฟิล์มเพชรยังมีคุณสมบัติบางด้านที่พิเศษกว่าซิลิคอน เช่นมีความคล่องตัวของประจุพาหะสูง มีความทนทานต่อการกัดของสารเคมี มีความนำความร้อนสูง มีความกว้างช่องว่างแถบพลังงานมาก และมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่ำ เป็นต้น ดังนั้นฟิล์มเพชรจึงเป็นวัสดุใหม่ที่น่าสนใจในการพัฒนาเพื่อนำมาใช้สร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งเหมาะกับการนำมาสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มของรังสีเอกซ์เรย์

ภาคประมวลผลและแสดงผล

หลักการทำงานในหน้านี้จะทำหน้าที่ในการคำนวณและเปรียบเทียบค่าของอินพุตที่เข้ามากับฐานข้อมูลเพื่อให้ได้ที่เราต้องการรวดเร็วและมีความถูกต้องแม่นยำ โดยไมโครคอนโทรลเลอร์ถือได้ว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสามารถในการประมวลผลและมีความสะดวกราคาไม่แพง ส่วนภาคแสดงผลจะใช้โมดูล LCD ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีราคาไม่แพงและมีคุณสมบัติการแสดงผลได้ตามที่ต้องการ ใช้งานง่ายไม่ซับซ้อนมากนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

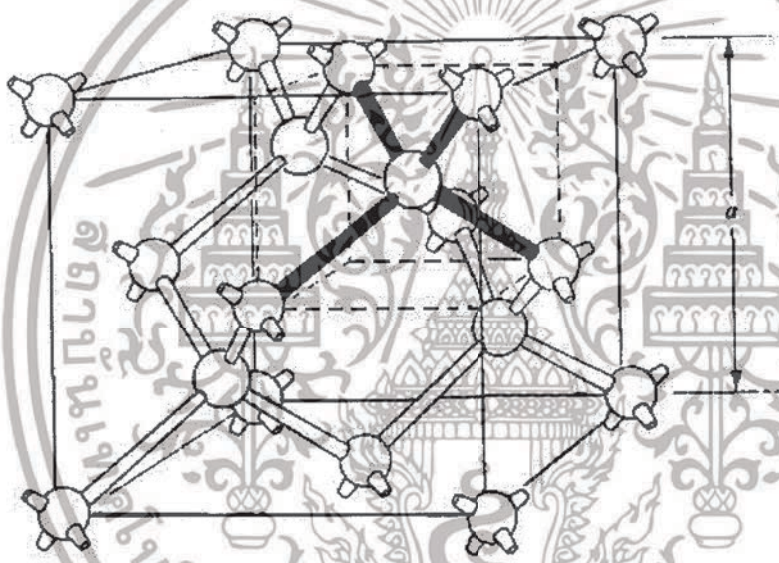
บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ฟิสิกส์เพชร

2.1.1 ลักษณะโครงสร้างผลึกเพชร

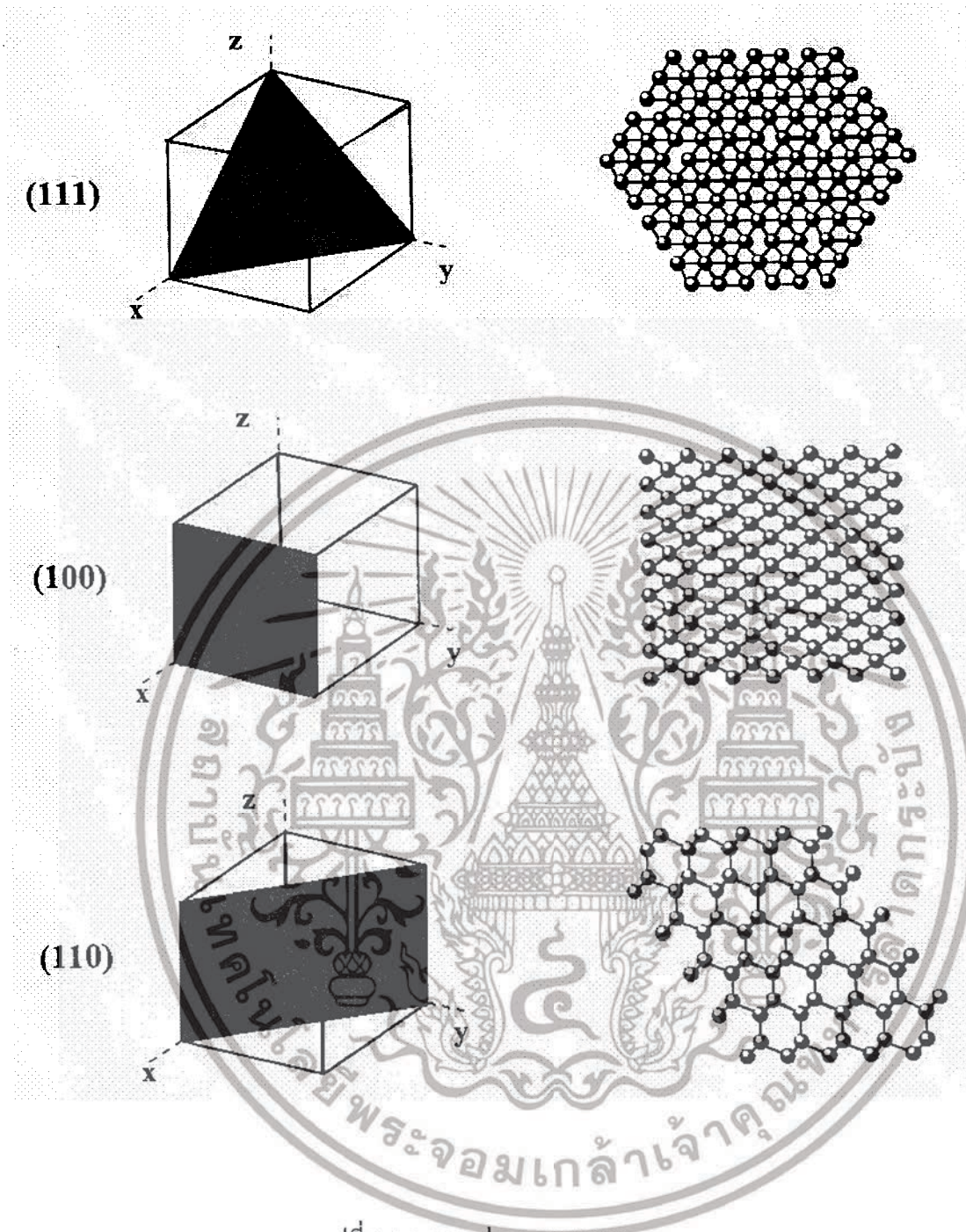
โครงสร้างของผลึกเพชรมีลักษณะเป็นแบบ face center cubic โดยที่อะตอมคาร์บอนยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะโควาเลนต์ โดยในหนึ่งยูนิตเซลล์ (unit cell) จะประกอบด้วยอะตอมคาร์บอน 8 อะตอม ซึ่งมีลักษณะการยึดเหนี่ยวกันในรูปที่ 2.1 คือ 1/8 ของอะตอม ของอะตอมอยู่บริเวณมุมทั้งแปด อีก 1 /2 อะตอมอยู่ที่แต่ละหน้าของยูนิตเซลล์



รูปที่ 2.1 แบบจำลอง โครงสร้างผลึกเพชร

เมื่อพิจารณาระนาบของผลึกเพชรสามารถเกิดการเรียงตัวได้หลายระนาบ เช่น ระนาบ(111) จะมีลักษณะเหมือนอะตอมคาร์บอนในระนาบเดียวกันเรียงตัวเป็น สามเหลี่ยมซ้อนกัน ระนาบ(100) จะมีลักษณะเหมือนอะตอมคาร์บอนในระนาบเดียวกันเรียงตัวเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสและ ระนาบ(110) จะมีลักษณะเหมือนอะตอมคาร์บอนในระนาบเดียวกันเรียงตัวเป็น สี่เหลี่ยมผืนผ้าตัวอย่างระนาบของเพชรแบบต่างๆแสดงในรูปที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 คุณสมบัติต่างๆ ของเพชร

เพชรมีคุณสมบัติที่พิเศษกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ อยู่หลายประการ ไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติ ทางกายภาพ ทางไฟฟ้า และทางแสง เป็นต้น โดยถ้าพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพ เนื่องจากเพชรมีการยึดเหนี่ยวของ อะตอมเป็นแบบพันธะโควาเลนต์ซึ่งเป็นพันธะเคมีที่มีความแข็งแรงจึงทำให้เพชรมีความแข็งแรงสูง นอกจากนั้นยัง มีความทนต่อการกัดของสารเคมีและมีความนำความร้อนสูง ในด้านคุณสมบัติทางไฟฟ้า พบว่าค่าความคล่องตัวของประจุพาหะ โฮลและอิเล็กตรอน มีค่าสูง และเพชรยังมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่ำทำให้สามารถทำงานได้ที่ ความถี่สูง ส่วนคุณสมบัติทางแสงนั้นเพชรมีความกว้างช่องว่างแถบพลังงานสูงจึงมีความเหมาะสมในการนำมา สร้างเป็น อุปกรณ์ตรวจวัดแสงความยาวคลื่นสั้น ซึ่งจะทำให้การรบกวนจากแสงช่วงตามองเห็นต่ำ

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

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเพชรกับสารกึ่งตัวนำอื่นๆ

2.1.3 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

ปัจจุบันการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรสามารถทำได้หลายวิธี เช่น สังเคราะห์ด้วยระบบ CVD แบบ ลวดความร้อน (Hot-Filament CVD) , แบบคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Plasma CVD), แบบ ดีซี พลาสมา (DC Plasma CVD) และแบบคลื่นความถี่ (RF Plasma CVD) เป็นต้น

โดยในที่นี้จะกล่าวรายละเอียดเฉพาะวิธีการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธีการ CVD แบบ ลวดความร้อน ซึ่งไดอะแกรมระบบ CVD แสดงในรูปที่ 2.3 หลักการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรมีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) ในระบบต้องมีอะตอมคาร์บอน

เนื่องจากการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรจะใช้อะตอมคาร์บอนเป็นปัจจัยในการเกิดผลึกเพชร โดยสามารถใช้ก๊าซมีเทน เป็นแหล่งจ่ายคาร์บอน ซึ่งนอกจากจะได้อะตอมคาร์บอนแล้ว ในส่วนก๊าซไฮโดรเจนยังมีส่วนสำคัญในการกำจัด

กราไฟต์ ซึ่งปริมาณของก๊าซไฮโดรเจน และอนุโมลคาร์บอนที่เหมาะสมจะทำให้การเกิดของเพชรมีคุณภาพที่ดี

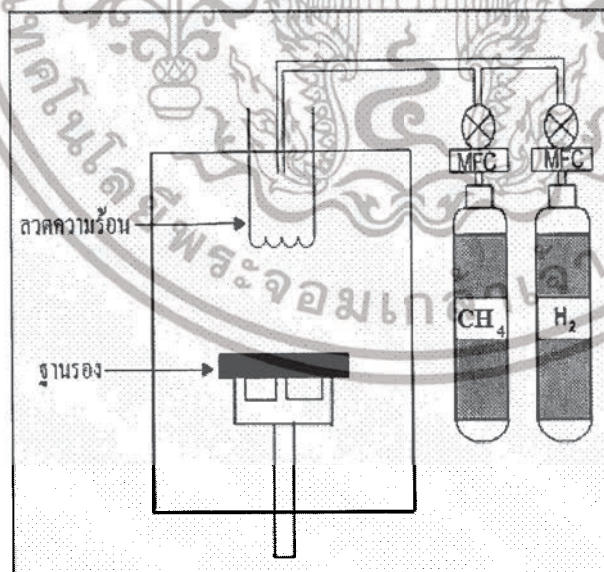
2) การกระตุ้นก๊าซให้เกิดอนุโมลคาร์บอน

ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยระบบ CVD แบบลวดความร้อน การกระตุ้นก๊าซเพื่อให้อะตอมคาร์บอนแยกตัวออกจากอะตอมอื่นแล้วก่อตัวเป็นฟิล์มเพชรบนฐานรองที่เตรียมไว้ สมการเคมีแสดงการแตกตัวของ ก๊าซแสดงในสมการที่ดังนี้



3) อุณหภูมิของฐานรองที่เหมาะสม

พิจารณาจากรูปที่ 2.3 อุณหภูมิของฐานรอง นั้นเกิดจากการถ่ายเทความร้อนจากลวดความร้อนไปยังฐานรอง ดังนั้นระยะห่างระหว่างลวดความร้อนกับฐานรองจะเป็นตัวกำหนดอุณหภูมิของฐานรอง ซึ่งอุณหภูมิของฐานรองจะมีผลสำคัญในการกำหนดรูปผลึกของฟิล์มเพชร

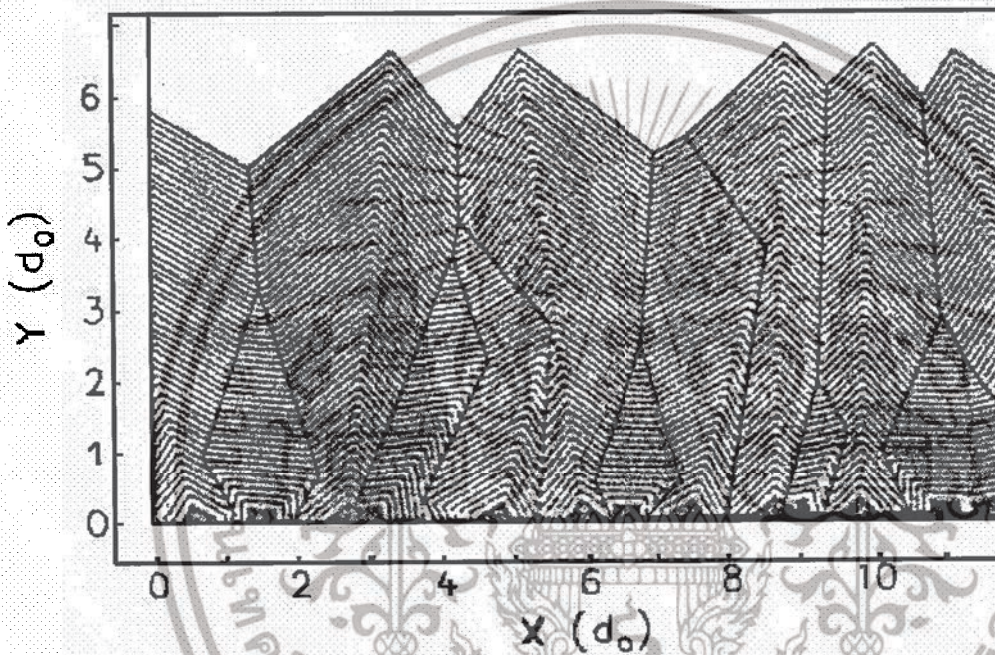


รูปที่ 2.3 ภาพไออะแกรมระบบ CVD แบบลวดความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) การเตรียมพื้นผิวของฐานรอง

ฐานรอง (Substrate) มีความสำคัญมากต่อการเกิดนิวเคลียสของเพชร โดยสามารถเลือกฐานรองได้หลายชนิด เช่น ซิลิคอน อลูมินา โมลลิบดีนัม เป็นต้น โดยทั่วไปมักใช้ ซิลิคอน นำมาขัดผิวหน้าด้วยครีมเพชรให้มีลักษณะเป็นเส้นรอยขีดข่วนทั้งนี้เพื่อง่ายต่อการเกิดนิวเคลียสของผลึกเพชรฟิล์มเพชรจะเริ่มต้นเกิดที่รอยขีดข่วนก่อนจากนั้นจึงเริ่มขยายขึ้นเรื่อยๆ รูปที่ 2.4 แสดงภาพจำลองการก่อตัวของฟิล์มเพชรที่มีลักษณะเป็นแบบโพลีคริสตัลไลน์

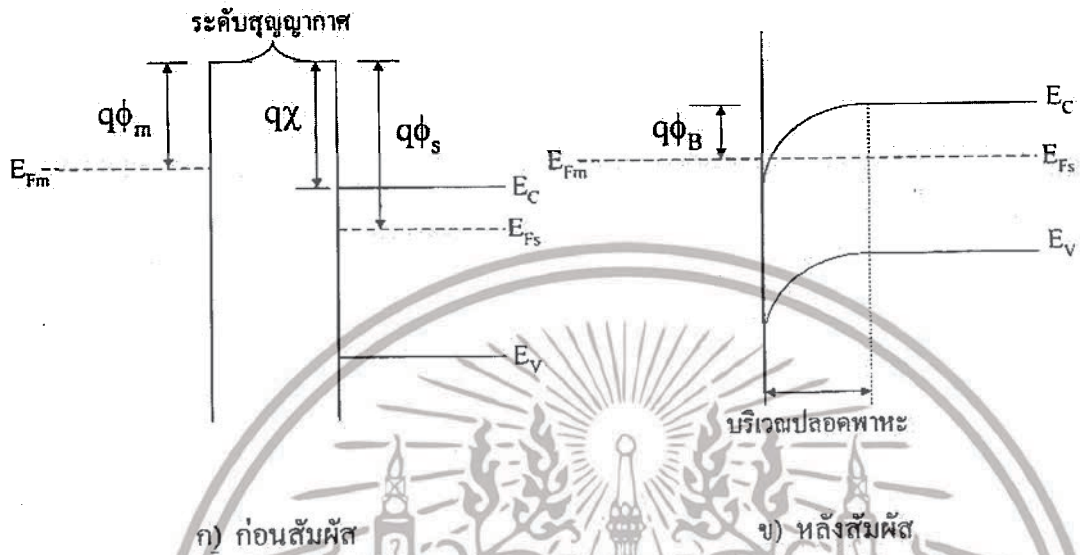


รูปที่ 2.4 แสดงภาพจำลองการก่อตัวของฟิล์มเพชรที่มีลักษณะเป็นแบบโพลีคริสตัลไลน์

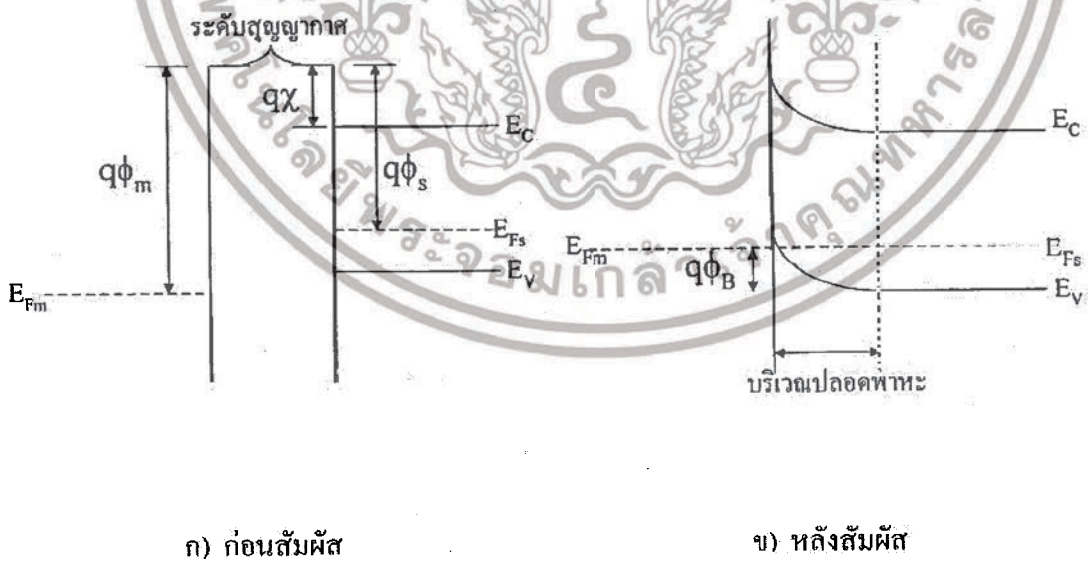
2.2 รอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ

ในการนำอุปกรณ์ประเภทโซลิดสเตต ไปใช้งานการสร้งรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ นับว่ามีความสำคัญอย่างมากเนื่องจากการเชื่อมต่ออุปกรณ์โซลิดสเตตสู่โลกภายนอก ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ ซึ่งแบ่งได้เป็นสองชนิด คือ แบบเรกติไฟร์และแบบโอห์ม โดยจะอธิบายโดยใช้โครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำ ทั้งก่อนและหลังนำมาสัมผัสกัน ซึ่งการเกิดรอยสัมผัสจะมีลักษณะเป็นแบบ เรกติไฟร์หรือแบบโอห์ม นั้นจะขึ้นอยู่กับค่าฟังก์ชันงาน(work function)ของโลหะและ อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี(electron affinity)ของสารกึ่งตัวนำ และในหัวข้อถัดไปจะอธิบายถึงรายละเอียดเกี่ยวกับการไหลของกระแสไฟฟ้าและค่าความจุไฟฟ้าในรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 โครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น(N)



รูปที่ 2.6 โครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 รอยต่อแบบโอห์มมิก

เมื่อนำโลหะมาสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำแล้วรอยต่อมีคุณสมบัติที่มีความนำสูง โดยสามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ทั้ง 2 ทิศทางเราเรียกรอยต่อแบบนี้ว่ารอยต่อแบบโอห์มมิก(ohmic contact) โครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำทั้งก่อนนำมาสัมผัสและหลังนำมาสัมผัสแสดงในรูปที่ 2.5 สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น(N) และในรูปที่ 2.6 สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดพี(P) พิจารณารูปที่ 2.5 ซึ่งแสดงโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยค่าฟังก์ชันงานของโลหะ ϕ_m มีค่าน้อยกว่าค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ϕ_s เมื่อเรานำโลหะและสารกึ่งตัวนำมาสัมผัสกันจะเกิดการถ่ายเทประจุพาหะระหว่างสารทั้งสองชนิดจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุล โดยระดับเฟอร์มิ (fermi level) ของสารทั้งสองชนิดจะอยู่ระดับเดียวกัน เนื่องจากอิเล็กตรอนจากโลหะจะไหลผ่านรอยต่อเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดอิเล็กตรอนบวกขึ้นทางด้านโลหะและทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายในรอยต่อขึ้น โดยการไหลอิเล็กตรอนจะหยุดลงเมื่อสนามไฟฟ้าภายใน มีค่าสูงพอที่จะสามารถต้านการแพร่ของอิเล็กตรอนได้และเป็นสภาวะสมดุล ดังนั้นทำให้เกิดการสะสมของอิเล็กตรอนทางด้านสารกึ่งตัวนำบริเวณรอยต่อ โดยถ้าสังเกตจากรูปที่ 2.5 จะไม่มีกำแพงศักย์กั้นอิเล็กตรอนที่จะเคลื่อนที่จากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ กล่าวคืออิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้ทั้งสองทิศทาง และในสารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่มี $\phi_s < \phi_m$ ก็เกิดปรากฏการณ์เช่นเดียวกันกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

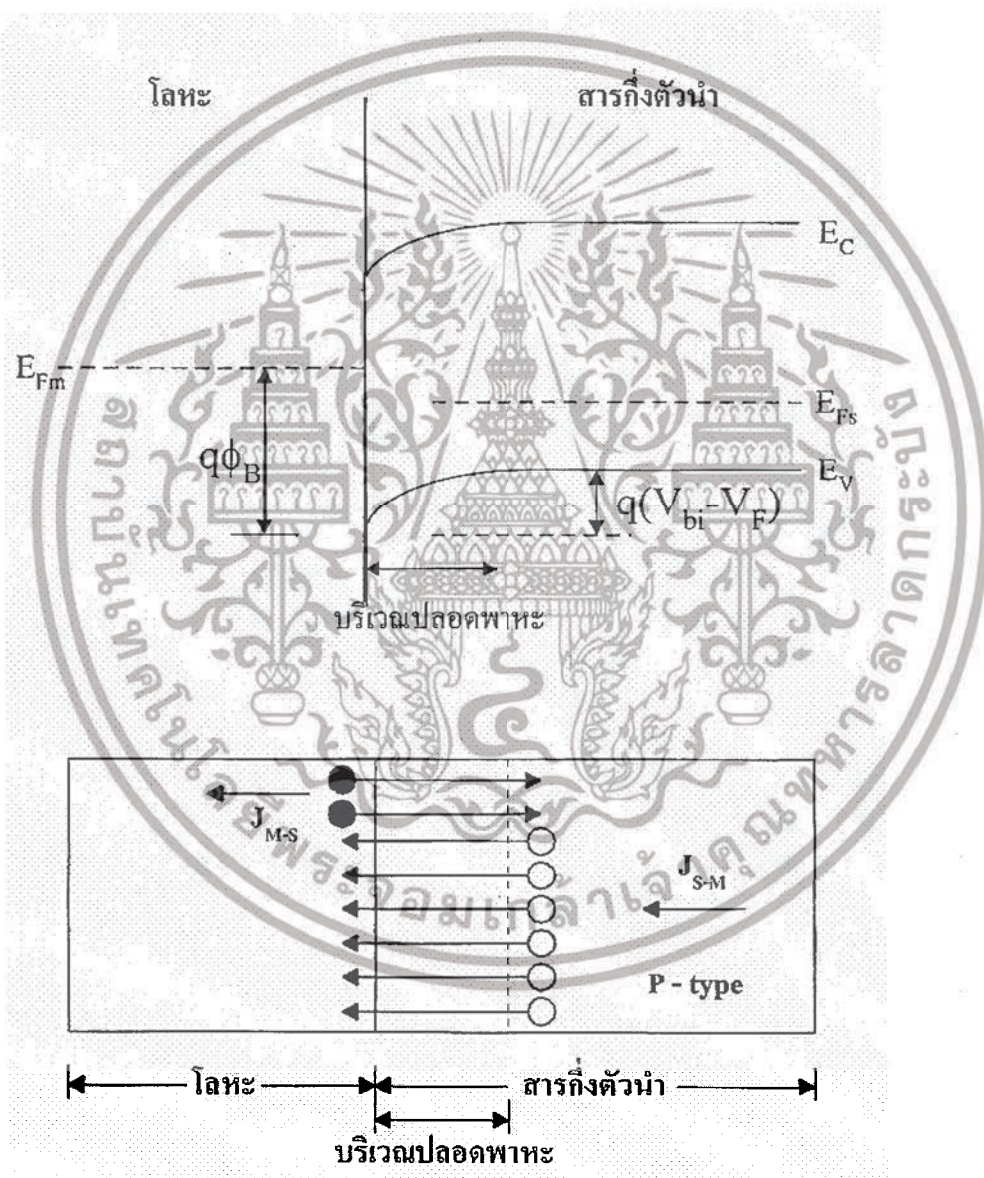
2.2.2 รอยต่อชนิดชอตต์กี

เมื่อนำโลหะมาสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำแล้วรอยต่อมีคุณสมบัติยอมให้กระแสไหลผ่านในทิศทางเดียว เราเรียกรอยต่อแบบนี้ว่ารอยต่อชอตต์กี (schottky contact) พิจารณาสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ฟังก์ชันงานของโลหะ ϕ_m มีค่ามากกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ϕ_s เมื่อเรานำโลหะและสารกึ่งตัวนำมาสัมผัสกันจะเกิดการถ่ายเทประจุพาหะระหว่างสารทั้งสองชนิดจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุล โดยระดับเฟอร์มิ (fermi level) ของสารทั้งสองชนิดจะอยู่ระดับเดียวกัน เนื่องจากอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อเข้าไปด้านโลหะจึงทำให้เกิดอิเล็กตรอนบวกเกิดขึ้นที่สารกึ่งตัวนำและเกิดมีประจุลบขึ้นที่ทางด้านโลหะ ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นที่บริเวณรอยต่อ ซึ่งสนามไฟฟ้านี้จะต้านการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเกิดเป็นกำแพงศักย์กั้นจนไม่มีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน คืออยู่ในสภาวะสมดุล ส่วนในสารกึ่งตัวนำชนิดพีก็อธิบายได้ด้วยปรากฏการณ์เดียวกัน และเมื่อนำโลหะกับสารกึ่งตัวนำมาสัมผัสกัน จะมีการถ่ายเทประจุพาหะจนกระทั่งอยู่ในสภาวะสมดุล คือไม่มีการเคลื่อนที่ของประจุพาหะดังนั้นจึงไม่มีกระแสไฟฟ้าไหล แต่เมื่อให้ไบอัสแรงดันให้แก่รอยต่อจะมีผลให้โวลต์ที่เคลื่อนที่จากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นแต่สำหรับกำแพงศักย์ที่กั้นอิเล็กตรอนที่ไหลจากด้านโลหะไปสารกึ่งตัวนำ ϕ_{ob} จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงโดยเมื่อให้ไบอัสไปข้างหน้า (forward bias) กับรอยต่อจะทำให้ค่า V_{bi} ศักย์ไฟฟ้าภายใน(built in voltage)ลดต่ำลงและถ้าแรงดันไบอัสมีค่ามากพอ ($V_F \geq V_{bi}$) ก็จะทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

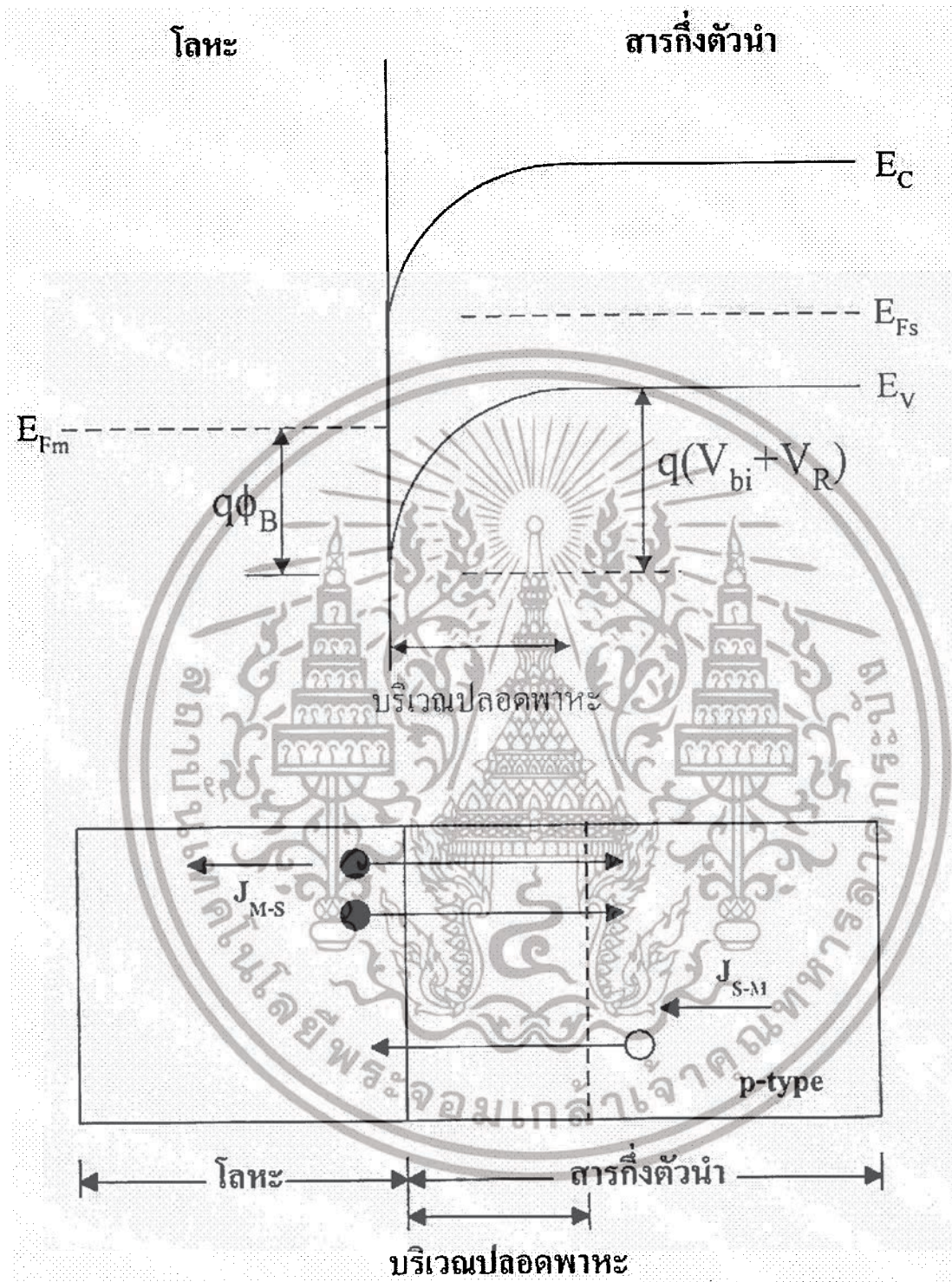
ประจุพาหะโฮลสามารถเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อไปยังโลหะได้ ในทางตรงข้ามถ้าให้ไบอัสย้อนกลับ (reverse bias) แก่รอยต่อก็จะทำให้ระดับพลังงานในสารกึ่งตัวนำมีค่าสูงขึ้นดังนั้นโฮล ซึ่งเป็นประจุพาหะส่วนใหญ่ในสารกึ่งตัวนำจะถูกขัดขวางด้วยกำแพงศักย์ที่มากขึ้นทำให้ไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามผ่านรอยต่อไปยังด้านโลหะได้

แบบจำลองโครงสร้างและแถบพลังงานของรอยต่อโลหะกับสารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับไบอัสไปข้างหน้าและไบอัสย้อนกลับแสดงในรูปที่ 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ



รูปที่ 2.7 โครงสร้างและแถบพลังงานของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับไบอัสแรงดันไปข้างหน้า (สารกึ่งตัวนำชนิดพีให้ศักย์บวกและโลหะให้ศักย์ลบ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 โครงสร้างและแถบพลังงานของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับไบอัสแรงดันไปข้างหน้า (สารกึ่งตัวนำชนิดพีให้ศักย์ลบและโลหะให้ศักย์บวก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2.1 การไหลของกระแสไฟฟ้าในรอยต่อโลหะกับสารกึ่งตัวนำ

การไหลของกระแสไฟฟ้าในรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำแบบขอตต์ก็เกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุพาหะส่วนมาก(majority carriers) โดยที่ทฤษฎีที่ใช้ในการอธิบายพฤติกรรมกรรมการไหลของกระแสในรอยต่อแบบขอตต์ก็อยู่หลายทฤษฎี แต่ในหัวข้อนี้จะกล่าวเฉพาะทฤษฎีที่นิยมใช้กัน โดยทั่วไปซึ่งมีอยู่ 2 ทฤษฎีคือ

- ทฤษฎีเทอโมไนโอนิกอิมิสชัน(thermionic emissssion theory) คิดโดย Bethe
- ทฤษฎีดิฟฟิวชัน(diffusion theory) คิดโดย Scottky

ทฤษฎีเทอโมไนโอนิกอิมิสชัน(thermionic emissssion theory)

ความหนาแน่นของกระแส (current density) $J_{s \rightarrow m}$ ที่ไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะสามารถแสดงได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$J_{s \rightarrow m} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \quad (2.3)$$

ความหนาแน่นของกระแส (current density) $J_{m \rightarrow s}$ ที่ไหลจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำสามารถแสดงไว้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$J_{m \rightarrow s} = -A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \quad (2.4)$$

ความหนาแน่นกระแสรวมหาได้จากการรวมสมการที่(2.3) และสมการ (2.4) ซึ่งจะได้ค่าความหนาแน่นของกระแสรวมดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$J = \left\{ A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \right\} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]$$

$$= J_{ST} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.5)$$

$$J_{ST} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \quad (2.6)$$

โดยที่ $A^* = \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3}$ คือ ค่าของริชาร์ดสัน (Richardson constant)

J_{ST} คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอิ่มตัว (saturation current density)

ทฤษฎีดิฟฟิวชัน (diffusion theory)

สมการความหนาแน่นกระแสตามแบบทฤษฎีดิฟฟิวชัน แสดงได้ดังนี้

$$J = \left\{ q^2 D_p N_V \left[\frac{q(V_{bi} - V)}{\epsilon_s} \right]^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \right\} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]$$

$$= J_{SD} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.7)$$

โดยที่

J_{SD} คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอิ่มตัว (saturation current density)

D_p คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ซึมของโฮล (diffusion coefficient of holes)

N_V คือ ความหนาแน่นประสิทธิผลของสเตตโฮล (effective density of states of holes)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2.2 ความจุไฟฟ้าของรอยต่อโลหะและสารกึ่งตัวนำ

ความกว้างบริเวณปลอดพาหะในรอยต่อของโลหะและสารกึ่งตัวนำจะขึ้นอยู่กับค่าไบอัสแรงดันย้อนกลับ โดยถ้าให้สารกึ่งตัวนำชนิดพีมีความเข้มข้นอะตอมสารเจือ N_A มีพื้นที่รอยต่อ A ให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ V_R จะเกิดบริเวณปลอดพาหะกว้าง W ดังนั้นเราสามารถคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าได้ดังสมการ (2.8)

$$C = \frac{\epsilon_S \epsilon_0 A}{W} \quad (2.8)$$

หรือหาได้จากสมการ (2.9)

$$C = \frac{A}{\sqrt{\frac{2(V_{bi} - V_R)}{qN_A \epsilon_S \epsilon_0}}} \quad (2.9)$$

2.2.2.3 ศักย์ไฟฟ้าภายในและค่าความสูงกำแพงศักย์ของรอยต่อชนิดพีไอเอ

พิจารณารอยต่อแบบชนิดพีที่เกิดจากการนำโลหะมาสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยที่ค่าฟังก์ชันงานของโลหะ (Φ_m) มีค่าน้อยกว่าค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ (Φ_s) เมื่อนำวัสดุทั้งสองมาสัมผัสกันแล้วจะเกิดการถ่ายเทประจุพาหะของวัสดุทั้งสองจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุลคือ ระดับพลังงานเฟอร์มิของวัสดุทั้งสองอยู่ในระดับเดียวกัน โดยเมื่อนำสารกึ่งตัวนำและโลหะมาสัมผัสกันจะทำให้เกิดความต่างศักย์ตกคร่อมที่รอยต่อเช่นเดียวกับรอยต่อแบบพีเอ็น ค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมรอยต่อขณะอยู่ในสภาวะสมดุลความร้อนเราเรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าภายใน V_{bi} (built in voltage) ซึ่งเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าที่ประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำจะต้องเอาชนะเพื่อที่จะข้ามไปยังด้านโลหะ นอกจากนี้บริเวณรอยต่อยังเกิดกำแพงศักย์ Φ_B (barrier height) กั้นอิเล็กตรอนจากด้านโลหะที่พยายามจะข้ามไปยังสารกึ่งตัวนำอีกด้วย V_0 คือ ค่าความแตกต่างระหว่างระดับพลังงานเฟอร์มิ กับระดับเวเลนซ์

การหาค่าศักย์ไฟฟ้าภายใน (V_{bi}) และค่าความสูงกำแพงศักย์ (Φ_B) สามารถคำนวณจากการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อโดยอาศัยสมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\phi_B = V_0 + V_{bi} \quad (2.10)$$

เมื่อ

$$V_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_V}{N_A} \quad (2.11)$$

และ

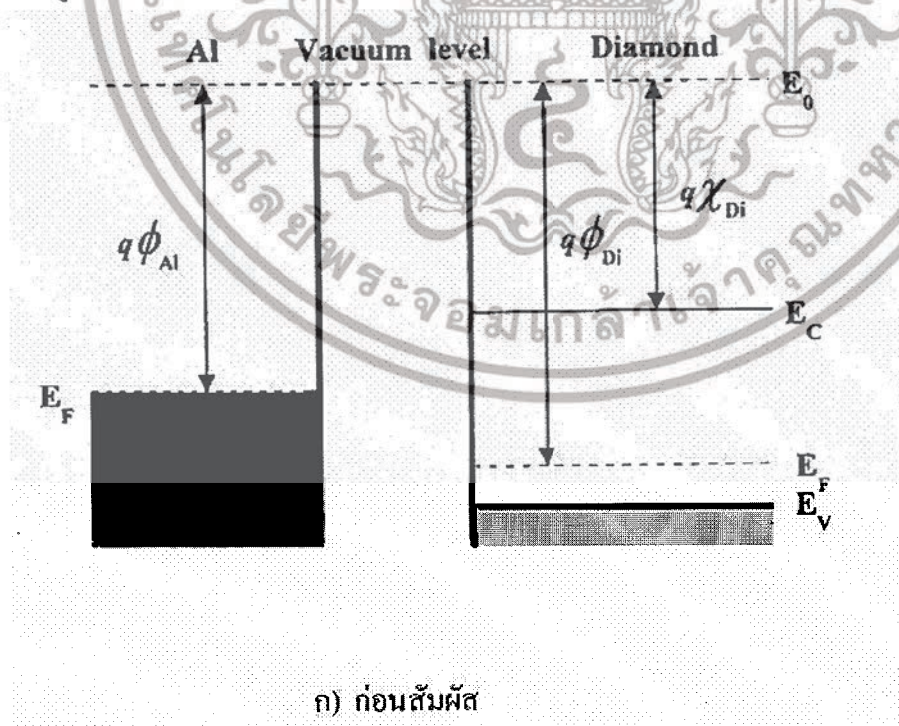
$$N_A = \frac{2}{q\epsilon_S A^2 \left[\frac{d(1/C^2)}{dV} \right]} \quad (2.12)$$

โดยค่า $d(1/C^2)/dV$ หาได้จากความชันของกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับแรงดันไบอัส V และค่าศักย์ไฟฟ้าภายใน V_{bi} หาได้จากจุดตัดของกราฟกับแกน X

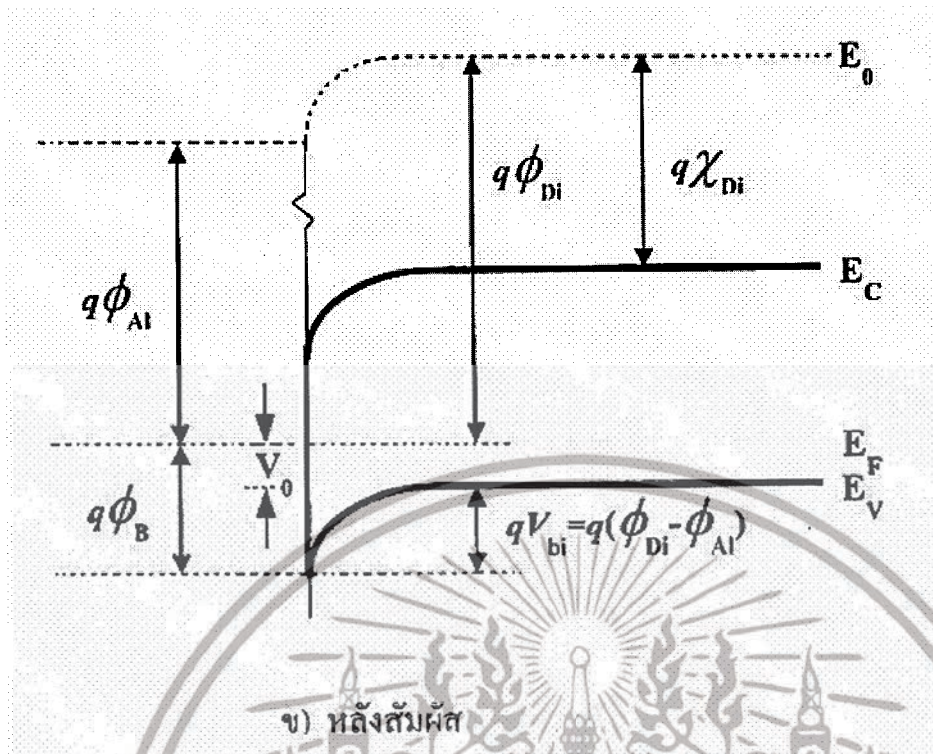
2.2.2.4 โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อฟิล์มเพชรกับโลหะอลูมิเนียม

รอยต่อฟิล์มเพชรกับโลหะอลูมิเนียมจัดเป็นรอยต่อแบบขอตต์ก็คือ เมื่อนำวัสดุทั้งสองมาสัมผัสกันจะทำให้เกิดความต่างศักย์ตกที่รอยต่อและยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านในทิศทางเดียว

แผนภาพโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อฟิล์มเพชรกับโลหะอลูมิเนียมทั้งก่อนและหลังสัมผัสแสดงในรูปที่ 2.9



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 โครงสร้างแถบพลังงานของฟิล์มเพชรและโลหะอลูมิเนียมทั้งก่อนและหลังนำมาสัมผัสกัน

ก) ก่อนสัมผัส ข) หลังสัมผัส

2.3 พฤติกรรมทางแสงของสารกึ่งตัวนำ

แสงและวัสดุมีความสัมพันธ์กันอย่างใกล้ชิดเช่น วัสดุสะท้อนแสงได้ วัสดุดูดกลืนแสงได้ วัสดุหักเหแสงได้ วัสดุเปล่งแสงได้ เป็นต้น ดังนั้นการใช้งานของสิ่งประดิษฐ์ทางแสงจึงต้องใช้ปรากฏการณ์ต่างๆเหล่านี้เป็นหลักในการทำงาน ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างแสงและสารกึ่งตัวนำ เพื่อจะศึกษาพฤติกรรมต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างแสงกับสารกึ่งตัวนำ

2.3.1 การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำนับเป็นพื้นฐานสำคัญต่อการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแสงโดยอาศัยหลักการที่ว่า เมื่อสารกึ่งตัวนำดูดกลืนแสงแล้วจะทำให้เกิดประจุพาหะอิสระขึ้นซึ่งเป็นการเปลี่ยนพลังงานทางแสงให้เป็นพลังงานทางไฟฟ้า การดูดกลืนแสงสามารถอธิบายด้วยสมการทางฟิสิกส์ที่พิจารณาว่าโฟตอนพลังค์ที่ผ่านเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ จะลดลงกับระยะทางที่เข้าไปข้างในสารกึ่งตัวนำ โดยจะลดลงอย่างเอ็กโพเนนเชียลและสามารถแสดงได้ด้วยความสัมพันธ์ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

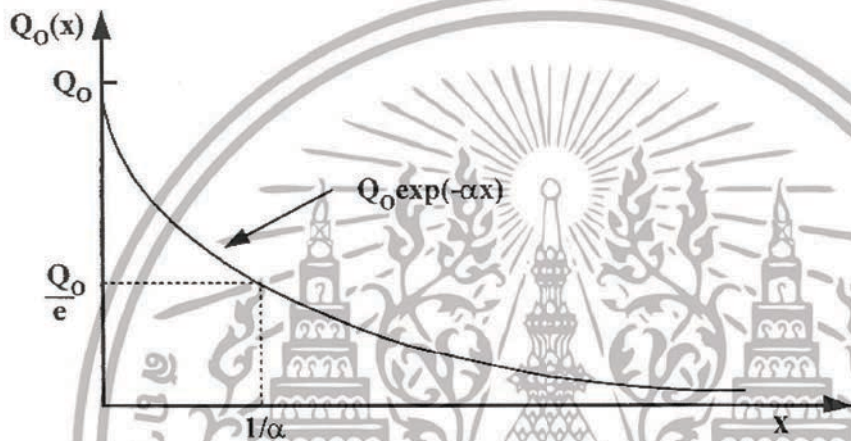
$$Q(x) = Q_0 \exp(-\alpha x) \tag{2.13}$$

โดยที่

$Q(x)$ คือ โฟตอนฟลักซ์ที่ความลึก x จากผิวสารกึ่งตัวนำ

Q_0 คือ โฟตอนฟลักซ์ที่ผ่านผิวสารกึ่งตัวนำเข้าไปด้านใน ($\text{photo.cm}^{-2}.\text{sec}^{-1}$)

α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (cm^{-1})

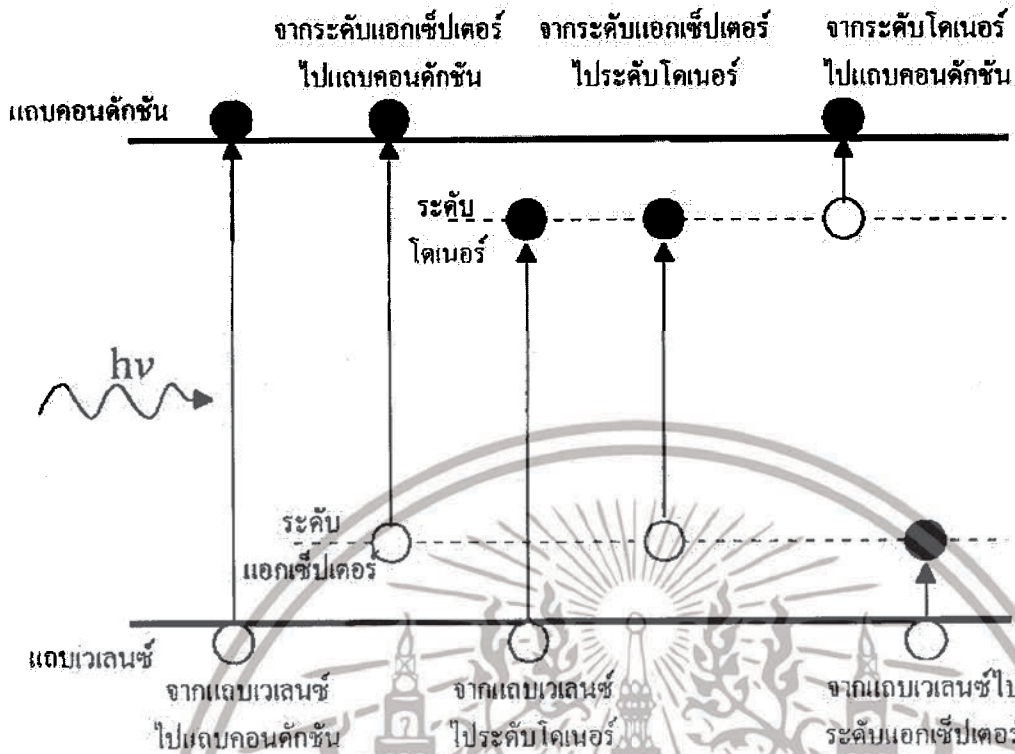


รูปที่ 2.10 การลดลงของโฟตอนฟลักซ์ที่ผ่านเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ

ปริมาณของโฟตอนฟลักซ์ที่ลดลงเกิดจากการดูดกลืนโฟตอนภายในสารกึ่งตัวนำ และรูปที่ 2.10 การลดลงของโฟตอนฟลักซ์ที่ผ่านเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ โดยส่วนกลับของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงคือระยะทางที่โฟตอนฟลักซ์ที่ผ่านเข้าไปในสารกึ่งตัวนำแล้วมีค่าลดลง $1/e$ เท่าของค่าเริ่มต้น

2.3.2 การดูดกลืนแสงในช่องว่างแถบพลังงาน

การดูดกลืนแสงในช่องว่างแถบพลังงานหรือการดูดกลืนแสงแบบเอ็กทรินซิกเป็นการดูดกลืนแสงจากระดับพลังงานภายในช่องว่างแถบพลัง เมื่อเติมสารเจือปนหรืออะตอมแปลกปลอมเข้าสู่ผลึกสารกึ่งตัวนำจะทำให้เกิดระดับพลังงานต่างๆ ขึ้นในแถบ พลังงานต้องห้าม เราเรียกระดับช่องว่างในแถบพลัง(gap state) โดยระดับในช่องว่างแถบพลังงานเหล่านี้สามารถเป็นศูนย์กลางของการเปลี่ยนแปลงสถานะของอิเล็กตรอนที่ดูดกลืนแสงได้ด้วย รูปที่ 2.11 แสดงการดูดกลืนแสงจากระดับพลังงานต่างๆ ในช่องว่างแถบพลังงาน



รูปที่ 2.11 แสดงการดูดกลืนแสงจากระดับพลังงานต่างๆ ในช่องว่างแถบพลังงาน

โดยปกติอะตอมสารเจือที่เติมเข้าไปจะมีพลังงานกระตุ้น(activation energy) น้อยกว่าช่องว่างแถบพลังงาน(E_g) ดังนั้นโฟตอนที่มีความยาวขอบของการดูดกลืนแสงจากพื้นฐานจึงสามารถกระตุ้นให้อิเล็กตรอนจากระดับสารเจือไปยังแถบคอนดักชันได้ในกรณีของอะตอมสารเจือโคเนอร์หรืออะตอมสารเจือผู้ให้ และสามารถกระตุ้นอิเล็กตรอนจากแถบเวเลนซ์ไปยังระดับสารเจือในกรณีของสารเจือแอกเซ็ปเตอร์หรือสารเจือผู้รับ ดังนั้นการดูดกลืนแสงแบบนี้จึงเกี่ยวข้องกับกลไกการดูดกลืนพลังงานโฟตอน 2 แบบ คือการดูดกลืนพลังงานโฟตอน โดยอะตอมสารเจือในสารกึ่งตัวนำและสารดูดกลืนโฟตอน โดยเวเลนส์อิเล็กตรอน

2.3.3 การดูดกลืนแสงด้วยเอกซิตรอน

ในสารกึ่งตัวนำการกระตุ้นให้อิเล็กตรอนกระโดดไปสู่แถบคอนดักชันและเหลือโฮลไว้ในแถบเวเลนซ์นั้น บางครั้งถ้าการกระตุ้นมีพลังงานไม่เพียงพอ อาจทำให้อิเล็กตรอนและโฮลยังคงมีแรงดึงดูดซึ่งกันและกันให้เป็นคู่อยู่เรียกว่า เอกซิตรอน (excitron) เอกซิตรอนเป็นคู่ของอิเล็กตรอนและโฮลที่ไม่เป็นอิสระแต่อยู่ในสภาพจับคู่กัน เกิดขึ้นเพราะพลังงานโฟตอนของแสงไม่สูงพอที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนและโฮลเป็นอิสระต่อกัน ถ้าสังเกตการดูดกลืนแสงที่ทำให้เกิดเอกซิตรอนจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าสเปกตรัมของการดูดกลืนแสงมีรูปร่างแบนและมีความยาวคลื่นน้อยกว่าขนาดของช่องว่างเล็กน้อย

2.3.4 การดูดกลืนแสงด้วยอิเล็กตรอนอิสระ

อิเล็กตรอนอิสระที่อยู่ในแถบคอนดักชันในโลหะหรือสารกึ่งตัวนำ เมื่อได้รับพลังงานจากแสงจะถูกเร่งให้โมเมนตัมมีค่าเพิ่มขึ้น จึงเกิดการดูดกลืนแสงและอิเล็กตรอนก็มีพลังงานเพิ่มขึ้นเราเรียกการดูดกลืนแสงชนิดนี้ว่า การดูดกลืนแสงด้วยอิเล็กตรอนอิสระ (free electron absorption หรือ free carrier absorption) การดูดกลืนแสงด้วยอิเล็กตรอนอิสระเกิดขึ้นที่ความยาวคลื่นแสงยาวมากๆ

2.3.5 การดูดกลืนแสงด้วยโพลาริเซชันในวัสดุไดอิเล็กตริก

การวางวัสดุไดอิเล็กตริกไว้ในสนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดการแตกขั้วเป็นโพลาริเซชัน (polarization) และถ้าสนามไฟฟ้ามีการกลับขั้วไปมากก็จะทำให้โพลาริเซชันนั้นสั่นตามและเกิดการดูดกลืนพลังงานจากสนามไฟฟ้าได้ เนื่องจากแสงก็เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีสนามไฟฟ้าอยู่ในตัว ดังนั้นแสงจึงถูกโพลาริเซชันในวัสดุไดอิเล็กตริกดูดกลืนได้ ย่านความยาวคลื่นแสงที่ถูกดูดกลืนจะมีค่าเท่าไรนั้นจะขึ้นกับชนิดของโพลาริเซชันว่าเป็นชนิดใด

2.3.6 การดูดกลืนแสงด้วยการสั่นของโครงผลึก

ตามปกติอะตอมที่ประกอบกันเป็นวัสดุหนึ่ง ๆ ที่อยู่หมู่หนึ่ง ๆ ไม่ได้อยู่นิ่งเฉย แต่จะมีการสั่นรอบๆ ตำแหน่งสมดุลเสมอ และถ้าเป็นอะตอมที่มีขั้วไฟฟ้าแบบไอออนอยู่บ้าง ก็จะทำให้ไอออนบวกและลบสั่นสลับข้างกัน เมื่อเป็นเช่นนั้นถ้ามีแสงมาตกกระทบวัสดุเช่นนี้ แสงที่มีความถี่เท่ากับการสั่นของไอออนก็จะถูกวัสดุนั้นดูดกลืน

2.4 อุปกรณ์ขอตดีโฟโตไดโอด

การตรวจจับหรือวัดแสงมีส่วนสำคัญมากในการนำแสงมาใช้ประโยชน์ เนื่องจากแสงมีความยาวคลื่นต่างๆ และมีความเข้มแสงมากน้อยต่างกันตามสภาพการใช้งาน ดังนั้นการคิดค้นและประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจวัดแสงให้มีความเหมาะสมกับย่าน ความยาวคลื่นที่ใช้งานจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการนำแสงมาใช้ให้ได้ประโยชน์สูงสุด โดยหลักสำคัญของอุปกรณ์ตรวจวัดแสงที่ดีคือ ให้การตอบสนองที่ดีกับแสงความยาวคลื่นย่านที่ต้องการใช้งานและให้การตอบสนองที่ต่ำกับความยาวคลื่นแสงในช่วงอื่น

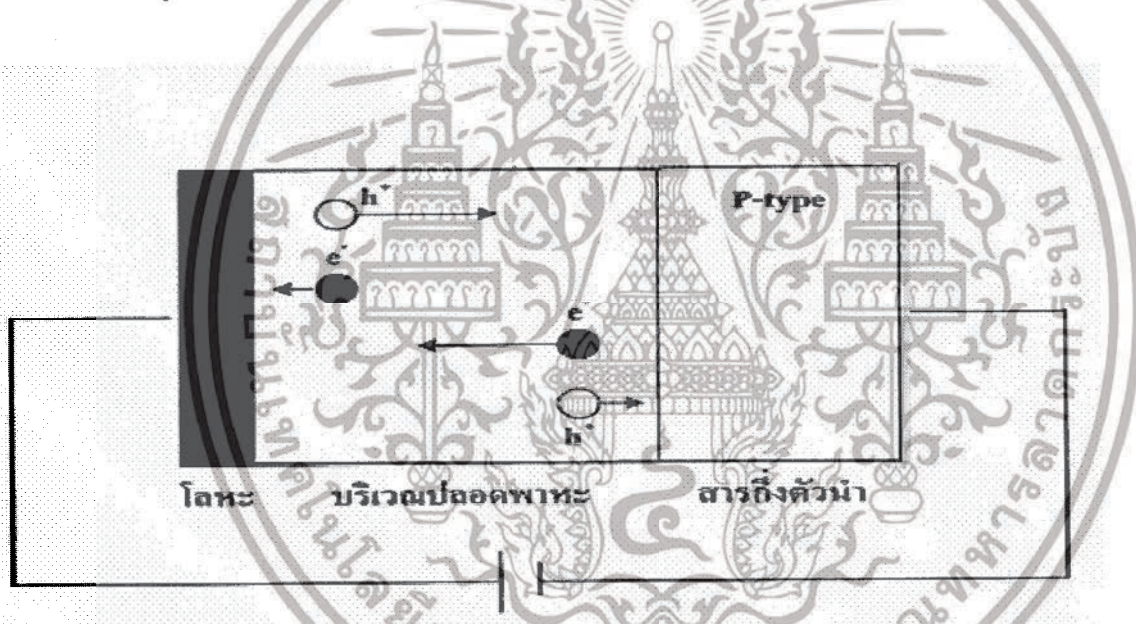
นอกจากนั้นยังควรมีการตอบสนองเชิงเวลาที่เร็ว มีสัญญาณรบกวนต่ำ ใช้แรงดันไบอัสต่ำ มีความเสถียรกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง มีขนาดเล็ก และราคาประหยัด ทั้งนี้คุณสมบัติที่กล่าวมาข้างต้นจะขึ้นกับวัสดุที่นำมาสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแสงและลักษณะโครงสร้างของอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงรายละเอียด อุปกรณ์ชนิดที่โฟโตไดโอดเป็นสิ่งประดิษฐ์ตรวจวัดแสงประเภท โฟโตอิเล็กทรอนิกส์แบบภายในที่มีรอยต่อของสารกึ่งตัวนำ โดยเมื่อมีแสงตกกระทบบริเวณรอยต่อจะเกิดกระแสไฟฟ้าและแรงดันขึ้น

2.4.1 โครงสร้างและหลักการทำงานของอุปกรณ์ชนิดที่โฟโตไดโอด

ชนิดที่โฟโตไดโอดเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่สามารถเปลี่ยนสัญญาณแสงอินพุตเป็นสัญญาณไฟฟ้าเอาต์พุตได้เมื่อมีแสงมาตกกระทบ โดยพลังงานโฟตอนของแสงมีค่ามากกว่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ($h\nu \geq E_g$) แสงก็จะถูกดูดกลืนและพลังงานโฟตอนของแสงจะไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนกระโดดจากแถบเวเลนซ์ไปสู่แถบคอนดักชันและเหลือโฮลไว้ที่แถบเวเลนซ์สนามไฟฟ้าจากรอยต่อจะพัดพาอิเล็กตรอนและโฮลไปยังโลหะและสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหล รูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์ชนิดที่โฟโตไดโอด



รูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์ชนิดที่โฟโตไดโอด

กระแสไฟฟ้าโฟโต (I_p) ที่เกิดจากประจุพาหะอิสระเนื่องจากแสงเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าสามารถหาได้จากผลต่างของกระแสไฟฟ้าวัดย้อนกลับขณะได้รับการฉายด้วยแสง (I_L) กับกระแสไฟฟ้ามืด (I_d) ดังนั้น $I_p = I_L - I_d$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่กระแสไฟฟ้าโฟตอนหาได้จากสมการ (2.14)

$$I_p = \frac{\eta q P_{op}}{h\nu}$$

เมื่อ η คือ ประสิทธิภาพควันตัม (quantum efficiency) หาได้จากอัตราส่วนระหว่างจำนวนพาหะที่เดินทางไปถึงขั้วไฟฟ้าต่อจำนวนโฟตรอนตกกระทบ

สำหรับกระแสไฟฟ้ามืดของซอติคักโฟโตไดโอดเกิดได้จากหลายสาเหตุด้วยกันซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ (2.15)

$$I_d = I_{d-G-R} + I_{d-diffusion} + I_{d-surface}$$

เมื่อ

$I_{d-surface}$ คือ กระแสไฟฟ้ามืดที่เกิดจากกระแสไฟฟ้ารั่วที่บริเวณผิว (surface leakage)

I_{d-G-R} คือ กระแสไฟฟ้ามืดที่เกิดจากการกำเนิดและรวมตัวของพาหะ (generation and recombination)

โดยที่

$$I_{d-G-R} \propto \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right)$$

$I_{d-diffusion}$ คือ กระแสไฟฟ้ามืดที่เกิดจากการแพร่ของประจุพาหะ

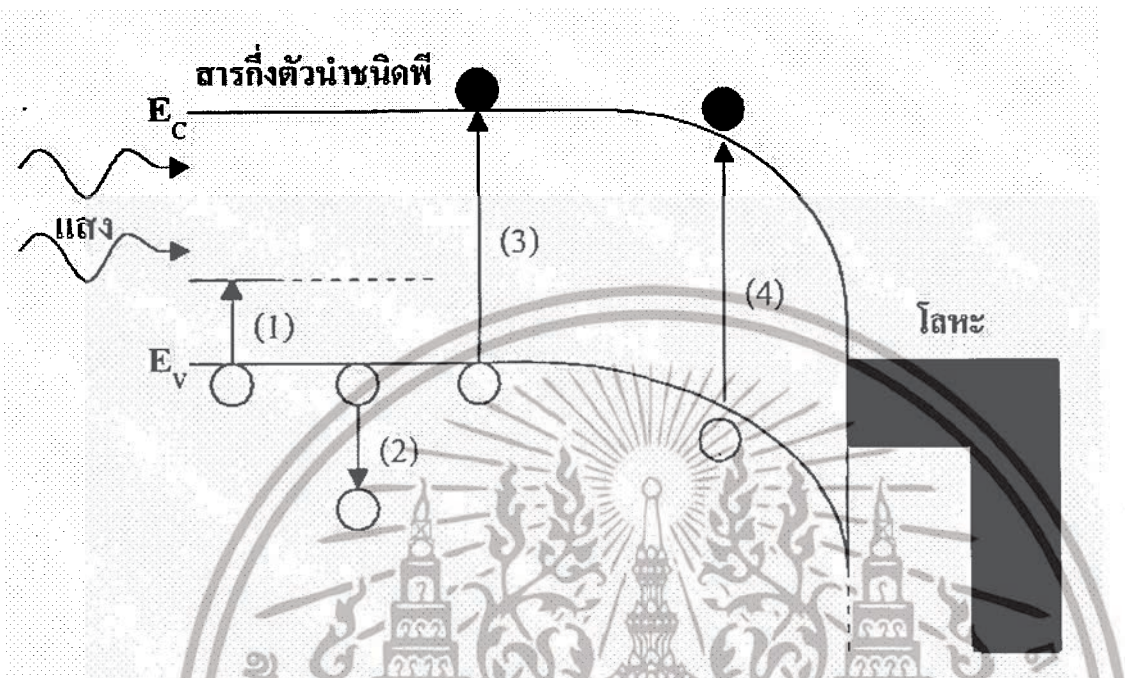
โดยที่

$$I_{d-diffusion} \propto \exp\left(\frac{-E_g}{kT}\right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 กลไกการดูดกลืนแสงและการเกิดกระแสไฟฟ้าโฟโต้

เมื่อมีแสงมาตกกระทบบนสารกึ่งตัวนำและมีการไบอัสย้อนกลับที่รอยต่อ จะเกิดกลไกการดูดกลืนแสงในลักษณะต่างๆตามหมายเลข ในรูปที่ 2.13 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.13 กลไกการดูดกลืนแสงแบบต่างๆในรอยต่อขอตักโฟโตไดโอด (ไบอัสย้อนกลับ)

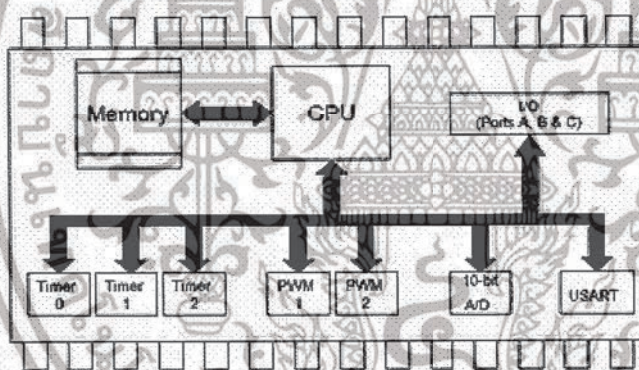
- 1) เป็นการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำระหว่างแถบเวเลนซ์และระดับแอกเซ็ปเตอร์ แต่ในที่สุดประจุพาหะอิเล็กตรอนส่วนใหญ่ก็จะตกลงมารวมกันที่โฮล จึงทำให้ไม่มีผลต่อกระแสเอาต์พุตมากนัก
- 2) เป็นการดูดกลืนแสงโดยโฮลอิสระ (free hole absorption) ในแถบเวเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำ โดยเพียงแต่ระดับพลังงานของโฮลจะลดลงและระดับพลังงานของอิเล็กตรอนสูงขึ้น จึงไม่ก่อให้เกิดกระแสเอาต์พุต
- 3) เป็นการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำที่ตำแหน่งใกล้เคียงบริเวณปลอดพาหะมาก โดยพาหะอิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะส่วนน้อยมีความน่าจะเป็นสูงในการแพร่ซึมเข้าไปในบริเวณชั้นปลอดพาหะ และอิเล็กตรอนจะถูกสนามไฟฟ้าในชั้นปลอดพาหะพัดให้ไหลไปสู่ชั้นโลหะ ซึ่งอิเล็กตรอนเหล่านี้จะมีผลต่อกระแสเอาต์พุต
- 4) เป็นการดูดกลืนแสงและผลิตคู่อิเล็กตรอนและโฮลในชั้นปลอดพาหะ โดยอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดขึ้นจะถูกสนามไฟฟ้าในชั้นปลอดพาหะพัดแยกจากกันให้ไหลไปยังโลหะและสารกึ่งตัวนำตามลำดับ ซึ่งการดูดกลืนแสงชนิดนี้จะมีผลต่อกระแสเอาต์พุตมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ทฤษฎีไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) เป็นชื่อของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบหนึ่งซึ่งรวมเอาหน่วยประมวลผล หน่วยคำนวณทางคณิตศาสตร์และลอจิก วงจรรับส่งสัญญาณอินพุต วงจรขับสัญญาณอินพุต หน่วยความจำ วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาไว้ด้วยกัน ทำให้สามารถนำไปใช้งานแทนวงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์ซับซ้อนได้เป็นอย่างดี ช่วยลดจำนวนอุปกรณ์และขนาดของระบบ ในขณะที่มีขีดความสามารถสูงขึ้น ภายใต้งบประมาณที่เหมาะสม ไมโครคอนโทรลเลอร์มาจากคำ 2 คำ รวมกันคือ “ไมโคร” ซึ่งหมายความถึงไมโครโปรเซสเซอร์ (Microprocessor) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ประมวลผลขนาดเล็กภายในประกอบด้วยหน่วยประมวลผลกลางหรือซีพียู หน่วยความจำคำนวณคณิตศาสตร์และลอจิก (ALU: Arithmetic Logic Unit) วงจรเชื่อมต่อหน่วยความจำและวงจรมีสัญญาณนาฬิกา อีกคำหนึ่งคือคำว่า “คอนโทรลเลอร์” หมายถึง อุปกรณ์ควบคุม ดังนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์จึงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมโดยที่สามารถเขียนโปรแกรมเพื่อกำหนดรูปแบบการควบคุมได้อย่างอิสระ

2.5.1 โครงภายในของไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 2.15 โครงภายในของไมโครคอนโทรลเลอร์

โครงสร้างโดยทั่วไป ของไมโครคอนโทรลเลอร์นั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ส่วนใหญ่ๆดังต่อไปนี้

1. หน่วยประมวลผลกลางหรือซีพียู (CPU : Central Processing Unit)
2. หน่วยความจำ (Memory) สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ หน่วยความจำที่มีไว้สำหรับเก็บโปรแกรมหลัก (Program Memory) เปรียบเสมือนฮาร์ดดิสก์ของเครื่องคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ คือข้อมูลใดๆ ที่ถูกเก็บไว้ในนี้จะไม่สูญหายไปแม้ไม่มีไฟเลี้ยง อีกส่วนหนึ่งคือหน่วยความจำข้อมูล (Data Memory) ใช้เป็นเหมือนกระดานทศในการคำนวณของซีพียู และเป็นที่พักข้อมูลชั่วคราวขณะทำงาน แต่หากไม่มีไฟเลี้ยง ข้อมูลก็จะหายไปคล้ายกับหน่วยความจำ (RAM) ในเครื่องคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่างๆ ไป แต่สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์สมัยใหม่ หน่วยความจำข้อมูลจะมีทั้งที่เป็นหน่วยความจำแรม ซึ่งข้อมูลจะหายไปเมื่อไม่มีไฟเลี้ยง และเป็นอีอีพรอม (EEPROM : Erasable Electrically Read Only Memory) ซึ่งสามารถเก็บข้อมูลได้แม้ไม่มีไฟเลี้ยง

3. ส่วนติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอก หรือพอร์ต (Port) มี 2 ลักษณะคือ พอร์ตอินพุต (Input Port) และพอร์ตส่งสัญญาณหรือพอร์ตเอาต์พุต (Output Port) ส่วนนี้จะใช้ในการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก ถือว่าเป็นส่วนที่สำคัญมาก ใช้ร่วมกันระหว่างพอร์ตอินพุต เพื่อรับสัญญาณ อาจจะใช้การกดสวิทช์ เพื่อนำไปประมวลผลและส่งไปพอร์ตเอาต์พุต เพื่อแสดงผลเช่น การติดสว่างของหลอดไฟ เป็นต้น

4. ช่องทางเดินของสัญญาณ หรือบัส (BUS) คือเส้นทางที่แลกเปลี่ยนสัญญาณข้อมูลระหว่างซีพียู หน่วยความจำและพอร์ต เป็นลักษณะของสายสัญญาณจำนวนมากอยู่ภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยแบ่งเป็นบัสข้อมูล (Data Bus), บัสแอดเดรส (Address Bus) และบัสควบคุม Control Bus)

4.1 บัสข้อมูลเป็นสายสัญญาณที่บรรจุข้อมูล เพื่อการประมวลผลทั้งหมด ขนาดของบัสจะขึ้นอยู่กับความสามารถการประมวลผลของซีพียู สำหรับในงานทั่วไป ขนาดของบัสข้อมูลจะเป็น 8 บิต และในปัจจุบันได้มีการพัฒนาขึ้นมาจนถึง 16,32 และ 64 บิต

4.2 บัสแอดเดรสเป็นสายสัญญาณที่บรรจุค่าตำแหน่งของหน่วยความจำ โดยการติดต่อกับหน่วยความจำนั้น ซีพียู ต้องกำหนดตำแหน่งที่ต้องการอ่านหรือเขียนก่อน ดังนั้นจำนวนสายสัญญาณของแอดเดรสจึงต้องมีจำนวนมาก ยิ่งมากเท่าไร ก็จะเป็นการแสดง ขนาดของหน่วยความจำที่ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถติดต่อได้ โดยสามารถคำนวณได้จาก

จำนวนแอดเดรสของหน่วยความจำ = 2 ยกกำลัง n (n คือจำนวนของเส้นทาง)

ยกตัวอย่าง ไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวหนึ่งมีสายแอดเดรส 10 เส้น ดังนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวนี้สามารถติดต่อกับหน่วยความจำได้ 2 ยกกำลัง 10 = 1,024 ตำแหน่ง

หากต้องการทราบความจุของหน่วยความจำจริงๆ จะต้องทราบถึงขนาดของบัสข้อมูลก่อนว่าเป็นเท่าใดหากเป็น 8 บิต ความจุของหน่วยความจำที่มีสายแอดเดรส 10 เส้น จะเท่ากับ $8 \times 1024 = 8,192$ บิต และ 1 กิโลไบต์ เท่ากับ 1,024 ไบต์ ดังนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์ดังกล่าว จึงมีความจุของหน่วยความจำเท่ากับ 8,192 บิต หรือ 1,024 ไบต์ หรือ 1 กิโลไบต์

4.3 บัสควบคุมเป็นกลุ่มของสายสัญญาณควบคุมการติดต่อทั้งหมดของซีพียูกับหน่วย-ความจำและพอร์ต สำหรับสายสัญญาณเลือกควบคุมหลักได้แก่ สายสัญญาณเลือก-อ่าน-เขียนหน่วยความจำ สายสัญญาณเลือกเลือก อ่าน-เขียน ข้อมูล กับพอร์ต

5. วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา นับเป็นส่วนประกอบที่สำคัญมากอีกส่วนหนึ่ง เนื่องจากการทำงานที่เกิดขึ้นในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ จะขึ้นอยู่กับกำหนัดจังหวะ หากสัญญาณนาฬิกาที่มีความถี่สูง จังหวะการทำงานก็จะสามารถทำได้ถี่ขึ้นส่งผลให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวนั้น มีความเร็วในการประมวลผลสูงตามไปด้วย

2.5.2 ความแตกต่างของไมโครคอนโทรลเลอร์กับไมโครโปรเซสเซอร์

จากรูปที่ 12.5 แสดง โครงสร้างภายในของไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งประกอบด้วย หน่วยประมวลผลกลาง หน่วยคำนวณทางคณิตศาสตร์และลอจิก และแอดเดรสสำหรับติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมกำเนิดสัญญาณนาฬิกา นั้นหมายความว่า การใช้งานไมโครโปรเซสเซอร์จะต้องเชื่อมติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมภายนอก และถ้าหากต้องการเชื่อมต่ออุปกรณ์อินพุตและเอาต์พุต ต้องอาศัยอุปกรณ์ที่เรียกว่า ไอซีขยายพอร์ต ทำให้การสร้างระบบควบคุมจึงต้องการอุปกรณ์จำนวนมาก ส่งผลให้ขนาดของระบบใหญ่พอสมควร

โครงสร้างของไมโครคอนโทรลเลอร์ จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าภายในไมโครคอนโทรลเลอร์มีอุปกรณ์พื้นฐานเหมือนกับไมโครโปรเซสเซอร์หากแต่จะบรรจุหน่วยความจำ ข้อมูล และพอร์ตอินพุตไว้ภายในพร้อมสรรพ ผู้ใช้งานจึงเพียงแต่บรรจุหน่วยความจำ โปรแกรม โปรแกรมควบคุมลงในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ แล้วต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างวงจรมกำเนิดสัญญาณนาฬิกา อาทิ คริสตอล ตัวเก็บประจุ เป็นต้น สุดท้ายเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อินพุต เอาต์พุตเข้ากับพอร์ต เพียงเท่านี้ก็สามารถใช้งานได้แล้ว

2.5.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC

PIC คือ microcontroller อีกตระกูลหนึ่ง ย่อมาจากคำว่า Peripheral Interface Controller ซึ่ง concept ของเจ้า microcontroller ตระกูลนี้ก็คือ พยายามรวมเอาทุกอย่างเอาไว้ในตัวของมันไม่ว่าจะเป็น PROGRAM MEMORY, RAM, EEPROM, SERIAL, I2C, PWM, A/D ฯลฯ โดยไม่จำเป็นต้องต่ออุปกรณ์เสริมจากภายนอก ในตัวของ PIC จะมีฟังก์ชันที่ใช้ในการประมวลผลรวมทั้งหน่วยความจำ ซึ่งทำให้มันเหมือนกัน CPU ตัวหนึ่งเลยทีเดียว

ความเร็วของ PIC

ภาคของความถี่สัญญาณนาฬิกา ปัจจุบันสามารถทำสัญญาณนาฬิกาได้ที่ 20 MHz ซึ่งทำให้หนึ่งคำสั่งของ PIC ใช้เวลาเพียง 0.25 uSec แต่อย่างไรก็ตามได้มีบริษัทอื่นได้ซื้อลิขสิทธิ์ PIC จาก microchip และได้สร้าง chip ที่มีความเร็วได้มากกว่าเดิมขึ้นไปอีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

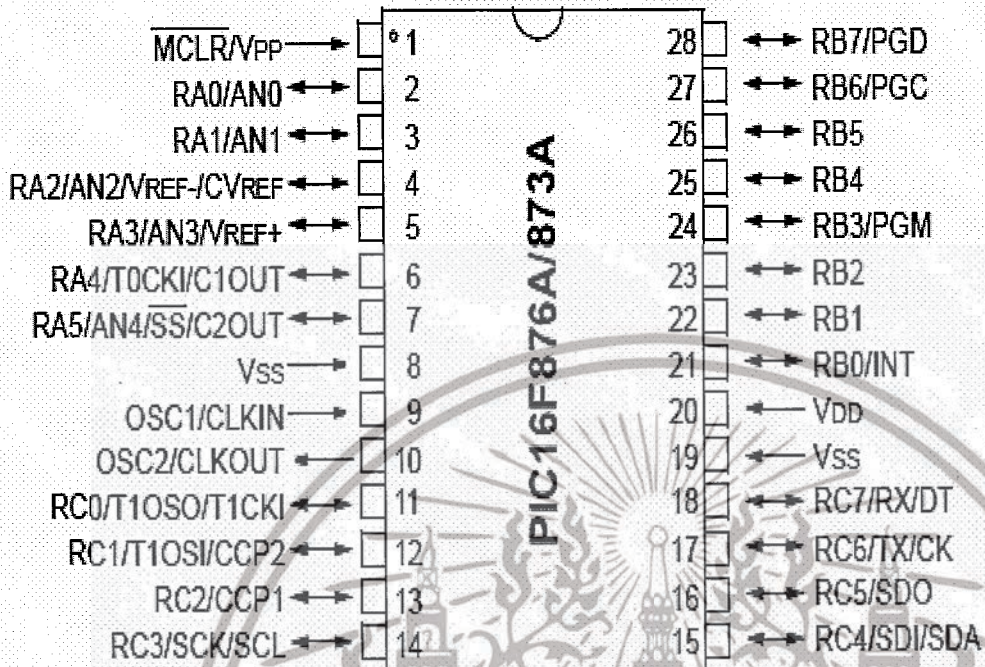
หน่วยความจำของ PIC

ในอดีตหน่วยความจำของ PIC จะค่อนข้างน้อย คืออยู่ระหว่าง 512 words ถึง 4K words แต่ในปัจจุบัน บริษัท microchip ซึ่งเป็นเจ้าของ PIC ได้พัฒนาจนทำให้ memory ของ PIC มีขนาดเป็นหลายสิบกิโลไบต์ และมีที่ท่าว่าจะขยายได้ใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ ในเรื่องของกัณขณขนาดของหน่วยความจำของ PIC จะนับไม่เหมือนปกติ โดยที่ หนึ่งคำสั่งของ PIC จะมีขนาด 14 bits ดังนั้นเราจะเรียกว่า 1 word ของ PIC จะมีขนาด 14 bits เช่น PIC16F84A ระบุว่ามึหน่วยความจำ 1 K (ซึ่งหมายถึง 1 Kword ถ้าคำนวณให้เป็นแบบ 1 byte = 8 bit จะได้ว่า $1 \times 1,024 \times 14 = 14,336$ bits ดังนั้นก็คือ $14,336 / (8 \times 1,024) = 1.75K$ bytes นั่นเอง

สถาปัตยกรรมของ PIC

ตอนนี้มี 3 สายหลักๆ สมัยก่อนมีแค่สอง คือขึ้นต้นด้วย 16xxx, 17xxx และใหม่ล่าสุดคือ 18xxx ถ้าพูดถึง คุณสมบัติที่เหนือกว่าเรียงจากน้อยสุดไปมากที่สุดก็คือ 16 -> 17 -> 18 คำสั่ง assembly ของ 17 และมี 18 จะมีมากกว่า 16 ทำให้เขียนโปรแกรมได้ง่ายกว่า ราคาจะสูงกว่าด้วย แต่ที่เป็นที่นิยมก็คือตระกูล 16xxx PIC จะยึดถือการออกแบบที่ว่ารวมทุกอย่างไว้ใน chip ตัวเดียวโดยไม่ต้องต่ออุปกรณ์ใดๆ เพิ่มเติม ผลที่ตามมาคือแผ่นวงจรจะมีขนาดเล็ก และอุปกรณ์ที่ใช้จะไม่มาก บางงานอาจจะใช้แค่ PIC เพียงตัวเดียวโดยไม่ต้องใช้ chip อื่นมาเพิ่มเติมเลย นี่ก็คือคุณสมบัติพิเศษของ PIC ซึ่งปัจจุบันหลายบริษัทที่ผลิต microcontroller ก็เริ่มจะหันมาเลียนแบบแนวทางนี้ครับ แต่ทุกอย่างย่อมมีข้อเสีย เนื่องจาก concept ที่จะรวมทุกอย่างไว้ใน chip เดียว ทำให้ program memory และ data memory ไม่สามารถขยายโดยใช้กับ memory ภายนอกได้ PIC จึงเหมาะสำหรับงานเล็กๆ ไม่ใช่งานใหญ่ๆ ที่ต้องใช้การคำนวณ และ memory เยอะๆ สำหรับ PIC ก็คือ มด แมลงที่สามารถยกของที่มีน้ำหนักมากกว่ามันได้หลายสิบเท่าทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 ตำแหน่งขาของ PIC 16F876A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การสร้างและออกแบบ

การที่อุปกรณ์ตรวจจับรังสีเอ็กซ์เรย์จะมีประสิทธิภาพการทำงานสูงนั้นนอกจากจะขึ้นกับคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้สร้างอุปกรณ์แล้ว การออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์ก็เป็นส่วนที่สำคัญมาก อีกส่วนหนึ่ง ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการออกแบบ โครงสร้างแล้ววิธีการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับแสงแบบชอตต์กีไดโอดฟิล์มเพชร ขั้นตอนการออกแบบและการสร้างมีรายละเอียดดังนี้

3.1 การออกแบบชอตต์กีโพโตไดโอดฟิล์มเพชร

รอยต่อชอตต์กีเกิดจากการสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำแล้วรอยต่อมีคุณสมบัติให้กระแสไหลผ่านในทิศทางเดียว โดยเมื่อให้ไบอัสย้อนกลับแก่รอยต่อจะทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะขึ้น ซึ่งบริเวณปลอดประจุพาหะนี้จะมีความสำคัญมากในการรับแสงแล้วทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลขึ้น โดยประจุพาหะทั้งสองชนิดจะถูกปิดไปยังขั้วโลหะทั้งสองด้วยความต่างศักย์ภายในบริเวณรอยต่อ การออกแบบให้มีบริเวณปลอดพาหะมีความกว้างมากๆจะทำให้ได้ปริมาณของคู่ประจุพาหะอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดจากแสงเพิ่มขึ้น ฟิล์มเพชรมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบโพลีคริสตัลไลน์ (polycrystalline) ซึ่งมีเส้นพรมแดนของผลึก (grain boundaries) จำนวนมาก ดังนั้นอุปกรณ์ทางแสงแบบพลาณา (planar) ที่สร้างบนฟิล์มเพชรจะประสบปัญหาของคู่อิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดจากแสงต้องเดินทางผ่านเส้นพรมแดนของผลึก ทำให้เกิดการลดลงของปริมาณประจุพาหะและทำให้เวลาตอบสนองของอุปกรณ์มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากประจุพาหะต้องใช้เวลา นานในการเดินทางผ่านเส้นพรมแดนของผลึก ดังนั้นการออกแบบอุปกรณ์ตรวจจับแสงแบบชอตต์กีไดโอดฟิล์มเพชรในรายงานฉบับนี้จึงออกแบบให้อุปกรณ์ทำงานในแนวตั้งซึ่งเป็นทิศทางขนานไปกับเส้นพรมแดนของผลึกทำให้สามารถลดอิทธิพลของเส้นพรมแดนของผลึกที่มีต่อทิศทางการเดินของกระแสไฟฟ้าได้ และนอกจากนี้ การออกแบบให้บริเวณปลอดพาหะมีความกว้างใกล้เคียงกับขนาดของผลึก (grain size) จะทำให้ประจุพาหะอิสระที่เกิดจากแสงในบริเวณรอยต่อเคลื่อนที่ไปยังขั้วโลหะโดยไม่ผ่านเส้นพรมแดนผลึกซึ่งเสมือนว่าประจุพาหะเดินทางในโครงสร้างแบบผลึกเดี่ยว (single crystalline)

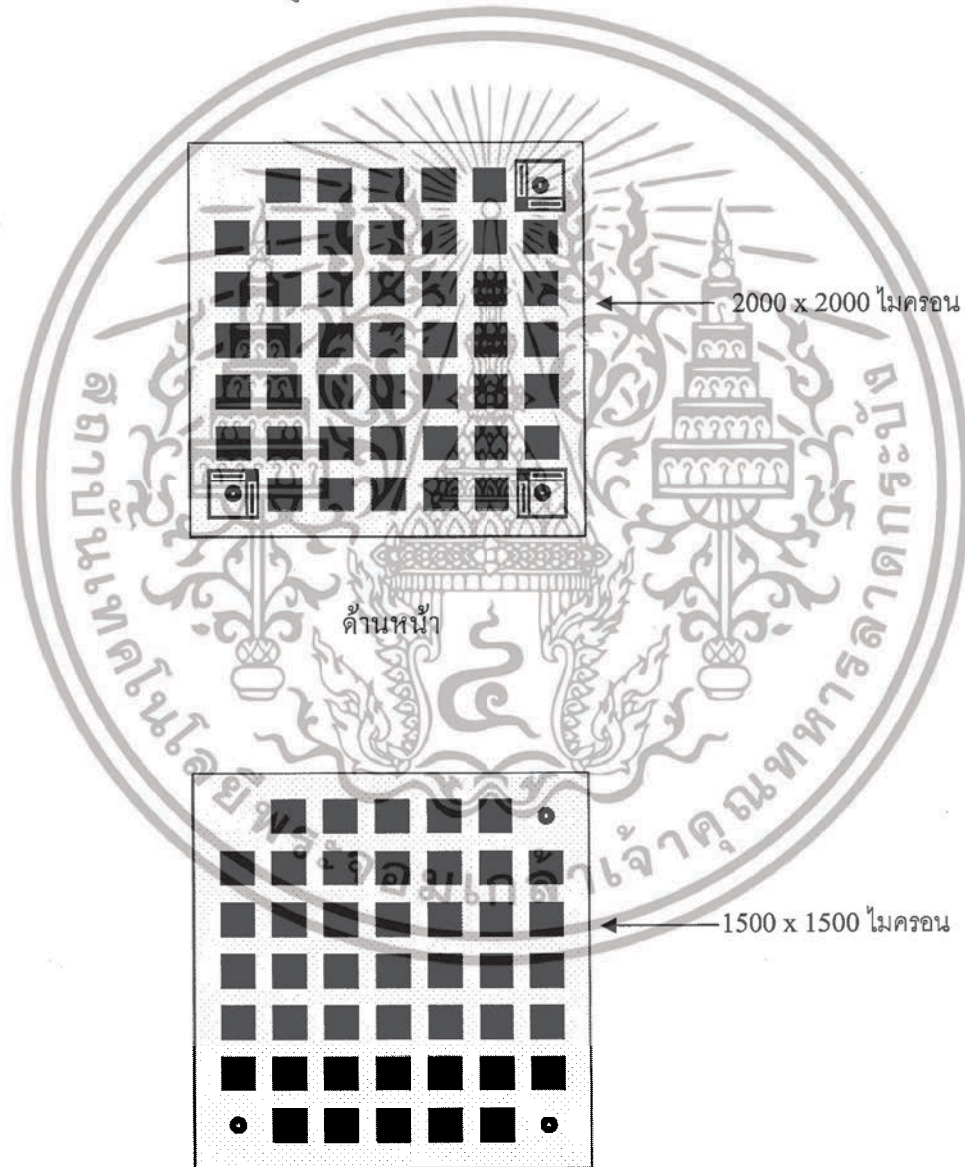
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาร์คที่ใช้ในการสร้างชอตต์กีโฟโตไดโอดฟิล์มเพชร

ในการทดลองเราใช้มาร์คในการสร้างทั้งหมด 2 มาร์ค ประกอบด้วยมาร์คไดอะแฟรม และ มาร์คข้าวโลหะ

1.พื้นที่เพชร

การทดลองเราออกแบบชิปไซต์ให้มีขนาด 3000x3000 ไมครอน ฟิล์มเพชรให้มีพื้นที่ 2000 x 2000 ไมครอน ดังนั้นในการออกไดอะแฟรมจึงต้องออกแบบขนาดความกว้างและยาว ($W_x \times W_y$) ให้มีขนาด 1500x1500 ไมครอน และมีพื้นที่แอคทีฟแอเรีย 1000x1000 ไมครอนตามรายละเอียดวิธีการออกแบบไดอะแฟรมแสดงในหัวข้อต่อไป รูปที่ 3.5 แสดงไดอะแฟรม



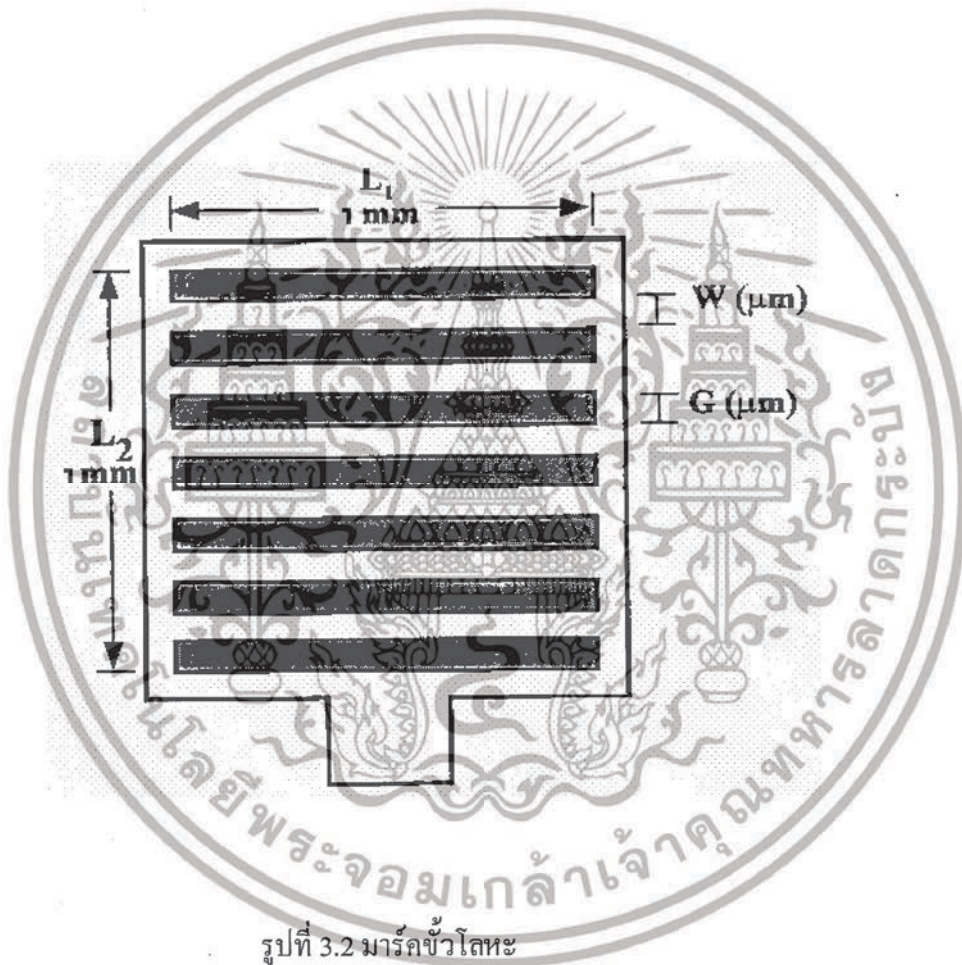
ด้านหลัง

รูปที่ 3.5 มาร์คไดอะแฟรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

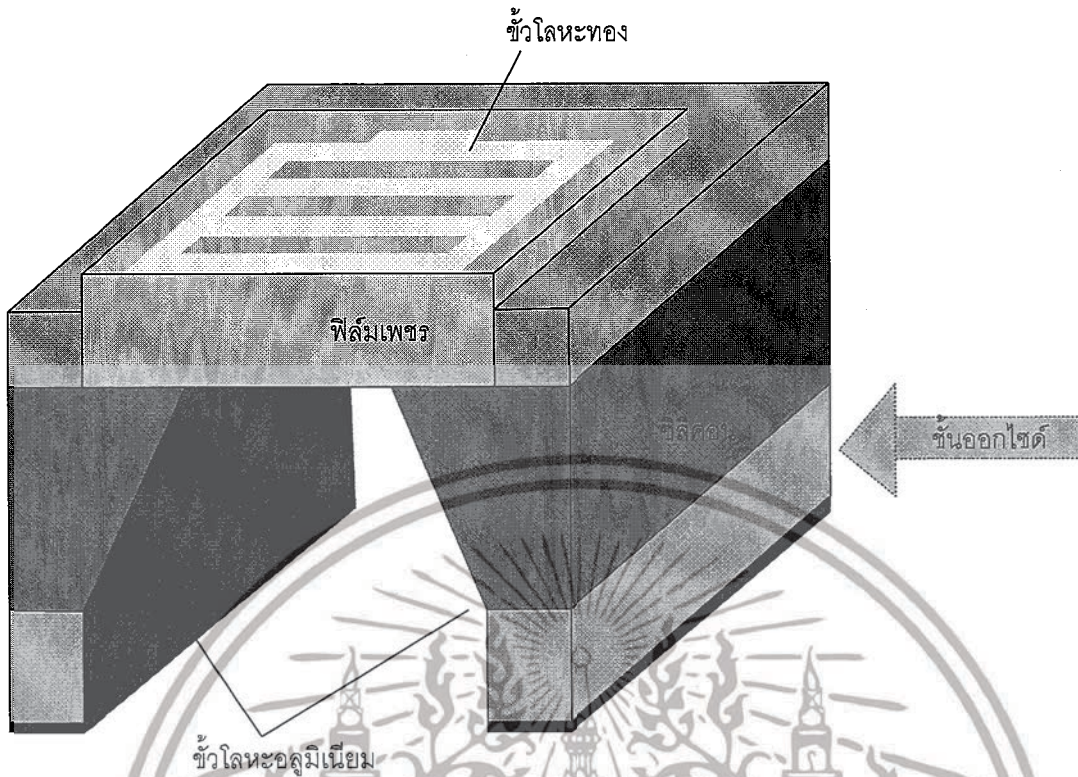
2. มาร์คขั้วโลหะ

การทดลองเราออกแบบมาร์คขั้วโลหะให้มีระยะห่างระหว่างขั้วโลหะด้านบน (G) และมีขนาดของขั้วโลหะ (W) ในการทดลองเราออกแบบให้ขอตักที่ไดโอดฟิล์มเพชรมีพื้นที่ขั้วไฟฟ้า ($L_1 \times L_2$) 3×3 มิลลิเมตร รูปที่ 3.2 แสดงมาร์คการสร้างอุปกรณ์ขอตักโฟโตไดโอดฟิล์มเพชรและรูปที่ 3.3 แสดงภาพจำลองโครงสร้างอุปกรณ์ขอตักโฟโตไดโอดฟิล์มเพชร เงื่อนไขของการสร้างมาร์คคือ W/G มีทั้งหมด 9 เงื่อนไข คือ 80/80, 80/100, 80/120, 100/80, 100/100, 100/120, 120/80, 120/100, 120/120



รูปที่ 3.2 มาร์คขั้วโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ภาพจำลอง โครงสร้างอุปกรณ์ขี้อัดที่โฟโตไดโอดฟิล์มเพชร

3.2 การออกแบบไดอะแฟรม

โครงสร้างของอุปกรณ์ขี้อัดที่โฟโตไดโอดฟิล์มเพชรประกอบด้วยไดอะแฟรมบางของฟิล์มเพชรเป็นส่วนสำคัญ ด้วยเหตุนี้การกัดซิลิโคนบางส่วนออกเพื่อให้เหลือเป็นไดอะแฟรมของฟิล์มเพชรจึงเป็นขั้นตอนสำคัญในการสร้างอุปกรณ์ ไดอะแฟรมของฟิล์มเพชรเกิดจากการกัดฐานรองซิลิโคนระนาบ (100) ออกโดยสารละลายที่มีลักษณะการกัดเป็นแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic) คือการกัดที่ตัวกัด (etchant) ซึ่งอยู่ในรูปของสารละลายจะกัดเนื้อสารในทิศทางหรือระนาบต่างๆ ของผลึกไม่เท่ากัน ดังแสดงในรูป 3.4

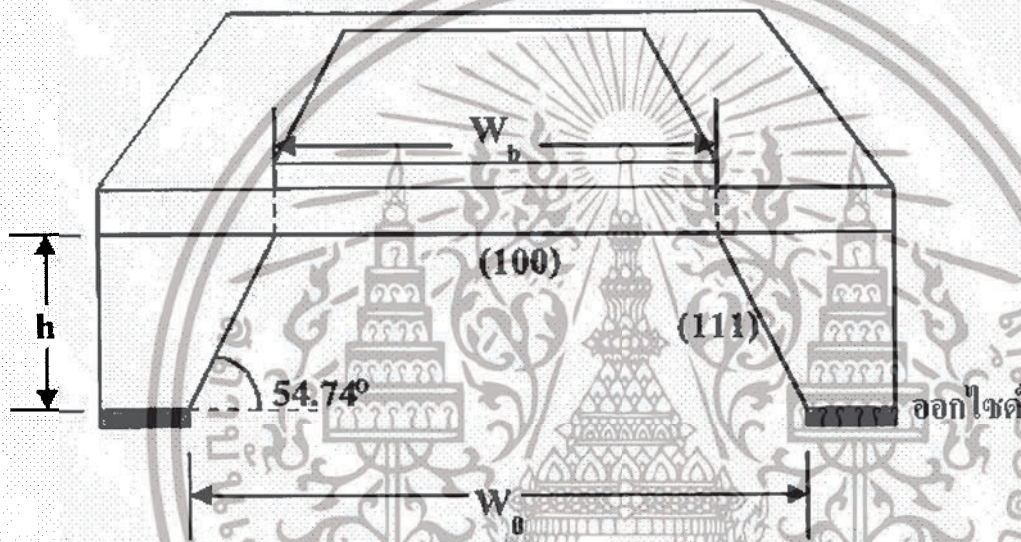
ดังนั้นการออกแบบปากหลุมจึงมีความสัมพันธ์กับความกว้างของก้นหลุม ถ้าเปิดปากหลุมกว้างเท่ากับ W_0 และทำการกัดได้ลึกเท่ากับ h จะได้ขนาดความกว้างก้นหลุม W_b ดังสมการ

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 3.4 ภาพตัดขวางแสดงลักษณะการกัดแบบแอนไอโซโทรปิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ขั้นตอนกระบวนการสร้าง

3.3.1 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

ฟิล์มเพชรถูกสังเคราะห์บนฐานรองซิลิคอนด้วยวิธีการ CVD แบบลดความร้อนที่ความดันต่ำ รูปที่ 3.5 แสดงภาพถ่ายเครื่องสร้างฟิล์มเพชร ฟิล์มเพชรสร้างบนฐานรองซิลิคอนโดยใช้แหล่งจ่ายเป็นไฮดรอกซีของเอทิลแอลกอฮอล์ (C_2H_5OH) สำหรับฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกและผสมด้วยสารละลายโบรอนไตรออกไซด์ (B_2O_3) สำหรับสร้างฟิล์มเพชรชนิดเอ็กทรีนซิก



รูปที่ 3.6 ภาพถ่ายเครื่องสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 ขอตต์กีโฟโตไดโอดฟิล์มเพชร

ขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบขอตต์กีไดโอดฟิล์มเพชร

3.3.2.1 แผ่นซิลิกอนเริ่มต้น นำแผ่นซิลิกอนหนา 100 ตัดให้ได้ขนาดกว้าง 2.3 เซนติเมตรและยาว 2.3 เซนติเมตร และทำความสะอาดพื้นผิวด้วย จากนั้นสร้างชั้นออกไซด์แบบ DRY หนาประมาณ 2,000 อังสตรอมที่ความร้อน 1000 °C เพื่อเป็นชั้นป้องกันการกัดด้วยสารเคมีในขั้นตอนการสร้างไดอะเฟรม



รูปที่ 3.8 แสดงการสร้างชั้นออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2.2 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชร แผ่นซิลิคอนที่สร้างชั้นออกไซด์ถูกนำมาลอกชั้นออกไซด์ ด้านหน้าซิลิคอนที่ผิวขัดมันออกจากรันขัดผิวหน้าด้วยครีมเพชรขนาด 0.25 ไมครอน แล้วจะนำแผ่นซิลิคอนมาสร้างซิลิคอนไนไตรต์และทำมาร์คปิดเพื่อป้องกันส่วนที่ขัดเป็นรอย ทำแบบนี้ทั้งข้างบนและข้างล่าง จากนั้นสร้างออกไซด์แบบ DRY 5 ชั่วโมงและ WET 20 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการกัดไนไตรต์ออก แล้วนำไปสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเครื่อง CVD แบบลดความร้อนให้ได้ความหนาฟิล์มเพชร 8 ไมครอน ใช้เวลา 8 ชั่วโมง



รูปที่ 3.9 แสดงการลอกชั้นออกไซด์ด้านหน้าออก



รูปที่ 3.10 แสดงการสร้างชั้นไนไตรต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 แสดงการสร้างชั้นในไทรด์และปิดมาร์คด้านบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 แสดงการสร้างชั้นไนไตรด์และปิดมาร์คด้านล่าง



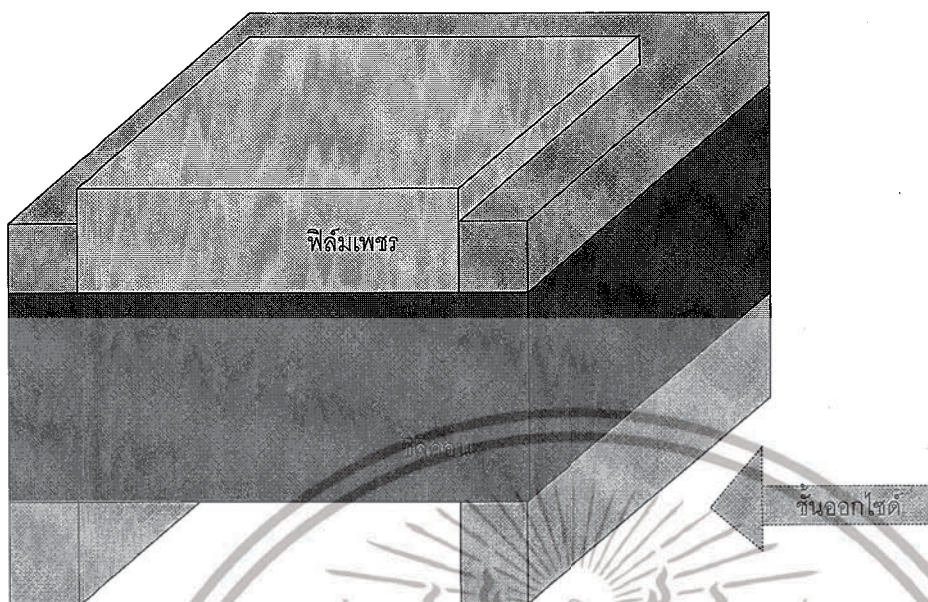
รูปที่ 3.13 แสดงการสร้างชั้นออกไซด์เพิ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 แสดงการสร้างฟิล์มเนกาทีฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 แสดงการกัดออกไซด์ด้านล่างออก

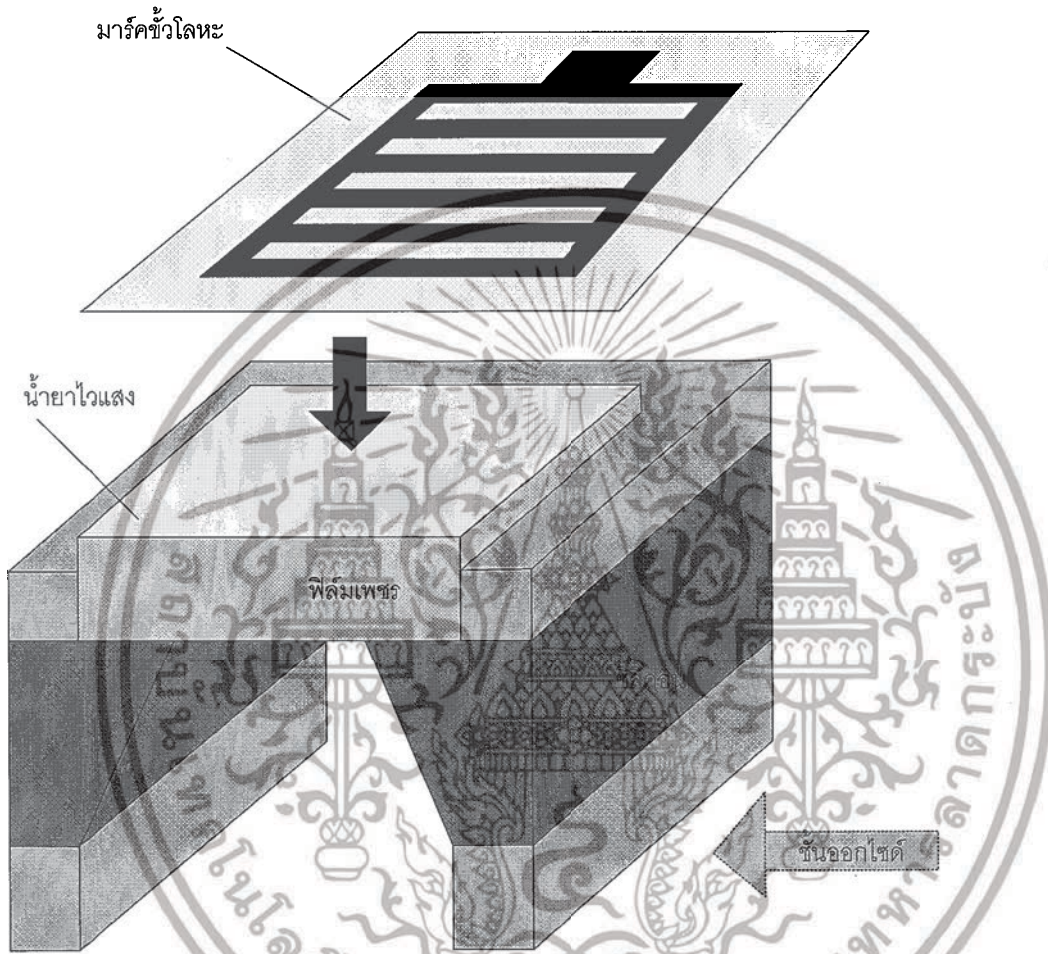
3.3.2.3 การกัดไดอะแฟรม นำฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้มากัด ไดอะแฟรมตามที่ยกแบบไว้ ด้วยสารละลาย EPD โดยมีชั้นออกไซด์เป็นตัวป้องกันส่วนที่ไม่ต้องการให้เกิดปฏิกิริยาการกัด



รูปที่ 3.17 แสดงการกัดซิลิโคนออกเหลือแต่ไดอะแฟรมฟิล์มเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2.4 การเคลือบโลหะทองคำ นำฟิล์มเพชรที่สร้างได้จากข้อ 3.3.2.4 มาสร้างขั้วไฟฟ้าทองคำด้วยเครื่องเคลือบโลหะในสุญญากาศ โดยอาศัยเทคนิคโฟโตลิโทกราฟีใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ เป็นตัวป้องกันเพื่อให้ได้ลวดลายตามที่ได้ออกแบบไว้



รูปที่ 3.18 แสดงเทคนิคลิโทกราฟี

3.3.2.5 การลอกชั้นน้ำยาไวแสง นำฟิล์มเพชรที่เคลือบโลหะทองแล้ว มาลอกชั้นน้ำยาไวแสง AZ ออกด้วยวิธีลิฟออฟโดยใช้สารเคมีอะซิโตนเป็นตัวทำปฏิกิริยาซึ่งจะได้ขั้วโลหะทองเป็นลวดลายตามที่ต้องการ จากนั้นนำไปซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1 ลิตรต่ออนาที เป็นเวลา 10 นาที

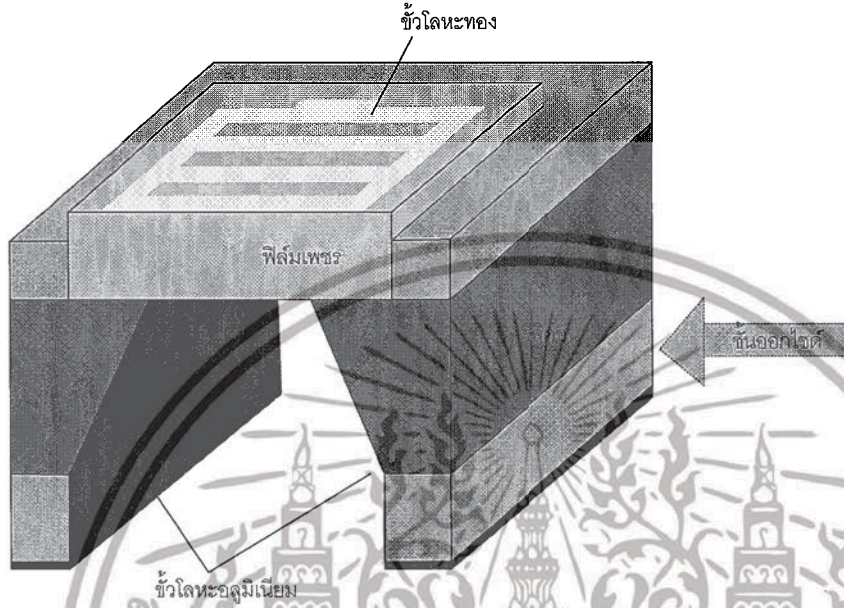
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 แสดงการการลอกชั้นน้ำยาไวแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

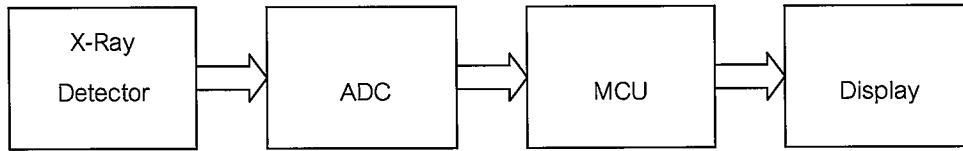
3.3.2.6 การเคลือบโลหะอลูมิเนียม นำฟิล์มเพชรที่กัดเป็นไดอะแฟรมเรียบร้อยแล้วมาสร้างรอยต่อขอตักที่บริเวณด้านล่าง โดยใช้วิธีการเคลือบโลหะอลูมิเนียมในสุญญากาศ จากนั้นนำไปขึ้นเตอร์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1 ลิตร ต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที



รูปที่ 3.20 แสดงภาพจำลองขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์ขอตักโฟโตไดโอดโอดฟิล์มเพชร

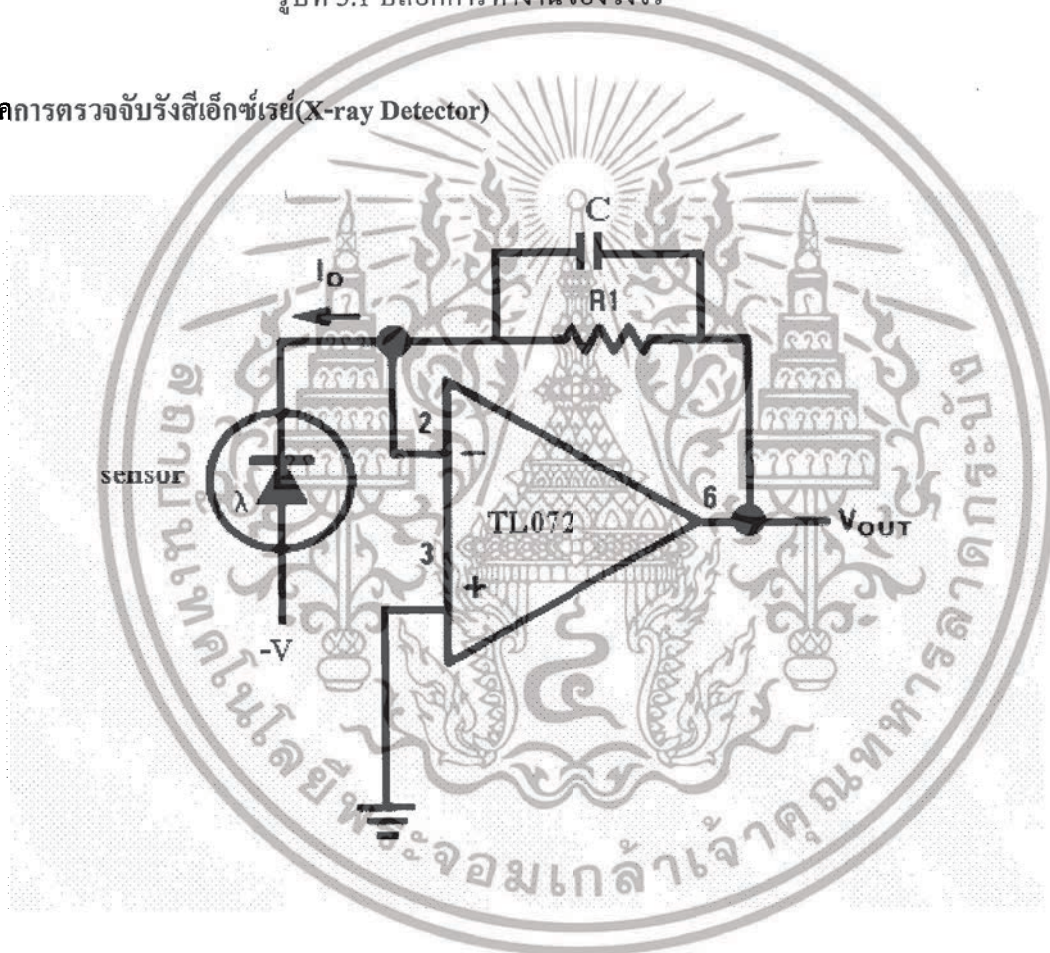
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การออกแบบและการสร้างวงจร



รูปที่ 3.1 บล็อกการทำงานของวงจร

3.4.1 ภาควิชาการตรวจจับสนักเอกซเรย์ (X-ray Detector)



รูปที่ 3.2 วงจรขยายของภาคดีเทคเตอร์

ในการวัดปริมาณแสงเอกซเรย์จะใช้เซนเซอร์ที่มีลักษณะการทำงานคล้าย photodiode โดยมีหลักการทำงานคือมีแสงตกกระทบ P-N junction ก็จะทำให้ reverse leakage current ของ junction นั้นเพิ่มขึ้น โดยมีความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้นกับปริมาณแสงเอกซเรย์ การใช้งานของเซนเซอร์ตรวจวัดรังสีเอกซเรย์จะทำได้โดยใช้งานอย่างง่ายคือ วงจรนี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนค่ากระแสรั่วไหลของตัวมันเอง ซึ่งมีค่าน้อยๆให้เป็นแรงดันที่เปลี่ยนแปลงตามกระแสรั่วไหล จะมีค่ากระแสรั่วไหลเปลี่ยนแปลงในระดับไม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครแอมป์ ก็จะทำให้ได้แรงดันที่เอาต์พุตเปลี่ยนแปลง ซึ่งในวงจรนี้จะใช้ออปแอมป์เบอร์ TL072 ในการขยายสัญญาณที่เป็นแรงดันเอาต์พุต

การคำนวณค่าแรงดันเอาต์พุต V_o โดยกำหนดค่า $R_1 = 100K\Omega$ เมื่อแสงตกกระทบโฟโตไดโอดและมีกระแสไหลเท่ากับ $1\mu A$ และ $50\mu A$ จะคำนวณได้จากสูตร

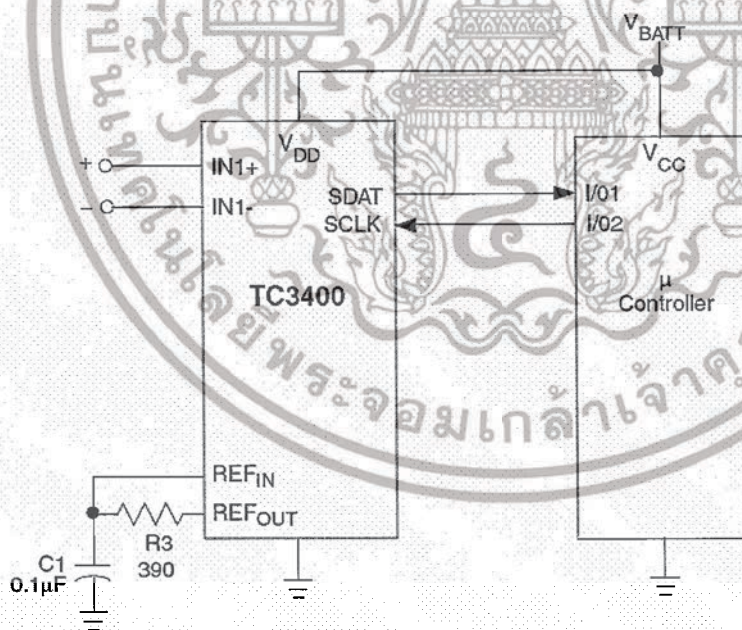
$$V_o = R_1 * I_D$$

ที่ $I_D = 1\mu A$ ได้ $V_o = (100K\Omega)(1\mu A) = 0.1 V$

ที่ $I_D = 50\mu A$ ได้ $V_o = (100K\Omega)(50\mu A) = 5 V$

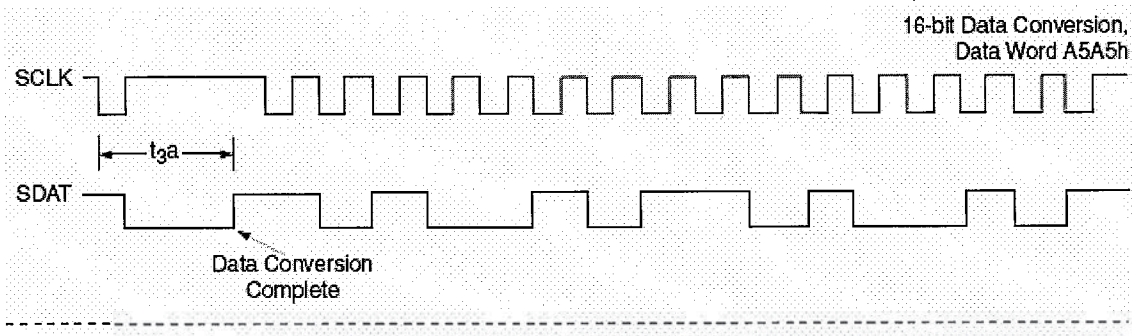
3.4.2 ภาคการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล (Analog to Digital)

ในการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลจะใช้ไอซีเบอร์ TC3400 ซึ่งเป็นไอซีที่มีการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลขนาด 16 bit ติดต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านทางวิธีการสื่อสารแบบ protocol โดยการสื่อสารแบบนี้จะใช้ Timing Diagram เป็นตัวอ้างอิงในการเชื่อมต่อสื่อสาร ข้อมูลระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับ TC 3400 จะติดต่อโดยใช้บัสสองสายดังรูป



รูปที่ 3.3 แสดงการต่อวงจร ADC ภายนอกกับไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



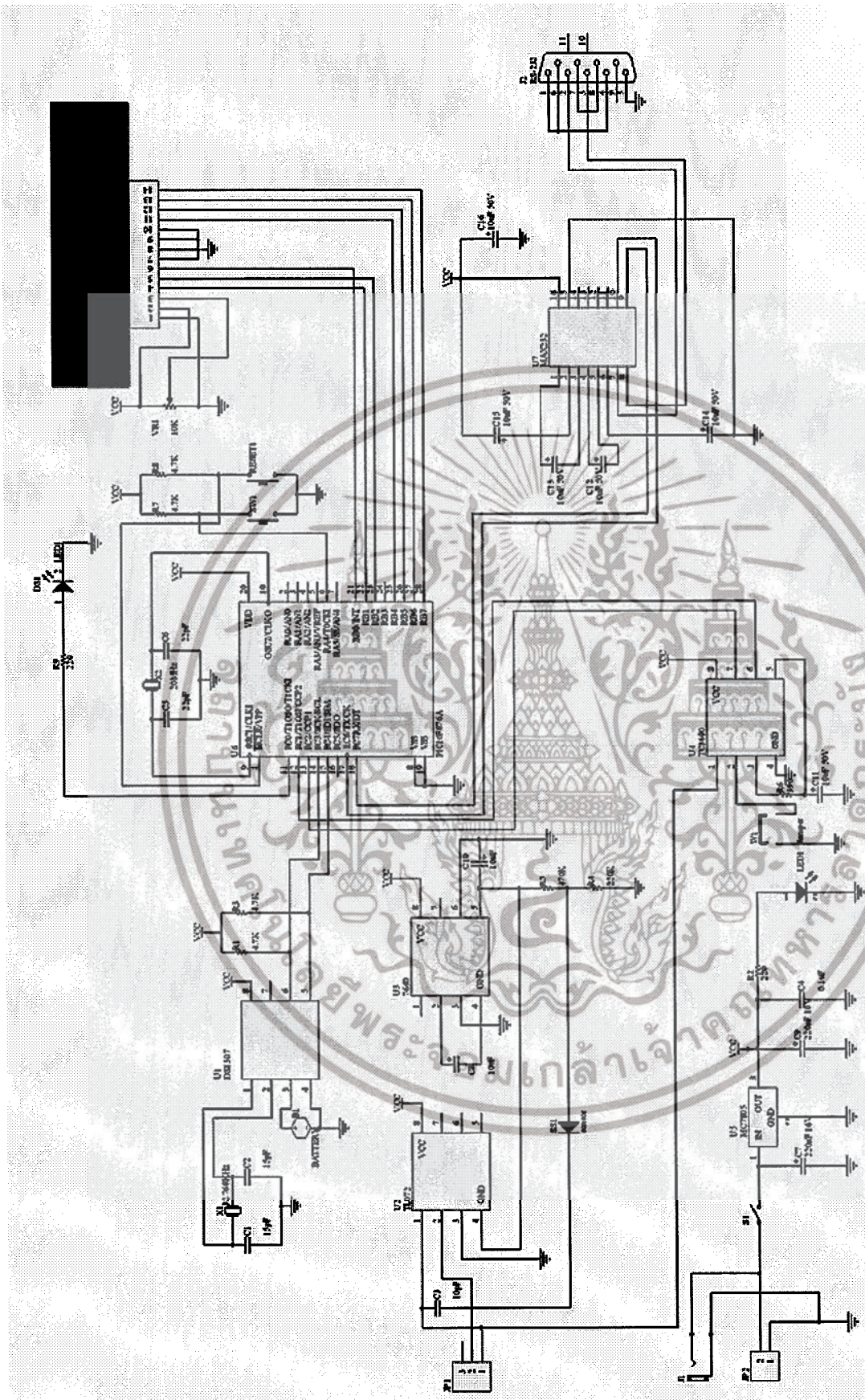
รูปที่ 3.4 Timming Diagram ของวงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิทัล (Analog to Digital)

3.4.3 ภาคประมวลผล

ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 16F876A จะมีวงจรแปลงอะนาลอกเป็นดิจิทัลขนาด 10 บิต ทำให้การประมวลผลและแสดงผลข้อมูลอาจจะไม่ละเอียดมากพอ ดังนั้นเราจึงใช้วงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิทัลจากภายนอก(External ADC) ที่มีความละเอียดถึง 16 บิต ทำให้ค่าที่ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถประมวลผลได้มีความละเอียดมาก

การทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ร่วมกับ External ADC คือการส่งสัญญาณนาฬิกาออกไปเพื่อกำหนดจังหวะการทำงาน และจะรับค่าจาก ADC มาทีละบิตคูณกับค่าประจำหลักของบิตนั้นๆ แล้วนำผลของค่าแต่ละบิตมารวมกันอีกที และเพื่อให้เกิดความแม่นยำได้กำหนดโปรแกรมให้ไมโครคอนโทรลเลอร์วนลูปรับค่ามาทั้งหมด 10 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย แล้วนำไปแสดงผลออกทางหน้าจอ LCD

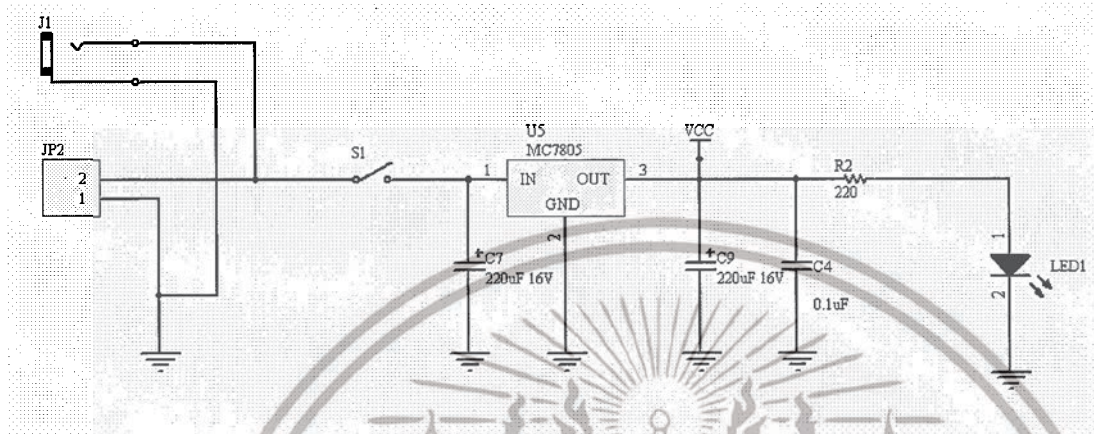
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 วงจรภาคประมวลผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.4 ภาคจ่ายไฟ



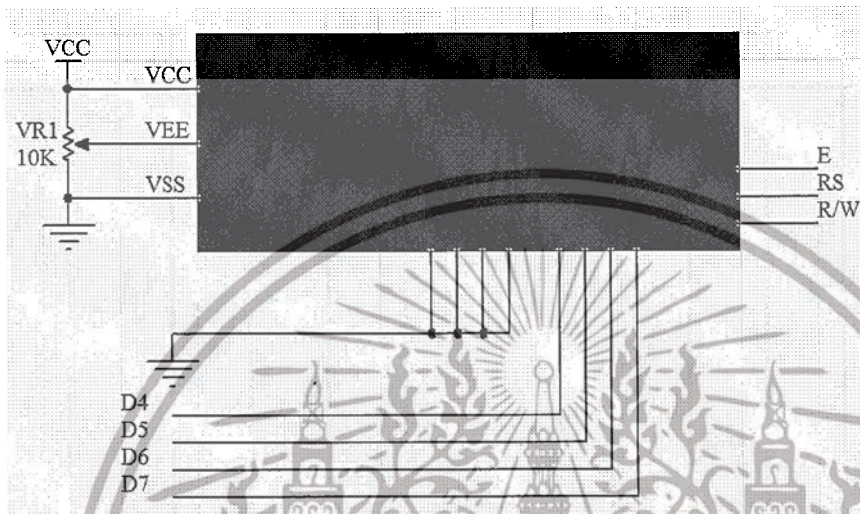
รูปที่ 3.6 วงจรภาคจ่ายไฟ

ไมโครคอนโทรลเลอร์และวงจรอื่นๆจะสามารถทำงานได้ เมื่อเราทำการป้อนไฟ 5 Vdc จาก วงจรภาคจ่ายไฟจะใช้ไฟ 9 Vdc หรือ 9 Vac จาก Adapter ก็ได้ป้อนผ่าน ไอซีเรกูเลท MC7805 จะทำ หน้าที่รักษาระดับแรงดันให้คงที่เป็นแรงดัน 5 Vdc เพื่อที่จะจ่ายแรงดันให้กับวงจรภาคต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.5 ภาคการแสดงผล

หน่วยแสดงผลโมดูล LCD(Liquid Crystal Display module) หรือหน่วยแสดงผลแบบผลึกเหลวโดยโมดูล LCD จะมีอยู่สองชนิดด้วยกัน คือ แบบตัวอักษร และแบบกราฟิก โครงสร้างพื้นฐานของโมดูล LCD แบบตัวอักษรแสดงดังรูป



รูปที่ 3.7 แสดงตำแหน่งขาของ LCD

รายละเอียดขาสัญญาณของ โมดูล LCD มีดังนี้

ขาที่ 1 GND สำหรับต่อขากราวด์ของวงจร

ขาที่ 2 VCC ต่อกับไฟเลี้ยง +5V

ขาที่ 3 V0 สำหรับต่อปรับความสว่างของหน้าจอ

ขาที่ 4 RS ขาเลือกการติดต่อกับรีจิสเตอร์คำสั่งหรือข้อมูล โดย 0 จะติดต่อกำสั่ง และ 1 จะติดต่อกับข้อมูล

ขาที่ 5 RW

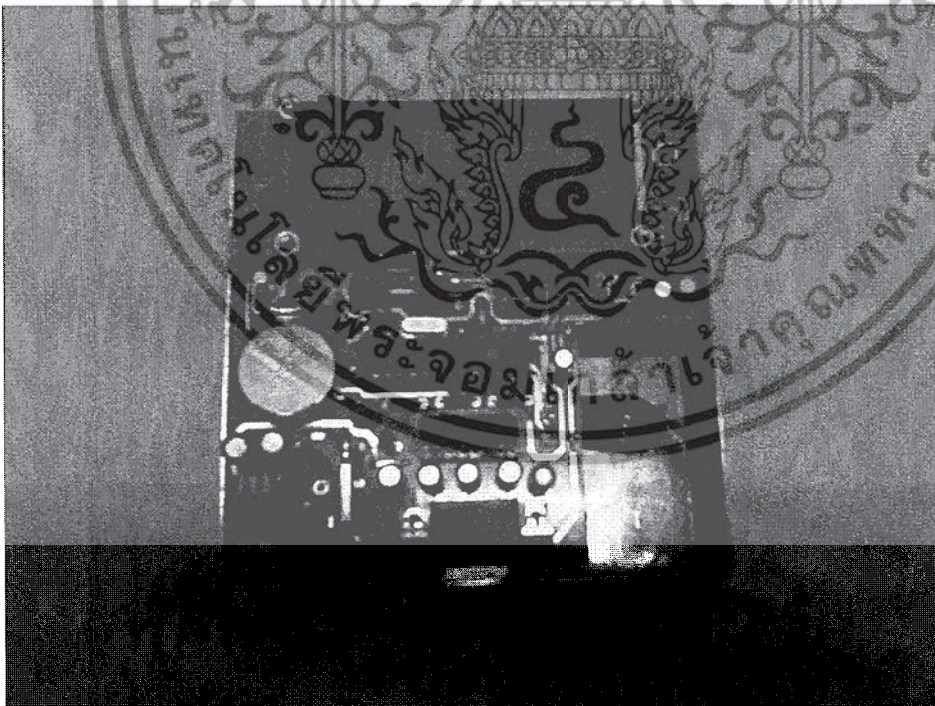
ขาที่ 6 E ป้อนสัญญาณ Enable ให้โมดูล LCD เริ่มทำงาน

ขาที่ 7-14 เป็นขาข้อมูล DATA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 วงจรประมวลผลและแสดงผลในการทดลอง



รูปที่ 3.9 วงจรประมวลผลและแสดงผลที่เสร็จสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 วงจรประมวลผลและแสดงผลที่ประกอบสกล่องเสร็จสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้

นำฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้มาศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มที่สร้างได้โดยแบ่งออกเป็นการศึกษา ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรด้วยเครื่องSEMและการวิเคราะห์เพชรด้วยรามานสเปกโทรสโคปี โดยมี รายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วย SEM

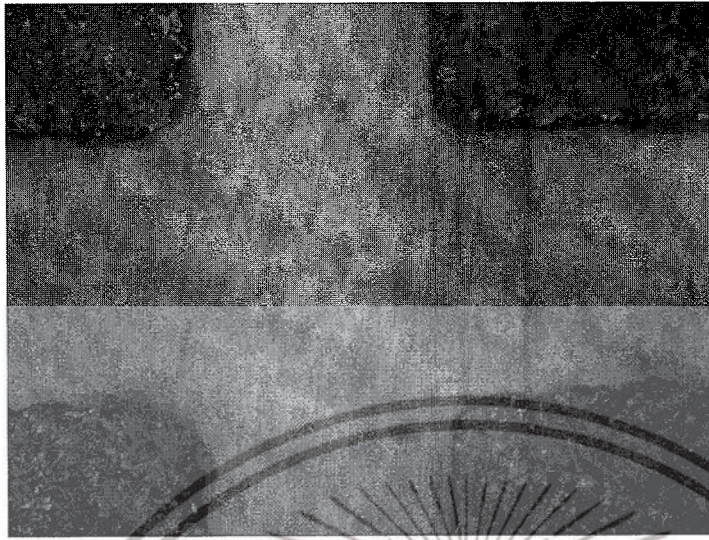
ฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการCVDถูกนำมาถ่ายภาพด้วยเครื่องSEM เพื่อศึกษา ลักษณะพื้นผิว ภาพถ่ายจากเครื่อง SEM ของฟิล์มเพชรทั้งชนิดอินทรีนซิกแสดงในรูปที่ 4.4 จากภาพถ่าย SEM ฟิล์มเพชรที่มีลักษณะ โครงสร้างผลึกเป็นแบบระนาบ (111) และลักษณะ โครงสร้างฟิล์มเพชรจะ เหมือนกันทั้งชนิด อินทรีนซิกและชนิดที่เติมอะตอมสารเจือ โบรมอนซึ่งแสดงว่าการผสมโบรมอน ไตร ออกไซด์(B_2O_3)กับเอทิลแอลกอฮอล์

สอดคล้องไม่มีผลรบกวนต่อการก่อผลึกของเพชร ทั้งนี้จึงได้ฟิล์มเพชรชนิดเอกซ์ทรีนซิกที่มีลักษณะ ภายนอกเหมือนกับชนิดอินทรีนซิกทุกประการเพียงแต่มีคุณสมบัติทาง ไฟฟ้าเป็นฟิล์มเพชรชนิดพี เท่านั้น นอกจากนี้ภาพถ่ายตัดขวางของฟิล์มเพชรซึ่งแสดงในรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นลักษณะ โครงสร้าง ของฟิล์มเพชรที่เป็นแบบ โพลีคริสตัลไลน์ ซึ่งประกอบไปด้วยผลึกหลายๆผลึกเรียงต่อกันและมีเส้น พรหมแดนของผลึก (grain boundary) จำนวนมาก



รูปที่ 4.1 แสดงชัดด้วยคริมเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แสดงชั้นออกไซด์ที่กั้นระหว่างฟิล์มเพชร



รูปที่ 4.3 แสดงการสร้างออกไซด์ที่ไม่สมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงการสร้างฟิล์มเพชรที่ไม่สมบูรณ์



รูปที่ 4.5 แสดงฟิล์มเพชรด้านหน้าที่สมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

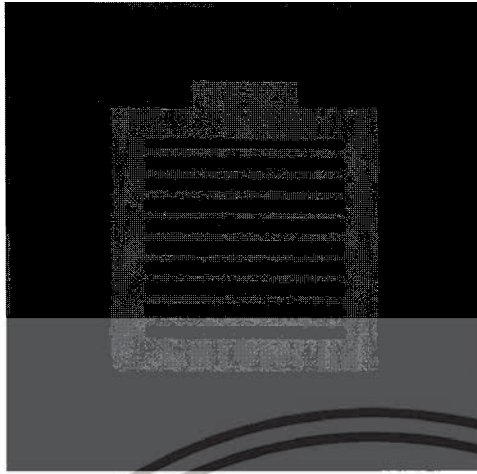


รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายไดอะแฟรมฟิล์มเพชรที่เกิดจากการกระตุ้นรองชนิดไอออนด้วยสารละลาย EPD



รูปที่ 4.7 อุปกรณ์ชุดตกั๊กโฟโตไดโอดฟิล์มเพชรสร้างบนฟิล์มเพชรขนาด $2.3 \times 2.3 \text{ cm}^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายอุปกรณ์ขอตักกีโฟโตโคโอดฟิล์มเพชรที่สร้างได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการประยุกต์ใช้งาน

4.2.1 ใช้วัดรังสี UV

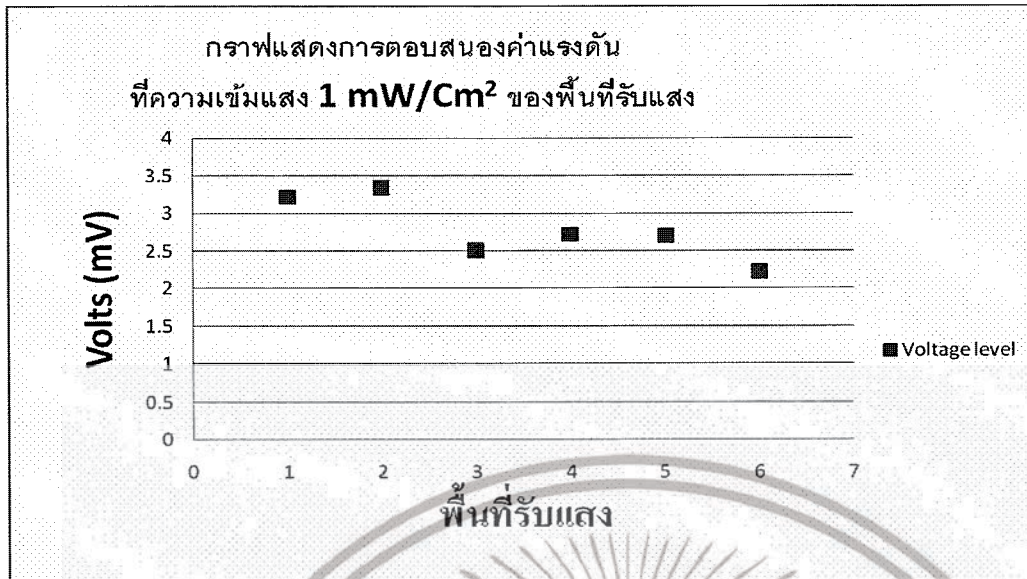
ทดสอบเซนเซอร์ก่อนที่จะนำเซนเซอร์ไปใช้งาน โดยการป้อนแรงดันไบอัสเซนเซอร์ในขณะที่ไม่มีแสงตกกระทบบนตัวเซนเซอร์แล้วทำการวัดกระแส (I_{DARK}) เทียบกับแรงดันที่ไบอัส ซึ่งจะความสัมพันธ์ตามรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันขณะไม่มีแสงตกกระทบบน

ก่อนที่จะนำ Sensor ไปประยุกต์ใช้งานเราจะต้องทำการเลือกตัว Sensor ดีที่สุดมาทำการใช้งาน โดยทำการใช้การเปรียบเทียบการตอบสนองค่าแรงดันที่ความเข้มแสง $1 \text{ mW}/\text{Cm}^2$ ซึ่ง Sensor แต่ละตัวเงื่อนไขการสร้าง W/G : 60/120,60/100,60/80,80/120 ,80/100,80/80 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการตอบสนองค่าแรงดันที่ความเข้มแสง 1 mW/Cm^2 ของพื้นที่รับแสง

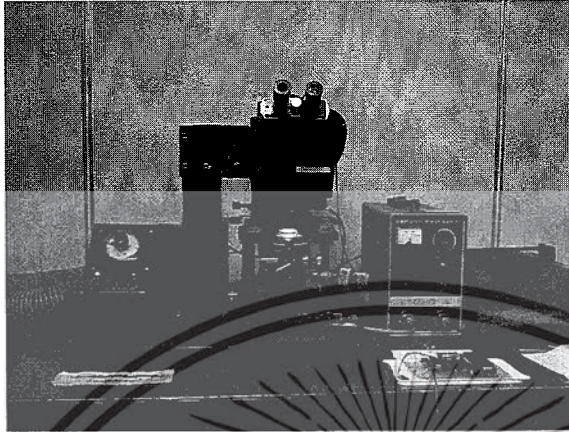


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงการตอบสนองค่ากระแสที่ความเข้มแสง 1 mW/Cm^2 ของพื้นที่รับแสง

จะเห็นว่าผลการตอบสนองค่าแรงดันที่ความเข้มแสง 1 mW/Cm^2 ของ Sensor แต่ละตัว จากรูปที่ 4.10 พื้นที่รับแสงตัวที่ 2 จะมีผลการตอบสนองดีกว่าตัวอื่นโดยมีเงื่อนไขการสร้าง W/G คือ 80/100 ส่วนรูปที่ 4.11 แสดงการตอบสนองค่ากระแสที่ความเข้มแสง 1 mW/Cm^2 ของ Sensor แต่ละตัว โดยที่ค่ากระแสจะได้จากค่าแรงดันจากจากรูปที่ 4.10 หารด้วยค่าความต้านทาน $1.08 \text{ M}\Omega$ ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมกับระดับแรงดันที่ได้จากจากรูปที่ 4.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ผลการนำเซนเซอร์ตรวจจับรังสีเอ็กซ์เรย์ชนิดฟิล์มเพชรมาใช้งานกับเครื่อง Mask Aliment ซึ่งแสงที่ได้จากเครื่อง Mask Aliment จะเป็นรังสี UV โดยทำการทดลองในห้องโฟโตลิโธกราฟี



รูปที่ 4.12 เครื่อง Mask Aliment

เครื่อง Mask Aliment จะให้ค่าความเข้มของแสง UV ในแต่ละ Step ไม่เท่ากัน ซึ่งความเข้มแสงที่ได้ในแต่ละ Step จะมีหน่วยเป็น W/Cm^2 ทำการเปรียบเทียบหน่วยการวัดที่ได้กับค่าแต่ละ Step โดยใช้เครื่อง UNI METER ซึ่งเป็นเครื่องวัดความเข้มของรังสี UV

Step 1 มีค่าความเข้มของ UV เท่ากับ $0.810 W/Cm^2$

Step 2 มีค่าความเข้มของ UV เท่ากับ $0.860 W/Cm^2$

Step 3 มีค่าความเข้มของ UV เท่ากับ $0.900 W/Cm^2$

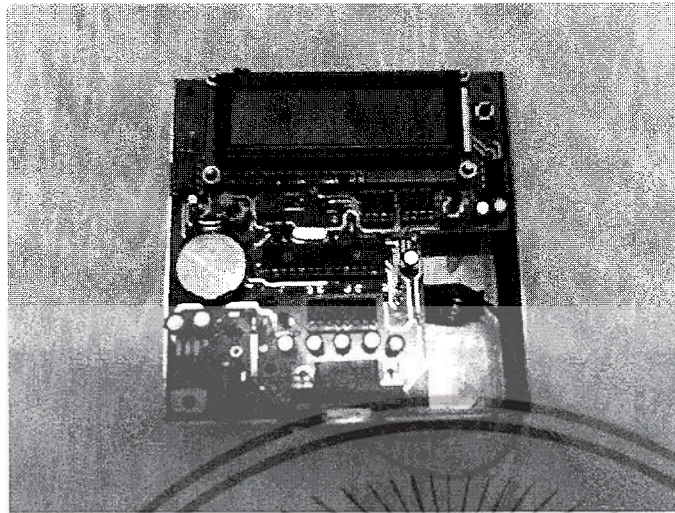
Step 4 มีค่าความเข้มของ UV เท่ากับ $0.970 W/Cm^2$

Step 5 มีค่าความเข้มของ UV เท่ากับ $1.030 W/Cm^2$



รูปที่ 4.13 เครื่อง UNI METER

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 เครื่องวัดที่สร้างขึ้น

เครื่องวัดที่ได้สร้างขึ้นนั้นจะทำการเปรียบเทียบกับเครื่องวัดมาตรฐาน UNI METER โดยจะใช้เครื่องมาตรฐานวัดค่าความเข้มของรังสี UV ในค่าต่างๆแล้วบันทึกค่าไว้และในขณะเดียวกันก็ใช้เครื่องที่สร้างขึ้นวัดค่าความเข้มรังสี UV ในค่าต่างๆเช่นกัน โดยวัดออกมาในรูปแบบแรงดันไฟฟ้า

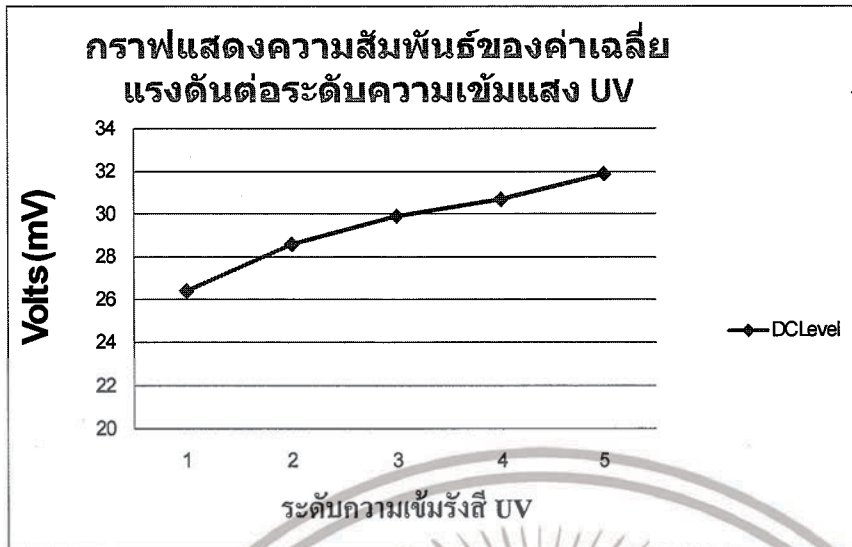
การทดลองโดยใช้เครื่องวัดที่เราออกแบบได้จะได้ค่าแต่ละ Step ของเครื่อง Mask Aliment เป็นระดับแรงดันซึ่งผลการวัดจะได้ค่าตามตารางที่ 1

Step	ครั้งที่ 1 (mV)	ครั้งที่ 2 (mV)	ครั้งที่ 3 (mV)	ค่าเฉลี่ย (mV)
1	27.4	25.6	26.3	26.4
2	29.1	28.8	28.1	28.6
3	30.5	29.1	30.2	29.9
4	31.2	30.2	30.7	30.7
5	33	31.6	31.2	31.9

ตารางที่ 4.1 แสดงการวัดค่าแรงดันเทียบกับค่าความเข้ม UV

การวัดแต่ละครั้งจะให้ค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นจะต้องนำค่าของการวัดแต่ละครั้งมาเฉลี่ยเพื่อที่จะนำค่าเฉลี่ยนี้ไปเปรียบเทียบกับเครื่องวัดมาตรฐาน นำค่าเฉลี่ยจากการทดลองในตารางที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



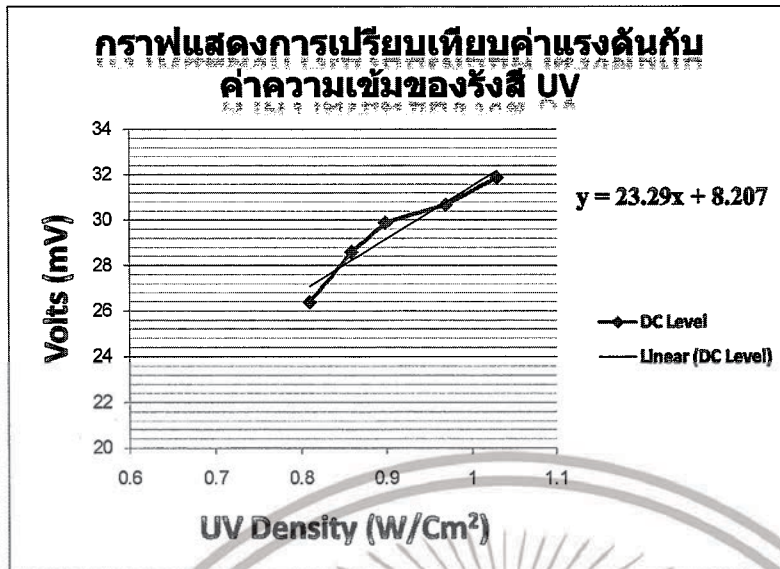
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ยแรงดันต่อความเข้มรังสี UV ระดับต่างๆ ผลของการวัดค่าความเข้มรังสี UV ในแต่ละ step และแสดงออกมาในรูปของแรงดันเฉลี่ย



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดันกับค่าความเข้มของรังสี UV

การนำค่าแรงดันเฉลี่ยในแต่ละ step ของการวัดมาเปรียบเทียบกับค่าความเข้มของรังสี UV เพื่อให้ได้กราฟความสัมพันธ์ในการนำไปเขียนโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



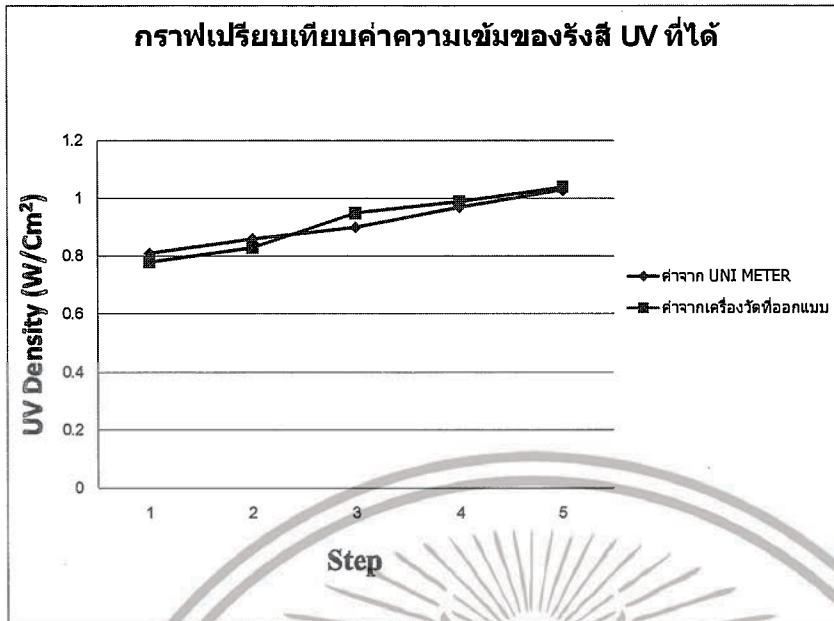
รูปที่ 4.17 แสดงการหาค่าสมการเชิงเส้น โดยประมาณจากกราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดันกับค่าความเข้มของรังสี UV

เมื่อนำสมการประมาณค่าสมการแบบเชิงเส้น สามารถนำมาใช้ในเขียน โปรแกรมแล้ว โปรแกรมลงไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อแสดงค่าที่ได้ผ่านจอ LCD ซึ่งจะได้อ่านค่าความเข้มรังสี UV จากเครื่องวัดที่สร้างขึ้น

Step	ความเข้มรังสี UV จาก UNI METER (W/Cm ²)	ความเข้มรังสี UV จากเครื่องวัดที่สร้างขึ้น (W/Cm ²)	% ค่าผิดพลาด (%)
1	0.81	0.78	3.7
2	0.86	0.83	4.05
3	0.9	0.95	5.55
4	0.97	0.99	2.06
5	1.03	1.04	0.97

ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเข้มรังสี UV จากเครื่องวัดที่สร้างขึ้นกับเครื่อง UNI METER

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 กราฟเปรียบเทียบค่าความเข้มของรังสี UV ที่ได้

เมื่อได้นำค่าของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสี UV กับแรงดันที่ได้จากเครื่องวัดที่ได้สร้างขึ้นมาทำการเขียนโปรแกรมโดยประมาณจะได้ค่าออกมาในการวัดแต่ละครั้งมีค่าความผิดพลาดเกิดขึ้นดังที่แสดงในตารางที่ 2 และรูปที่ 4.17 ซึ่งในการวัดแต่ละครั้งก็จะให้ค่าผิดพลาดที่ไม่เหมือนกัน ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับตำแหน่งการวางของเซนเซอร์ในการวัดแต่ละครั้ง และการวัดเทียบระหว่างเครื่องวัดมาตรฐานกับเครื่องวัดที่สร้างขึ้นนั้นช่วงระยะเวลาในการวัดอาจจะไม่เท่ากัน และในส่วนของเซนเซอร์จะมีผลของอุณหภูมิด้วย

4.2.1 ใช้วัดรังสีเอ็กซ์เรย์

เมื่อนำเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นไปใช้วัดรังสีเอ็กซ์เรย์จะพบปัญหาในการวัด ซึ่งจะมีสัญญาณรบกวนอย่างมากโดยเกิดจากเครื่องกำเนิดรังสีเอ็กซ์เรย์ ซึ่งจะมีแรงดันไฟสูงรบกวนและมีสัญญาณรบกวนจากเครื่องจ่ายไฟ ทำให้วงจรขยายทำงานได้ไม่คึกคัก และเมื่อเรานำเซนเซอร์ไปวัดรังสีเอ็กซ์เรย์โดยไม่ผ่านวงจรขยายจะพบว่าเซนเซอร์ไม่มีการตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์เรย์ อาจเป็นเพราะว่าพื้นที่ฟิล์มเพชรซึ่งเป็นบริเวณรับรังสีมีขนาดเล็กเกินไป ทำให้การตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์เรย์ค่อนข้างน้อยแต่จะตอบสนองต่อรังสี UV ได้ดีกว่ารังสีเอ็กซ์เรย์ ดังนั้นเราควรออกแบบพื้นที่ฟิล์มเพชรให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อให้สามารถตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์เรย์ได้ดีกว่าเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากกระบวนการสร้างอุปกรณ์การวัดรังสีเอ็กซ์เรย์ พบว่าในการสร้างเราจะต้องใช้ความสะอาดให้มากที่สุด จึงจะทำให้ในกระบวนการสร้างในทุกๆขั้นตอน มีความสมบูรณ์ตามที่เราได้ออกแบบไว้ ถ้าหากในกระบวนการสร้าง ขั้นตอนใดมีความสะอาดไม่เพียงพอ จะทำให้ชิ้นงานที่ได้มีความไม่สมบูรณ์เกิดขึ้น เช่น ในกระบวนการมาร์คเพื่อล้างไนไตรต์ออกนั้น ถ้าล้างไนไตรต์ออกไม่ดี ก็ยังมีไนไตรต์หลงเหลืออยู่ในส่วนที่เราจะสร้างออกไซด์เพิ่ม ถ้าเป็นเช่นนี้จะมีผลทำให้ในกระบวนการสร้างฟิล์มเพชร ช่วงรอยต่อระหว่างฟิล์มเพชรของตัวอุปกรณ์ที่เราไม่ต้องการให้มีฟิล์มเพชรเกิดขึ้นก็จะมีฟิล์มเพชรเกิดขึ้นดังรูปที่ 4.3 จะทำให้การสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดรังสีเอ็กซ์เรย์ชิ้นนั้นไม่สมบูรณ์ เพราะฉะนั้นเมื่อนำมาสร้างเป็น อุปกรณ์ที่ใช้งานจริง จะทำให้ไม่ได้คุณสมบัติตัววัดรังสีเอ็กซ์เรย์ ตามที่เราต้องการ จากกระบวนการสร้าง จึงพอสรุปได้ว่าในกระบวนการสร้าง จะต้องใช้ความละเอียด ความสะอาดของตัวชิ้นงาน และ ความสะอาดของตัวบุคคลที่เป็นผู้ลงมือปฏิบัติ จึงจะทำให้ อุปกรณ์ตรวจวัดรังสีเอ็กซ์เรย์ ที่สร้างออกมานั้น มีความสมบูรณ์ตามที่เรต้องการ

การนำ Sensor มาประยุกต์ใช้งานจะเห็นได้จากผลการทดลองจะพบว่าในการวัดค่าความเข้มของรังสี UV โดยเครื่องวัดที่สร้างขึ้นในแต่ละครั้งค่าที่ได้จะไม่เท่ากัน จึงต้องนำค่าเฉลี่ยมาใช้ในการเปรียบเทียบกับค่าความเข้มของรังสี UV ที่วัดจากเครื่อง UNIMETER เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความเข้มของรังสี UV โดยเครื่องวัดที่สร้างขึ้นกับค่าความเข้มของรังสี UV ที่วัดจากเครื่อง UNI METER จะเกิดค่าผิดพลาดขึ้นซึ่งค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นอาจจะเป็นเพราะอุณหภูมิที่เกิดจากการวัดเป็นเวลานาน และค่า C แผงในตัว Sensor และปัญหาที่พบจากการทดลองก็คือเครื่องวัดที่สร้างขึ้นจะวัดค่าที่จำกัดเนื่องจากที่นำมาปรับเทียบนั้นมีค่าจำกัด เนื่องจากค่าที่นำมาปรับเทียบต้องทำการวัดจากรังสีจริง เพราะฉะนั้นจะต้องหาแหล่งจ่ายรังสีค่าอื่นๆที่จะต้องนำมาปรับเทียบ เพื่อให้เครื่องวัดสามารถวัดวัดค่าในย่านการวัดที่กว้างขึ้น เมื่อนำเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นไปใช้วัดรังสีเอ็กซ์เรย์จะพบปัญหาในการวัด ซึ่งจะมีสัญญาณรบกวนอย่างมากโดยเกิดจากเครื่องกำเนิดรังสีเอ็กซ์เรย์ ซึ่งจะมีแรงดันไฟสูงรบกวนและมีสัญญาณรบกวนจากเครื่องจ่ายไฟ ทำให้วงจรขยายทำงานได้ไม่ดีนัก และเมื่อเรานำเซนเซอร์ไปวัดรังสีเอ็กซ์เรย์โดยไม่ผ่านวงจรขยายจะพบว่าเซนเซอร์ไม่มีการตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์เรย์ อาจเป็นเพราะว่าพื้นที่ฟิล์มเพชรซึ่งเป็นบริเวณรับรังสีมีขนาดเล็กเกินไป ทำให้การตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์เรย์ค่อนข้างน้อยแต่จะตอบสนองต่อรังสี UV ได้ดีกว่ารังสีเอ็กซ์เรย์ ดังนั้นเราควรออกแบบพื้นที่ฟิล์มเพชรให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อให้สามารถตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์เรย์ได้ดีกว่าเดิม และในการสร้างวงจรขยายสัญญาณควรทำการป้องกันสัญญาณรบกวนจากภายนอกและจากแรงดันไฟสูงจากเครื่องกำเนิดเอ็กซ์เรย์เพื่อจะทำให้วงจรมีประสิทธิภาพมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Robert C. Weast **CRC Hand of Chemistry and Physics**. 64th ed : CRC Press,Inc. 1983.
pp. E76-77.
- [2] Annika Nilsson. **Ultraviolet Reflections Life Under A Thining Ozone Layer** : John Wiley & Sons Ltd. 1996. pp. 14-15
- [3] คุณิต เครื่องงาม. **สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เล่มที่1** . กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2542.
- [4] นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง “การศึกษาคุณสมบัติคุณสมบัติในสเซนซ์ของชั้นพอร์ซซิลิคอน” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544. หน้า 61-67
- [5] เอกราช รัตนอุดมพิสูทธิ์ , สมศักดิ์ เข็ยศิริกุล และ สมเกียรติ สุขเดช “ การสังเคราะห์ฟิล์มบางเพชรบน Si ด้วยวิธี CVD แบบลดความร้อนโดยใช้ C_2H_5OH ” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า,ครั้งที่ 20 2540, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย หน้า 425-500
- [6] ลัดไทย ไทโยธิน , เอกราช รัตนอุดมพิสูทธิ์ , เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล , สมศักดิ์ เข็ยศิริกุล และ สมเกียรติ สุขเดช “ อุปกรณ์ตรวจวัดแสงอัลตราไวโอเล็ตด้วยฟิล์มเพชร ” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 23 พฤศจิกายน 2543 , มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ หน้า 753-756
- [7] ศรีเมษ รัตนชัย “ เทคนิคการกัดคานเดี่ยวซิลิคอนเพื่อเป็นตัวตรวจจับอัตราเร่ง ” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2542 หน้า 39-97
- [8] R.F. Davis. **Diamond films and Coatings** . New Jersey : Noyes publications , 1993
- [9] K.E. Spear , J.P. Dismakes. **Synthetic Diamond :emerging CVD Science and Technology**. New York : John wiley&Sons,Inc. 1994
- [10] S.M. Sze. **Semiconductor Devices : Physics and Technology** . New York : John wiley & Sons,Inc 1986. pp. 364-391
- [11] Mitsuo Fukuda. **Optical Semiconductor Devices**. Kanagawa : NTT . 1992.
- [12] Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. **Semiconductor Photoelectric Devices**. Great Britain Iliffe Books Ltd. 1968. pp 65-71
- [13] John P.Bentley. **Principle of Measurement Systems** . : Teesside Polytechnic. 1995. pp.10
- [14] ประจัน พลังสันติกุล “เรียนรู้การใช้งาน CCS C คอมไพเลอร์ เขียนโปรแกรมภาษา C ควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC”.กรุงเทพฯ: บ.อินโนเวตีฟ เอ็กเพอเมนต์ จำกัด.2521

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
ค่าคงที่ทางฟิสิกส์

คุณสมบัติ	สัญลักษณ์	ขนาด	หน่วย
ประจุอิเล็กตรอน (Electron Charge)	Q	1.602×10^{-19}	C
ค่าคงที่โบลทซ์มันน์ (Boltzmann's constant)	K	1.38×10^{-23}	J/K
ความเร็วแสงในอวกาศ (speed of light in space)	C	2.998×10^8	m/s
ค่าความยินยอมทางไฟฟ้าของอวกาศ (Permittivity of free space)	ϵ_0	8.85×10^{-12}	F/m
ความซึมซับแม่เหล็กของอวกาศ (Permeability of free space)	μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$	H/m
ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ (Absolute temperature)	K		K
ความหนาแน่นของประจุที่ผิวสัมผัส ระหว่าง SiO ₂ หนา 100	Q_{aa}	1.4×10^{-8}	C/cm ²
แรงดันเนื่องจากความร้อน (ที่ T = 300 K)	kT/q	0.0295	V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
คุณสมบัติของซิลิกอนไดออกไซด์

คุณสมบัติ	ขนาด	หน่วย
น้ำหนักอะตอม	60.08	-
ความหนาแน่นอะตอม	2.3×10^{-22}	cm ⁻³
ความต้านทาน	$>10^{16}$	Ω -cm
ค่าความยินยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์	3.9	-
จุดหลอมเหลว	1700	°C
ความร้อนจำเพาะ	1	J/g°C
การนำความร้อน	0.014	°C ⁻¹

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ซอร์สโค้ดโปรแกรม

```

#include <16F876A.h>          // header file for PIC16F876A
#include HS,NOWDT,NOPROTECT,NOLVP // Configuration word
#include delay(clock=20000000) // Change OSC here (default 20MHz)
#include rs232(baud=9600, xmit=PIN_C6, rcv=PIN_C7)
#include i2c(master,SDA=PIN_C4, SCL=PIN_C3) // I2C Bus module

#define use_portb_lcd

#include <lcd.c>             // Driver for common LCD modules
#include <stdlib.h>
#include "input.c"
#define SW PIN_A4
#define sclk PIN_C2
#define sdat PIN_C1
#define ADDR_DS1307 0xD0 // Address DS1307

char ch;
short int RX=0;
typedef struct {
    BYTE sec; // Seconds
    BYTE min; // Minutes
    BYTE hr; // Hours
    BYTE day;
    BYTE date;
    BYTE month;
    BYTE year;
}DS1307_RTC;

DS1307_RTC RTC;

/***** Prototypes */
void DS1307_Write(unsigned char ctl,unsigned char dat);
BYTE DS1307_Read(unsigned char ctl);
void DS1307_WriteDate(void);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

void DS1307_WrtieTime(void);
void DS1307_ReadDate(void);
void DS1307_ReadTime(void);

/***** DS1307 Write */
void DS1307_Write(unsigned char ctl,unsigned char dat) //      (4)
{
    i2c_start();      // Start condition
    i2c_write(ADDR_DS1307); // Device Address - Write
    i2c_write(ctl);    // Control byte
    i2c_write(dat);    // Write data
    i2c_stop();        // Stop condition
}

/***** DS1307 Read */
BYTE DS1307_Read(unsigned char ctl) //      (5)
{
    BYTE dat;
    i2c_start();      // Start condition
    i2c_write(ADDR_DS1307); // Device Address - Write
    i2c_write(ctl);    // Control byte

    i2c_start();
    i2c_write(ADDR_DS1307+1); // Device Address - Read
    dat = i2c_read(0);    // Read data , Not ACK
    i2c_stop();          // Stop condition
    return (dat);        // Return data
}

/***** DS1307 WriteDate */
void DS1307_WriteDate(void)
{
    DS1307_Write(0x04,RTC.date);
    DS1307_Write(0x05,RTC.month);
    DS1307_Write(0x06,RTC.year);
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

}

/***** DS1307 WriteDate */
void DS1307_WriteTime(void)
{
    DS1307_Write(0x00,RTC.sec);
    DS1307_Write(0x01,RTC.min);
    DS1307_Write(0x02,RTC.hr);
}

/***** DS1307 ReadDate */
void DS1307_ReadDate(void)
{
    RTC.date = DS1307_Read(0x04);
    RTC.month = DS1307_Read(0x05);
    RTC.year = DS1307_Read(0x06);
}

/***** DS1307 ReadDate */
void DS1307_ReadTime(void)
{
    RTC.sec = DS1307_Read(0x00);
    RTC.min = DS1307_Read(0x01);
    RTC.hr = DS1307_Read(0x02);
}

void DS1307_SetDate(void)
{
    printf("\n\rDate : ");
    RTC.date= gethex();
    printf("\n\rMonth : ");
    RTC.month= gethex();
    printf("\n\rYear : ");
    RTC.year= gethex();
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

/***** DS1307 SetTime */
void DS1307_SetTime(void)
{
    printf("\n\rHour :");
    RTC.hr= gethex();
    printf("\n\rMin :");
    RTC.min= gethex();
    printf("\n\rSec :");
    RTC.sec= gethex();
}

#INT_RDA
void RxD_ISR(void)
{
    ch = getc();
}

/***** main */
void main(void){

    int16 data,i;
    float volts[15];
    float sum=0,avg;
    enable_interrupts(INT_RDA);
    enable_interrupts(GLOBAL);
    lcd_init();
    DS1307_ReadDate();
    DS1307_ReadTime();

    printf(lcd_putc," Date:%2X/%2X/%2X\n",RTC.date,RTC.month,RTC.year);
    printf(lcd_putc," Time:%2X:%2X:%2X",RTC.hr,RTC.min,RTC.sec);
    printf("\rDate:%2X/%2X/%2X\n",RTC.date,RTC.month,RTC.year);
    printf("\rTime:%2X:%2X:%2X\n",RTC.hr,RTC.min,RTC.sec);
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    delay_ms(2000);
loop: printf(lcd_putc, "\f Press to START");
    delay_ms(500);

while(1){

if (ch == 's' || ch == 'S') {
    DS1307_SetDate();    // Set Date
    DS1307_WriteDate(); // Write Date
    DS1307_SetTime();   // Set Time
    DS1307_WriteTime();
}

if(input(SW)==0){
    printf(lcd_putc, "\f waiting..");
    for(i=0;i<5;i++){
        delay_ms(1000);
    }
    printf(lcd_putc, "\f Reading..");
    for(i=0;i<15;i++){
        data=0;
        set_tris_c(0xF9);

        output_high(sclk);
        output_high(sdat);delay_us(100);

        output_low(sclk);
        output_high(sdat);delay_us(100);

        output_high(sclk);
        output_low(sdat);delay_us(400);

        output_high(sclk);
        output_high(sdat);delay_us(100);
    }
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

output_low(sclk);delay_us(100);
if(input(sdat)==1)
data=32768;
else
data=data;
output_high(sclk);delay_us(100);

```

```

output_low(sclk);delay_us(100);
if(input(sdat)==1)
data=16384+data;
else
data=data;
output_high(sclk);delay_us(100);

```

```

output_low(sclk);delay_us(100);
if(input(sdat)==1)
data=8192+data;
else
data=data;
output_high(sclk);delay_us(100);

```

```

output_low(sclk);delay_us(100);
if(input(sdat)==1)
data=4096+data;
else
data=data;
output_high(sclk);delay_us(100);

```

```

output_low(sclk);delay_us(100);
if(input(sdat)==1)
data=2048+data;
else
data=data;
output_high(sclk);delay_us(100);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

output_low(sclk);delay_us(100);
if(input(sdat)==1)
data=1024+data;
else
data=data;
output_high(sclk);delay_us(100);

```

```

output_low(sclk);delay_us(100);
if(input(sdat)==1)
data=512+data;
else
data=data;
output_high(sclk);delay_us(100);

```

```

output_low(sclk);delay_us(100);
if(input(sdat)==1)
data=256+data;
else
data=data;
output_high(sclk);delay_us(100);

```

```

output_low(sclk);delay_us(100);
if(input(sdat)==1)
data=128+data;
else
data=data;
output_high(sclk);delay_us(100);

```

```

output_low(sclk);delay_us(100);
if(input(sdat)==1)
data=64+data;
else
data=data;
output_high(sclk);delay_us(100);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

output_low(sclk);delay_us(100);
if(input(sdat)==1)
data=32+data;
else
data=data;
output_high(sclk);delay_us(100);

```

```

output_low(sclk);delay_us(100);
if(input(sdat)==1)
data=16+data;
else
data=data;
output_high(sclk);delay_us(100);

output_low(sclk);delay_us(100);
if(input(sdat)==1)
data=8+data;
else
data=data;
output_high(sclk);delay_us(100);

output_low(sclk);delay_us(100);
if(input(sdat)==1)
data=4+data;
else
data=data;
output_high(sclk);delay_us(100);

```

```

output_low(sclk);delay_us(100);
if(input(sdat)==1)
data=2+data;
else
data=data;
output_high(sclk);delay_us(100);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

output_low(sclk);delay_us(100);
if(input(sdat)==1)
data=1+data;
else
data=data;
output_high(sclk);delay_us(100);

volts[i]=data*(2.38596/65535);
delay_ms(100);
}

for(i=0;i<15;i++){
sum=sum+volts[i];
}
avg=(sum/15);
printf(lcd_putc,"f Press to READ");

while(1){
delay_ms(100);
if(input(SW)==0){
DS1307_ReadDate();
DS1307_ReadTime();
printf("\rDate:%2X/%2X/%2X\n",RTC.date,RTC.month,RTC.year);
printf("\rTime:%2X:%2X:%2X\n",RTC.hr,RTC.min,RTC.sec);
printf("\rVolts=%1.4f V\n",avg);
printf(lcd_putc,"fTime:%2X:%2X:%2X",RTC.hr,RTC.min,RTC.sec);
lcd_gotoxy(1,2);
printf(lcd_putc,"Volts=%1.4f V\n",avg);
while(1){

delay_ms(100);
if(input(SW)==0){
sum=0;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    delay_ms(100);  
    goto loop;  
  }  
}  
}  
}  
}
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

Data Sheet



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



PIC16F87XA

28/40/44-Pin Enhanced Flash Microcontrollers

Devices Included in this Data Sheet:

- PIC16F873A
- PIC16F874A
- PIC16F876A
- PIC16F877A

High-Performance RISC CPU:

- Only 35 single-word instructions to learn
- All single-cycle instructions except for program branches, which are two-cycle
- Operating speed: DC – 20 MHz clock input
DC – 200 ns instruction cycle
- Up to 8K x 14 words of Flash Program Memory,
Up to 368 x 8 bytes of Data Memory (RAM),
Up to 256 x 8 bytes of EEPROM Data Memory
- Pinout compatible to other 28-pin or 40/44-pin PIC16CXXX and PIC16FXXX microcontrollers

Peripheral Features:

- Timer0: 8-bit timer/counter with 8-bit prescaler
- Timer1: 16-bit timer/counter with prescaler, can be incremented during Sleep via external crystal/clock
- Timer2: 8-bit timer/counter with 8-bit period register, prescaler and postscaler
- Two Capture, Compare, PWM modules
 - Capture is 16-bit, max. resolution is 12.5 ns
 - Compare is 16-bit, max. resolution is 200 ns
 - PWM max. resolution is 10-bit
- Synchronous Serial Port (SSP) with SPI™ (Master mode) and I²C™ (Master/Slave)
- Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter (USART/SCI) with 9-bit address detection
- Parallel Slave Port (PSP) – 8 bits wide with external RD, WR and CS controls (40/44-pin only)
- Brown-out detection circuitry for Brown-out Reset (BOR)

Analog Features:

- 10-bit, up to 8-channel Analog-to-Digital Converter (A/D)
- Brown-out Reset (BOR)
- Analog Comparator module with:
 - Two analog comparators
 - Programmable on-chip voltage reference (VREF) module
 - Programmable input multiplexing from device inputs and internal voltage reference
 - Comparator outputs are externally accessible

Special Microcontroller Features:

- 100,000 erase/write cycle Enhanced Flash program memory typical
- 1,000,000 erase/write cycle Data EEPROM memory typical
- Data EEPROM Retention > 40 years
- Self-reprogrammable under software control
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) via two pins
- Single-supply 5V In-Circuit Serial Programming
- Watchdog Timer (WDT) with its own on-chip RC oscillator for reliable operation
- Programmable code protection
- Power saving Sleep mode
- Selectable oscillator options
- In-Circuit Debug (ICD) via two pins

CMOS Technology:

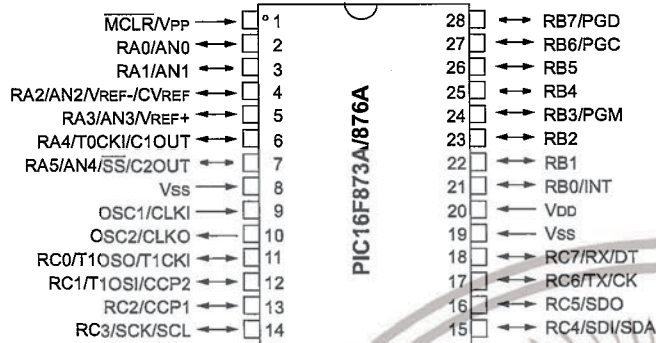
- Low-power, high-speed Flash/EEPROM technology
- Fully static design
- Wide operating voltage range (2.0V to 5.5V)
- Commercial and Industrial temperature ranges
- Low-power consumption

Device	Program Memory		Data SRAM (Bytes)	EEPROM (Bytes)	I/O	10-bit A/D (ch)	CCP (PWM)	MSSP		USART	Timers 8/16-bit	Comparators
	Bytes	# Single Word Instructions						SPI	Master I ² C			
PIC16F873A	7.2K	4096	192	128	22	5	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2
PIC16F874A	7.2K	4096	192	128	33	8	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2
PIC16F876A	14.3K	8192	368	256	22	5	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2
PIC16F877A	14.3K	8192	368	256	33	8	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2

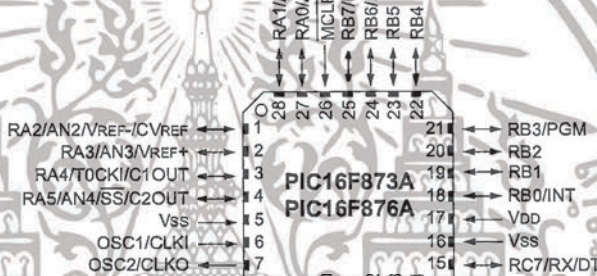
PIC16F87XA

Pin Diagrams

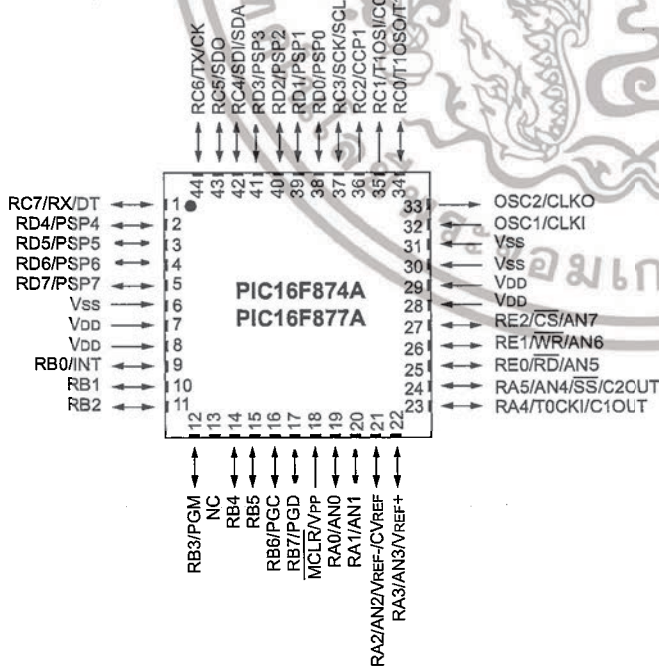
28-Pin PDIP, SOIC, SSOP



28-Pin QFN

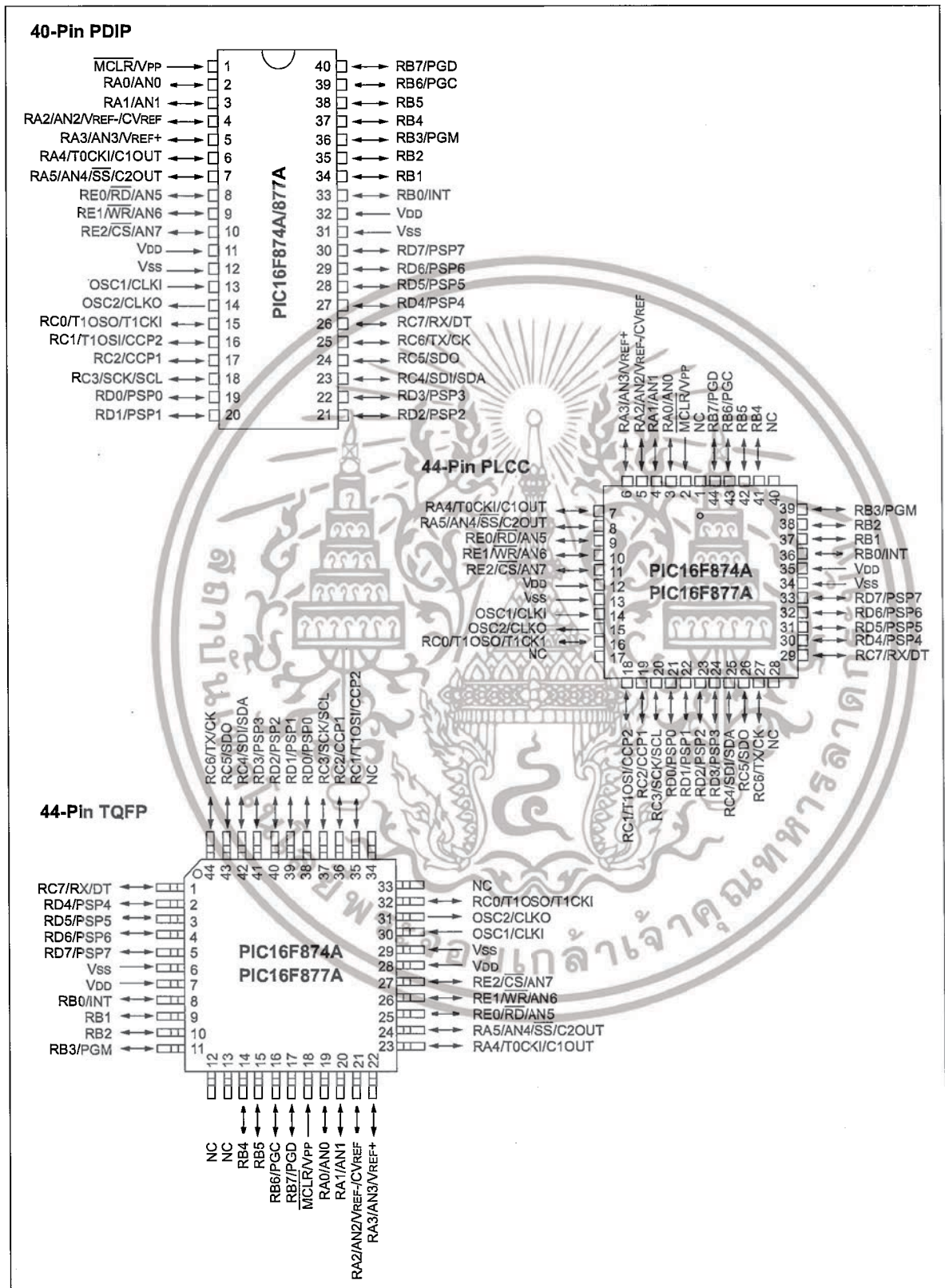


44-Pin QFN



PIC16F87XA

Pin Diagrams (Continued)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PIC16F87XA

1.0 DEVICE OVERVIEW

This document contains device specific information about the following devices:

- PIC16F873A
- PIC16F874A
- PIC16F876A
- PIC16F877A

PIC16F873A/876A devices are available only in 28-pin packages, while PIC16F874A/877A devices are available in 40-pin and 44-pin packages. All devices in the PIC16F87XA family share common architecture with the following differences:

- The PIC16F873A and PIC16F874A have one-half of the total on-chip memory of the PIC16F876A and PIC16F877A
- The 28-pin devices have three I/O ports, while the 40/44-pin devices have five
- The 28-pin devices have fourteen interrupts, while the 40/44-pin devices have fifteen
- The 28-pin devices have five A/D input channels, while the 40/44-pin devices have eight
- The Parallel Slave Port is implemented only on the 40/44-pin devices

The available features are summarized in Table 1-1. Block diagrams of the PIC16F873A/876A and PIC16F874A/877A devices are provided in Figure 1-1 and Figure 1-2, respectively. The pinouts for these device families are listed in Table 1-2 and Table 1-3.

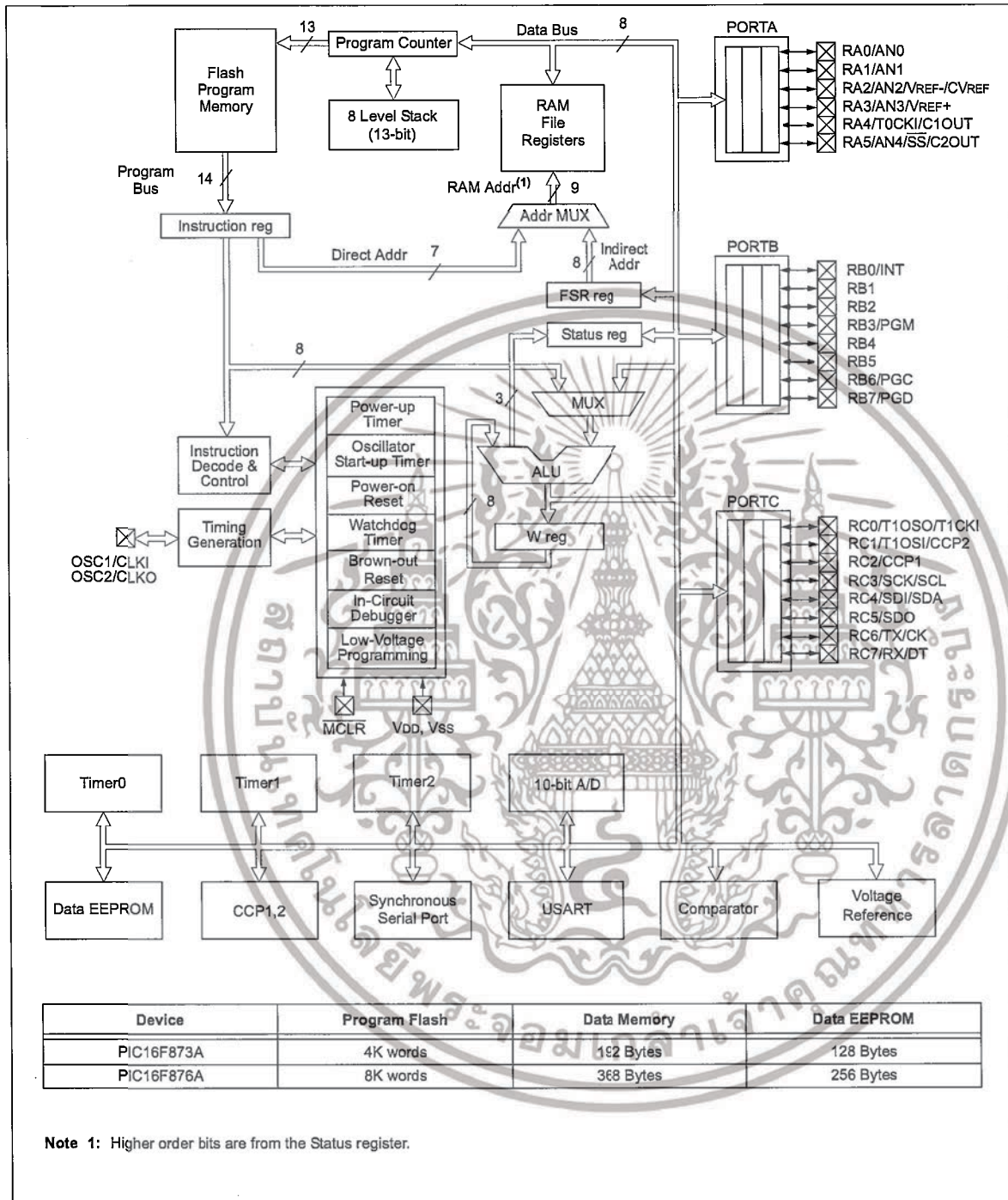
Additional information may be found in the PICmicro® Mid-Range Reference Manual (DS33023), which may be obtained from your local Microchip Sales Representative or downloaded from the Microchip web site. The Reference Manual should be considered a complementary document to this data sheet and is highly recommended reading for a better understanding of the device architecture and operation of the peripheral modules.

TABLE 1-1: PIC16F87XA DEVICE FEATURES

Key Features	PIC16F873A	PIC16F874A	PIC16F876A	PIC16F877A
Operating Frequency	DC – 20 MHz	DC – 20 MHz	DC – 20 MHz	DC – 20 MHz
Resets (and Delays)	POR, BOR (PWRT, OST)	POR, BOR (PWRT, OST)	POR, BOR (PWRT, OST)	POR, BOR (PWRT, OST)
Flash Program Memory (14-bit words)	4K	4K	8K	8K
Data Memory (bytes)	192	192	368	368
EEPROM Data Memory (bytes)	128	128	256	256
Interrupts	14	15	14	15
I/O Ports	Ports A, B, C	Ports A, B, C, D, E	Ports A, B, C	Ports A, B, C, D, E
Timers	3	3	3	3
Capture/Compare/PWM modules	2	2	2	2
Serial Communications	MSSP, USART	MSSP, USART	MSSP, USART	MSSP, USART
Parallel Communications	—	PSP	—	PSP
10-bit Analog-to-Digital Module	5 input channels	8 input channels	5 input channels	8 input channels
Analog Comparators	2	2	2	2
Instruction Set	35 Instructions	35 Instructions	35 Instructions	35 Instructions
Packages	28-pin PDIP 28-pin SOIC 28-pin SSOP 28-pin QFN	40-pin PDIP 44-pin PLCC 44-pin TQFP 44-pin QFN	28-pin PDIP 28-pin SOIC 28-pin SSOP 28-pin QFN	40-pin PDIP 44-pin PLCC 44-pin TQFP 44-pin QFN

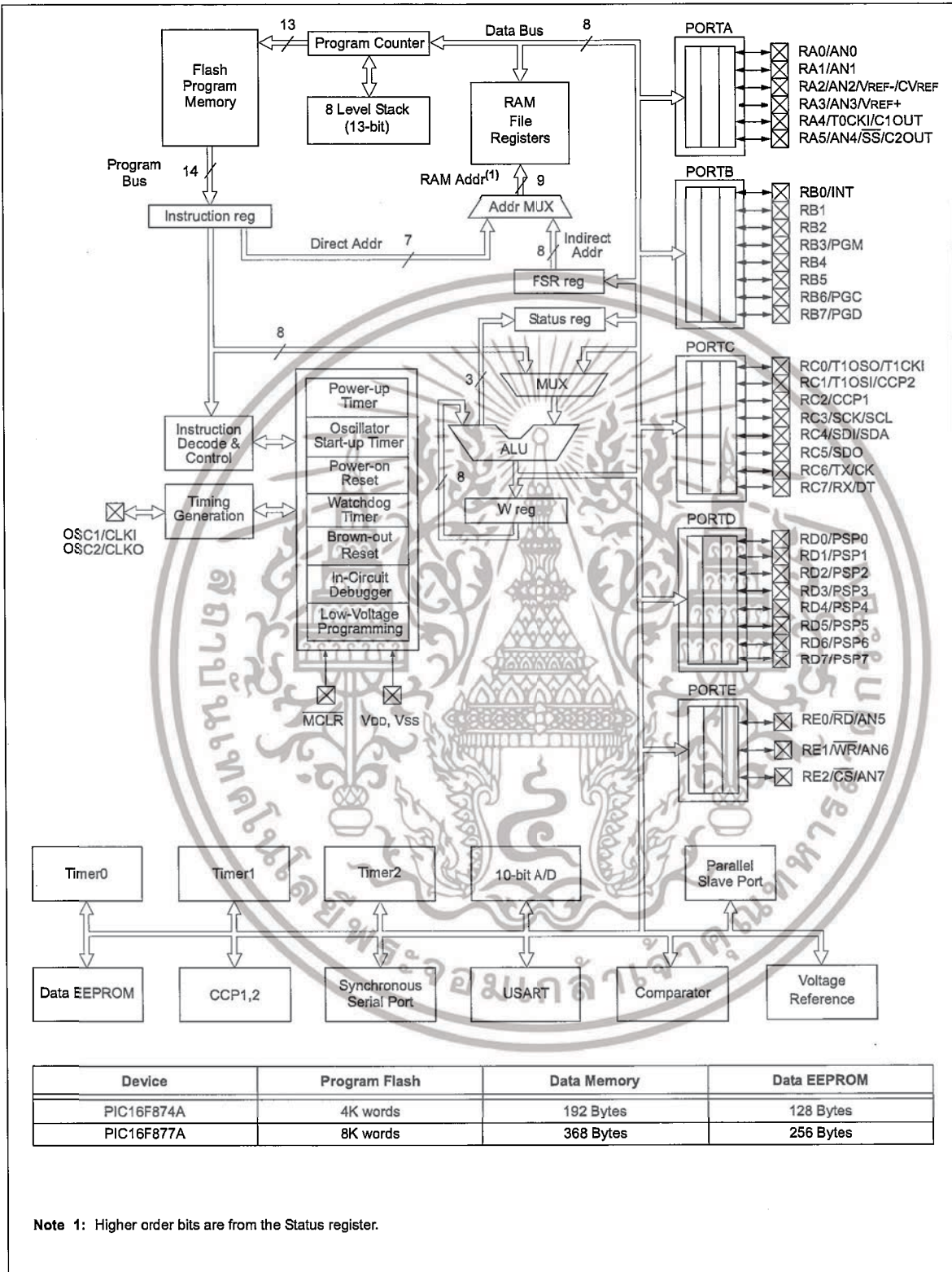
PIC16F87XA

FIGURE 1-1: PIC16F873A/876A BLOCK DIAGRAM



PIC16F87XA

FIGURE 1-2: PIC16F874A/877A BLOCK DIAGRAM



PIC16F87XA

TABLE 1-2: PIC16F873A/876A PINOUT DESCRIPTION (CONTINUED)

Pin Name	PDIP, SOIC, SSOP Pin#	QFN Pin#	I/O/P Type	Buffer Type	Description
RB0/INT RB0 INT	21	18	I/O I	TTL/ST ⁽¹⁾	PORTB is a bidirectional I/O port. PORTB can be software programmed for internal weak pull-ups on all inputs. Digital I/O. External interrupt.
RB1	22	19	I/O	TTL	Digital I/O.
RB2	23	20	I/O	TTL	Digital I/O.
RB3/PGM RB3 PGM	24	21	I/O I	TTL	Digital I/O. Low-voltage (single-supply) ICSP programming enable pin.
RB4	25	22	I/O	TTL	Digital I/O.
RB5	26	23	I/O	TTL	Digital I/O.
RB6/PGC RB6 PGC	27	24	I/O I	TTL/ST ⁽²⁾	Digital I/O. In-circuit debugger and ICSP programming clock.
RB7/PGD RB7 PGD	28	25	I/O I/O	TTL/ST ⁽²⁾	Digital I/O. In-circuit debugger and ICSP programming data.
RC0/T1OSO/T1CKI RC0 T1OSO T1CKI	11	8	I/O O I	ST	PORTC is a bidirectional I/O port. Digital I/O. Timer1 oscillator output. Timer1 external clock input.
RC1/T1OSI/CCP2 RC1 T1OSI CCP2	12	9	I/O I I/O	ST	Digital I/O. Timer1 oscillator input. Capture2 input, Compare2 output, PWM2 output.
RC2/CCP1 RC2 CCP1	13	10	I/O I/O	ST	Digital I/O. Capture1 input, Compare1 output, PWM1 output.
RC3/SCK/SCL RC3 SCK SCL	14	11	I/O I/O I/O	ST	Digital I/O. Synchronous serial clock input/output for SPI mode. Synchronous serial clock input/output for I ² C mode.
RC4/SDI/SDA RC4 SDI SDA	15	12	I/O I I/O	ST	Digital I/O. SPI data in. I ² C data I/O.
RC5/SDO RC5 SDO	16	13	I/O O	ST	Digital I/O. SPI data out.
RC6/TX/CK RC6 TX CK	17	14	I/O O I/O	ST	Digital I/O. USART asynchronous transmit. USART1 synchronous clock.
RC7/RX/DT RC7 RX DT	18	15	I/O I I/O	ST	Digital I/O. USART asynchronous receive. USART synchronous data.
Vss	8, 19	5, 6	P	—	Ground reference for logic and I/O pins.
VDD	20	17	P	—	Positive supply for logic and I/O pins.

Legend: I = input O = output I/O = input/output P = power
— = Not used TTL = TTL input ST = Schmitt Trigger input

Note 1: This buffer is a Schmitt Trigger input when configured as the external interrupt.
Note 2: This buffer is a Schmitt Trigger input when used in Serial Programming mode.
Note 3: This buffer is a Schmitt Trigger input when configured in RC Oscillator mode and a CMOS input otherwise.

PIC16F87XA

TABLE 1-3: PIC16F874A/877A PINOUT DESCRIPTION (CONTINUED)

Pin Name	PDIP Pin#	PLCC Pin#	TQFP Pin#	QFN Pin#	I/O/P Type	Buffer Type	Description
RB0/INT RB0 INT	33	36	8	9	I/O I	TTL/ST ⁽¹⁾	PORTB is a bidirectional I/O port. PORTB can be software programmed for internal weak pull-up on all inputs. Digital I/O. External interrupt.
RB1	34	37	9	10	I/O	TTL	Digital I/O.
RB2	35	38	10	11	I/O	TTL	Digital I/O.
RB3/PGM RB3 PGM	36	39	11	12	I/O I	TTL	Digital I/O. Low-voltage ICSP programming enable pin.
RB4	37	41	14	14	I/O	TTL	Digital I/O.
RB5	38	42	15	15	I/O	TTL	Digital I/O.
RB6/PGC RB6 PGC	39	43	16	16	I/O I	TTL/ST ⁽²⁾	Digital I/O. In-circuit debugger and ICSP programming clock.
RB7/PGD RB7 PGD	40	44	17	17	I/O I/O	TTL/ST ⁽²⁾	Digital I/O. In-circuit debugger and ICSP programming data.

Legend: I = input O = output I/O = input/output P = power
 — = Not used TTL = TTL input ST = Schmitt Trigger input

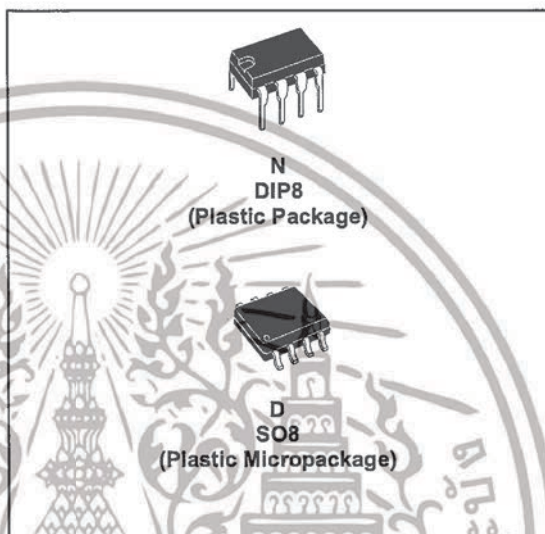
- Note 1:** This buffer is a Schmitt Trigger input when configured as the external interrupt.
Note 2: This buffer is a Schmitt Trigger input when used in Serial Programming mode.
Note 3: This buffer is a Schmitt Trigger input when configured in RC Oscillator mode and a CMOS input otherwise.



TL072 TL072A - TL072B

LOW NOISE J-FET DUAL OPERATIONAL AMPLIFIERS

- WIDE COMMON-MODE (UP TO V_{CC}^+) AND DIFFERENTIAL VOLTAGE RANGE
- LOW INPUT BIAS AND OFFSET CURRENT
- LOW NOISE $e_n = 15nV/\sqrt{Hz}$ (typ)
- OUTPUT SHORT-CIRCUIT PROTECTION
- HIGH INPUT IMPEDANCE J-FET INPUT STAGE
- LOW HARMONIC DISTORTION : 0.01% (typ)
- INTERNAL FREQUENCY COMPENSATION
- LATCH UP FREE OPERATION
- HIGH SLEW RATE : $16V/\mu s$ (typ)

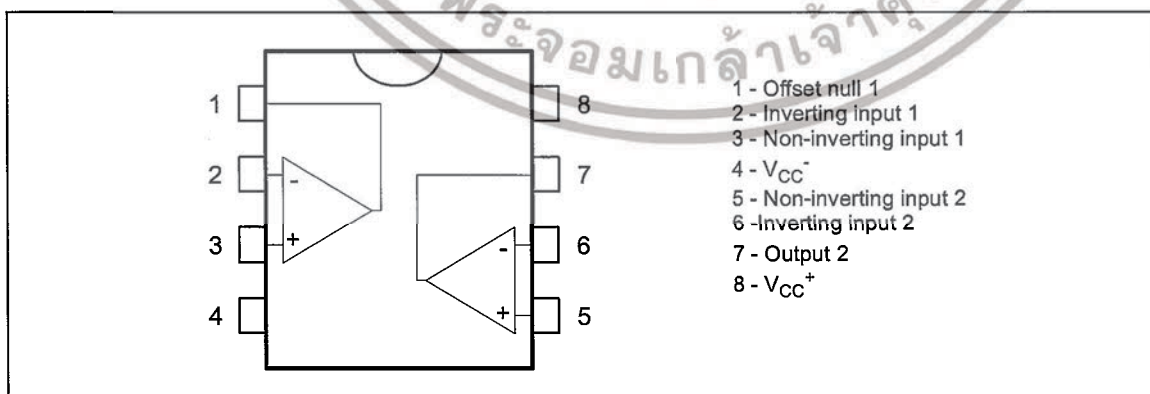


DESCRIPTION

The TL072, TL072A and TL072B are high speed J-FET input dual operational amplifiers incorporating well matched, high voltage J-FET and bipolar transistors in a monolithic integrated circuit.

The devices feature high slew rates, low input bias and offset current, and low offset voltage temperature coefficient.

PIN CONNECTIONS (top view)



ORDER CODE

Part Number	Temperature Range	Package	
		N	D
TL072M/AM/BM	-55°C, +125°C	•	•
TL072I/AI/BI	-40°C, +105°C	•	•
TL072C/AC/BC	0°C, +70°C	•	•

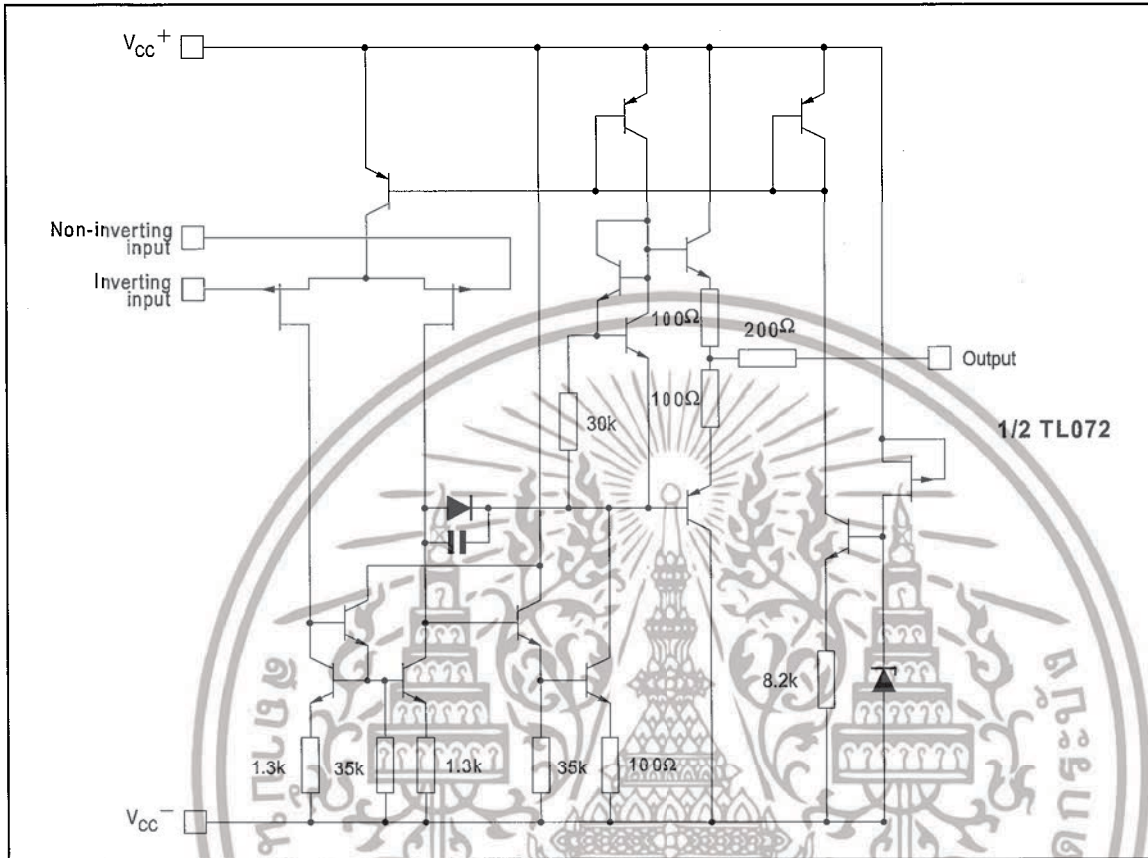
Example : TL072CN

N = Dual in Line Package (DIP)
D = Small Outline Package (SO) - also available in Tape & Reel (DT)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL072 - TL072A - TL072B

SCHEMATIC DIAGRAM



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	TL072M, AM, BM	TL072I, AI, BI	TL072C, AC, BC	Unit
V_{CC}	Supply voltage - note 1)	±18			V
V_i	Input Voltage - note 2)	±15			V
V_{id}	Differential Input Voltage - note 3)	±30			V
P_{tot}	Power Dissipation	680			mW
	Output Short-circuit Duration - note 4)	Infinite			
T_{oper}	Operating Free-air Temperature Range	-55 to +125	-40 to +105	0 to +70	°C
T_{stg}	Storage Temperature Range	-65 to +150			°C

1. All voltage values, except differential voltage, are with respect to the zero reference level (ground) of the supply voltages where the zero reference level is the midpoint between V_{CC}^+ and V_{CC}^- .
2. The magnitude of the input voltage must never exceed the magnitude of the supply voltage or 15 volts, whichever is less.
3. Differential voltages are the non-inverting input terminal with respect to the inverting input terminal.
4. The output may be shorted to ground or to either supply. Temperature and/or supply voltages must be limited to ensure that the dissipation rating is not exceeded.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL072 - TL072A - TL072B

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

$V_{CC} = \pm 15V$, $T_{amb} = +25^{\circ}C$ (unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	TL072I,M,AC,AI,AM,BC,BI,BM			TL072C			Unit
		Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	
V_{io}	Input Offset Voltage ($R_S = 50\Omega$) $T_{amb} = +25^{\circ}C$		3	10		3	10	mV
	$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		1	13			13	
DV_{io}	Input Offset Voltage Drift		10			10		$\mu V/^{\circ}C$
I_{io}	Input Offset Current - note 1) $T_{amb} = +25^{\circ}C$		5	100		5	100	pA nA
	$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$			4			10	
I_{ib}	Input Bias Current -note 1 $T_{amb} = +25^{\circ}C$		20	200		20	200	pA nA
	$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$			20			20	
A_{vd}	Large Signal Voltage Gain ($R_L = 2k\Omega$, $V_o = \pm 10V$) $T_{amb} = +25^{\circ}C$	50	200		25	200		V/mV
	$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	25			15			
SVR	Supply Voltage Rejection Ratio ($R_S = 50\Omega$) $T_{amb} = +25^{\circ}C$	80	86		70	86		dB
	$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	80			70			
I_{CC}	Supply Current, no load $T_{amb} = +25^{\circ}C$		1.4	2.5		1.4	2.5	mA
	$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$			2.5			2.5	
V_{icm}	Input Common Mode Voltage Range	± 11	+15 -12		± 11	+15 -12		V
CMR	Common Mode Rejection Ratio ($R_S = 50\Omega$) $T_{amb} = +25^{\circ}C$	80	86		70	86		dB
	$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	80			70			
I_{os}	Output Short-circuit Current $T_{amb} = +25^{\circ}C$	10	40	60	10	40	60	mA
	$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	10		60	10		60	
$\pm V_{opp}$	Output Voltage Swing $T_{amb} = +25^{\circ}C$		10	12		10	12	V
	$RL = 2k\Omega$		12	13.5		12	13.5	
	$RL = 10k\Omega$		10	12		10	12	
	$RL = 10k\Omega$		12	12		12	12	
SR	Slew Rate ($T_{amb} = +25^{\circ}C$) $V_{in} = 10V$, $R_L = 2k\Omega$, $C_L = 100pF$, unity gain	8	16		8	16		V/ μs
t_r	Rise Time ($T_{amb} = +25^{\circ}C$) $V_{in} = 20mV$, $R_L = 2k\Omega$, $C_L = 100pF$, unity gain		0.1			0.1		μs
K_{ov}	Overshoot ($T_{amb} = +25^{\circ}C$) $V_{in} = 20mV$, $R_L = 2k\Omega$, $C_L = 100pF$, unity gain		10			10		%
GBP	Gain Bandwidth Product ($T_{amb} = +25^{\circ}C$) $V_{in} = 10mV$, $R_L = 2k\Omega$, $C_L = 100pF$, $f = 100kHz$	2.5	4		2.5	4		MHz
R_i	Input Resistance		10^{12}			10^{12}		Ω



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL072 - TL072A - TL072B

Symbol	Parameter	TL072I,M,AC,AI,AM, BC,BI,BM			TL072C			Unit
		Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	
THD	Total Harmonic Distortion ($T_{amb} = +25^{\circ}C$) $f = 1kHz, R_L = 2k\Omega, C_L = 100pF, A_V = 20dB,$ $V_o = 2V_{pp}$		0.01			0.01		%
e_n	Equivalent Input Noise Voltage $R_S = 100\Omega, f = 1KHz$		15			15		$\frac{nV}{\sqrt{Hz}}$
ϕ_m	Phase Margin		45			45		degrees
V_{o1}/V_{o2}	Channel separation $A_V = 100$		120			120		dB

1. The input bias currents are junction leakage currents which approximately double for every 10°C increase in the junction temperature.

