

การพัฒนาเครื่องตรวจผู้บุกรุกโดยใช้ตัวรับรู้พอลิเมอร์ไพโรอิเล็กทริก



นางสาว อ้อยใจ อ่องหรัย

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์


คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-3704-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**DEVELOPMENT OF INTRUDER DETECTOR USING PYROELECTRIC
POLYMER SENSORS**



Miss Oijai Ongrai

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Physics**

Department of Physics

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-3704-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาเครื่องตรวจผู้บุกรุกโดยใช้ตัวรับรู้พอลิเมอร์ไพโรอิเล็กทริก
โดย	นางสาวอ้อยใจ อ่องห่วย
สาขาวิชา	ฟิสิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กิรฉัตร รัตนธรรมพันธ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร. อนันตสิน เตชะกำพูน

คณะวิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้แนบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย โพธิ์พิจิตร)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ประไพพรรณ ฉันทิกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กิรฉัตร รัตนธรรมพันธ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร. อนันตสิน เตชะกำพูน)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. มยุรี เนตรนภิส)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. สมฤทธิ วังสัมณีโรจน์)

อ้อยใจ อ่องห่วย: การพัฒนาเครื่องตรวจจับผู้บุกรุก โดยใช้ตัวรับรู้พอลิเมอร์ไพโรอิเล็กทริก (DEVELOPMENT OF INTRUDER DETECTOR USING PYROELECTRIC POLYMER SENSORS) อ. ที่ปรึกษา: ผศ. กิรณันต์ รัตนธรรมพันธ์
อ. ที่ปรึกษาร่วม: รศ. ดร. อนันตสิน เตชะกำพุช, 2546 , 82 หน้า. ISBN 974-17-3704-1.

ฟิล์มพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์(PVDF)หลังจากผ่านกรรมวิธีการเตรียมที่เหมาะสม จะมีสมบัติไพโรอิเล็กทริกคือให้ผลตอบสนองทางไฟฟ้าเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง PVDFมีการตอบสนองกับรังสีอินฟราเรดที่ครอบคลุมช่วงคลื่นเดียวกันกับที่แผ่จากร่างกายมนุษย์ ดังนั้น PVDF จึงเหมาะที่จะนำมาใช้เป็นสร้างเป็นตัวตรวจจับผู้บุกรุก ผู้วิจัยได้ศึกษาผลการตอบสนองทางไฟฟ้าของตัวรับรู้ PVDF ต่อแหล่งกำเนิดรังสีต่างชนิดกันที่ความถี่ต่างๆ พบว่าตัวรับรู้ PVDF มีสมบัติเหมาะที่จะใช้ในงานด้านการตรวจวัดการแผ่รังสีที่มีความถี่ต่ำ นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบหน่วยรับรังสีและวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ที่เหมาะสม หลังจากรังสีอินฟราเรดจากตัวผู้บุกรุกสะท้อนจากหน่วยรับรังสีสู่ตัวรับรู้PVDF ทำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้าเข้าสู่วงจรรีเลย์ทรอนิกส์เพื่อทำการขยาย กรองความถี่ และจากนั้นทำการคัดเลือกสัญญาณสู่ระบบเตือนภัย จากผลการทดสอบพบว่าเครื่องตรวจจับผู้บุกรุกที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้ถูกต้อง 95 เปอร์เซ็นต์ที่ระยะ 4 เมตร และสามารถตรวจจับได้ทั้งเวลากลางวันและกลางคืน

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....ฟิสิกส์..... ลายมือชื่อนิสิท.....
สาขาวิชา.....ฟิสิกส์..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2546..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4372487223 : MAJOR PHYSICS

KEYWORD: PYROELECTRIC / PVDF / RADIATION / RESPONSIVITY / DETECTOR

OOYJAI ONGRAI: DEVELOPMENT OF INTRUDER DETECTOR USING
PYROELECTRIC POLYMER SENSORS. THESIS ADVISOR: ASST. PROF.
KIRANAN RATTANATUMMAPAN. THESIS CO-ADVISOR: ASSOC. PROF.
ANUNTASIN TECHAGUMPUCH, Ph. D., 82 pp. ISBN 974-17-3704-1.

The polyvinylidene fluoride (PVDF) film, after being suitably processed, exhibits pyroelectric property which is essential property to produce electrical charge in response to a change in temperature. PVDF responds to infrared radiation, covering the radiated spectrum from the human body, that is a key point for application intruder detection. In this work, we studied the electrical response of the PVDF film due to infrared radiation from different sources and from different ranges of frequency. The results show that the film could be used in radiation detection at low frequency. In order to improve the detection, a radiation reflector and a number of amplifier circuits were designed and built. After infrared radiation from intruder was reflected by a reflector and reached the PVDF sensor, an electrical signal was produced and passed to the electronic circuits where it was amplified, filtered out, and then fed to the selected part to an alarm system. The testing results of the intruder detector show very promising results to detect the intruder with 95 % accuracy at 4 meter range, whatever day or night time.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

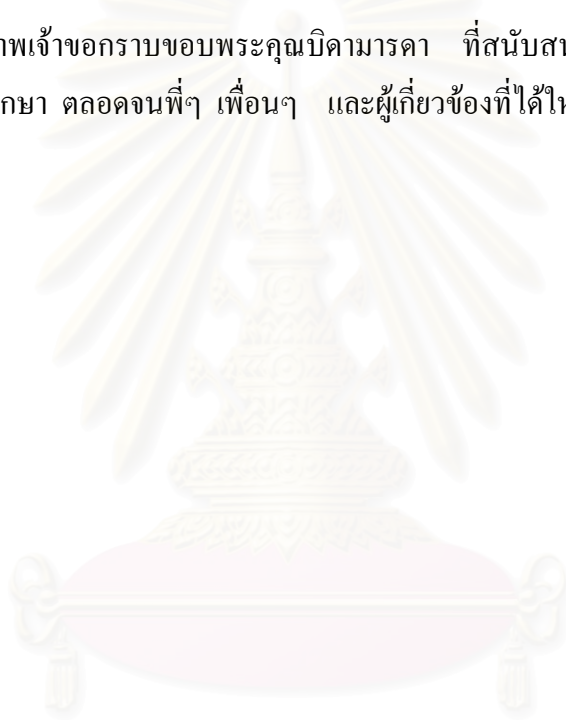
Department.....Physics..... Student's signature.....
Field of study.....Physics..... Advisor's signature.....
Academic year.....2003..... Co- advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์
กิรฉัตร รัตนธรรมพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำและตรวจแก้
ข้อเขียนวิทยานิพนธ์นี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อนันตสิน เตชะกำ
พูช อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษาบางประการแก่ผู้วิจัย

นอกจากนี้ข้าพเจ้าใคร่ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ชนะ ฝิว่อง เป็นอย่างสูง ที่กรุณาให้คำแนะนำ
ปรึกษาทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ ทั้งยังช่วยออกแบบและประกอบวงจรให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ท้ายสุดนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ที่สนับสนุนและให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้า
เสมอมาจนสำเร็จการศึกษา ตลอดจนพี่ๆ เพื่อนๆ และผู้เกี่ยวข้องที่ได้ให้การช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ
ทุกด้าน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฌ
สารบัญตาราง.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 แนวเหตุผล.....	2
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน.....	3
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ฟิล์มไพโรอิเล็กทริกพอลิเมอร์.....	5
2.1 ทฤษฎีไพโรอิเล็กทริก.....	6
2.2 ฟิล์มพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์.....	8
2.2.1 โครงสร้างผลึกของ PVDF.....	8
2.2.2 การเตรียมฟิล์มไพโรอิเล็กทริก PVDF	13
2.3 สัญญาณไฟฟ้าจากฟิล์ม PVDFไพโรอิเล็กทริก.....	14
3 การตอบสนองทางไฟฟ้าของฟิล์มไพโรอิเล็กทริก.....	20
3.1 การวัดการแผ่รังสีของวัตถุ.....	20
3.2 การตอบสนองทางไฟฟ้าของตัวรับรู้ไพโรอิเล็กทริก.....	23
3.2.1 การตอบสนองต่อความถี่ของสารไพโรอิเล็กทริก.....	26
3.2.2 สภาพตอบสนองทางกระแส (current responsivity).....	28
3.2.3 สภาพตอบสนองทางแรงดัน (voltage responsivity).....	29

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
3.3	ข้อพิจารณาในการใช้ตัวรับรู้รังสีอินฟราเรดแบบไพโรอิเล็กทริก.....32
3.3.1	ค่ากำลังเอาต์พุตเทียบสัญญาณรบกวน (noise equivalent power :NEP).....32
3.3.2	ค่าความสามารถในการตรวจจับ (detectivity : D^*)33
3.3.3	ผลตอบสนองเชิงสเปกตรัม (spectral response).....33
3.3.4	ความเป็นเชิงเส้น (linearity).....35
3.3.5	Figure of Merit35
4	เครื่องตรวจจับผู้บุกรุกจากตัวรับรู้ PVDF.....37
4.1	ตัวรับรู้ จาก PVDF และหน่วยรับรังสี.....38
4.2	วงจรขยายเบื้องต้น (preamplifier).....39
4.3	การออกแบบวงจรขยายและกรองความถี่ (amplifier and bandpass filter).....42
4.4	วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ (comparator).....43
5	ผลการทดสอบ.....46
5.1	การทดสอบการทำงานของตัวรับรู้ PVDF.....46
5.1.1	การตอบสนองต่อความถี่.....50
5.1.2	การวัดอุณหภูมิโดยใช้ตัวรับรู้ไพโรอิเล็กทริก PVDF54
5.2	การทดสอบการทำงานของเครื่องตรวจจับผู้บุกรุก.....60
5.3	ผลการทดสอบการทำงานของวงจร.....61
5.4	ผลการทดสอบการทำงานของเครื่องตรวจจับผู้บุกรุกในเขตหวงห้าม.....64
6	บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....68
	รายการอ้างอิง.....70
	ภาคผนวก72
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....82

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1	การเกิดโพลาริเซชันเมื่อวางสารไดอิเล็กทริกในสนามไฟฟ้า.....5
รูปที่ 2.2	วงแห่งความล้า (Hysteresis loop) ของสารเฟอร์โรอิเล็กทริก.....6
รูปที่ 2.2.1	โครงสร้างโมเลกุลของสายโซ่ PVDF แบบ II (α - phase).....8
รูปที่ 2.2.2	โครงผลึกและเซลล์หน่วยของ PVDF แบบ II (α - phase).....9
รูปที่ 2.2.3	โครงสร้างโครงผลึกของ PVDF แบบ I (β - phase).....10
รูปที่ 2.2.4	การจัดเรียงตัวโมเลกุลของ PVDF แบบ III (γ - phase).....11
รูปที่ 2.2.5	การจัดเรียงตัวโมเลกุลของ PVDF แบบ IV (δ - phase).....11
รูปที่ 2.2.6	แผนภาพแสดงการเปลี่ยนโครงผลึกต่างๆของ PVDF.....12
รูปที่ 2.3.1	ฟิล์มไพโรอิเล็กทริกในสภาพทั่วไป.....14
รูปที่ 2.3.2	ฟิล์มไพโรอิเล็กทริกที่อุณหภูมิ T เมื่ออิเล็กโทรดทั้งสองถูกลัดวงจร.....15
รูปที่ 2.3.3	ประจุที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าของฟิล์มไพโรอิเล็กทริก เมื่อต่อความต่างศักย์ V.....16
รูปที่ 2.3.4	ฟิล์มไพโรอิเล็กทริก เมื่ออุณหภูมิของฟิล์มเพิ่มขึ้น จะมีกระแสไฟฟ้าไหลจากอิเล็กโทรดด้านล่างไปอิเล็กโทรดด้านบน.....19
รูปที่ 3.1.1	ลักษณะของการแผ่รังสีของวัตถุดำ ที่ อุณหภูมิต่างๆ กัน.....20
รูปที่ 3.1.2	สเปกตรัมของแสง.....23
รูปที่ 3.2.1	ตัวรับรู้แบบไพโรอิเล็กทริกขณะถูกกระตุ้นด้วยรังสีอินฟราเรด.....24
รูปที่ 3.2.1	การทำงานของตัวรับรู้ไพโรอิเล็กทริก.....26
รูปที่ 3.2.3	ระบบตรวจวัดแบบไพโรอิเล็กทริกทั่วไป.....26
รูปที่ 3.2.4	กราฟการตอบสนองของตัวรับรู้ไพโรอิเล็กทริกต่อสัญญาณความถี่ต่างๆกัน.....30
รูปที่ 3.3.1	ตัวอย่างสเปกตรัมค่า D^* ของวัสดุชนิดต่างๆ33
รูปที่ 4.1	แผนผังการทำงานของเครื่องตรวจจับผู้บุกรุก.....37
รูปที่ 4.1.1	ภาพขั้วสำหรับวางฟิล์ม PVDF เพื่อนำไปใช้งาน.....38
รูปที่ 4.1.2	แผ่นสะท้อนที่ช่วยในการโฟกัสคลื่นให้ตัวรับรู้.....39
รูปที่ 4.2.1	วงจรภายในของตัวรับรู้.....40
รูปที่ 4.3.1	ความเร็วในการเคลื่อนที่ของมนุษย์และความถี่ ของสัญญาณที่ได้.....42
รูปที่ 4.3.2	วงจรรองความถี่แบบแถบผ่าน.....43
รูปที่ 4.4.1	วงจรเปรียบเทียบแรงดันแบบ 2 ด้าน.....44
รูปที่ 4.4.2	วงจรเตือนภัยแบบชั่วคราว (momentary alarm).....45

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.1.1	ระบบที่ใช้ ทำการทดลองศึกษาการตอบสนองของตัวรับรู้ PVDF ต่อแหล่งกำเนิดรังสีต่างกัน.....	47
รูปที่ 5.1.2	กราฟสัญญาณเอาต์พุตจากตัวรับรู้ PVDF เมื่อเปลี่ยนแหล่งแผ่รังสีต่างกัน.....	49
รูปที่ 5.1.3	ระบบที่ใช้ ทำการทดลองศึกษาการตอบสนองของตัวรับรู้ PVDF กับความถี่.....	50
รูปที่ 5.1.4	ภาพถ่ายสัญญาณจากตัวรับรู้ PVDF ไพโรอิเล็กทริก ผ่านจอออสซิลโลสโคป....	51
รูปที่ 5.1.5	การตอบสนองของตัวรับรู้ไพโรอิเล็กทริกที่ ความถี่ตั้งแต่ 1 – 40 Hz ของแหล่งกำเนิดหลอดไส้ทั้งสแตน.....	52
รูปที่ 5.1.6	การตอบสนองของตัวรับรู้ไพโรอิเล็กทริกที่ ความถี่ตั้งแต่ 1 – 40 Hz ของแหล่งกำเนิด He-Ne laser.....	53
รูปที่ 5.1.7	ความสัมพันธ์ของความต้านทาน $\frac{R}{R_0}$ กับอุณหภูมิของไส้หลอด T โดยทดลองกับหลอดไส้ทั้งสแตนขนาด 100 วัตต์ มีความต้านทานวัตต์ที่อุณหภูมิห้อง 29 องศาเซลเซียสเท่ากับ 40 โอห์ม.....	54
รูปที่ 5.1.8	กราฟระหว่าง $\text{Log}P - \text{Log}T$	55
รูปที่ 5.1.9	ระบบ สำหรับทดสอบการใช้ตัวรับรู้ไพโรอิเล็กทริกวัดการแผ่รังสีจากหลอดไส้ทั้งสแตน.....	56
รูปที่ 5.1.10	กราฟผลการทดลองแสดงค่าความต่างศักย์จากตัวรับรู้เทียบกับอุณหภูมิของไส้หลอด.....	58
รูปที่ 5.1.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์จากตัวรับรู้เทียบกับอุณหภูมิไส้หลอดยกกำลังสี่.....	59
รูปที่ 5.2.1	รูปร่างภายนอกของเครื่องตรวจจับฝุ่นกรุก.....	60
รูปที่ 5.2.2	ส่วนประกอบภายในของวงจรควบคุม.....	60
รูปที่ 5.3.1	สัญญาณขาเข้า (กราฟเส้นบน) และขาออก (กราฟเส้นล่าง) จากวงจรขยายและกรองความถี่ลำดับที่ 1	61
รูปที่ 5.3.2	สัญญาณขาเข้า (กราฟเส้นบน) และขาออก (กราฟเส้นล่าง) จากวงจรขยายและกรองความถี่ลำดับที่ 2	62
รูปที่ 5.3.3	สัญญาณขาเข้า (กราฟเส้นบน) และขาออก (กราฟเส้นล่าง) จากวงจรขยายและกรองความถี่ลำดับที่ 3	62
รูปที่ 5.3.4	สัญญาณขาเข้า (กราฟเส้นบน) และขาออก (กราฟเส้นล่าง) จากวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ.....	63

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.4.1	ระดับความแรงของสัญญาณเมื่อ ทดสอบฉายแสงที่ทำมุมต่าง ๆ กับหน่วยรับรังสี.....	64
รูปที่ 5.4.2	ลักษณะรูปคลื่น(wave form) จากวงจรขยายและกรองความถี่ เมื่อผู้บุกรุก เคลื่อนที่เร็ว(run) ช้า(walk) และช้ามาก (slow motion).....	65
รูปที่ 5.4.3	ผลการทำงานของเครื่องตรวจจับผู้บุกรุก ในกรณีที่ผู้บุกรุกเคลื่อนไหวแบบช้า ในระยะ 1-7 เมตร	66



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1.1	ค่าสภาพการเปล่งรังสี e (emissivity) ของสารต่างๆ..... 21
ตารางที่ 3.3.1	ตัวอย่างลักษณะสมบัติของตัวรับรู้รังสีอินฟราเรดชนิดต่างๆ34
ตารางที่ 3.3.2	สมบัติของสารไพโรอิเล็กทริกชนิดต่างๆ.....36
ตารางที่ 5.1.1	สมบัติทางไพโรอิเล็กทริกของฟิล์ม PVDF ที่ใช้สร้างตัวรับรู้.....46
ตารางที่ 5.1.2	ผลการตอบสนองของตัวรับรู้ไพโรอิเล็กทริก PVDF.....50
ตารางที่ 5.1.3	ผลการทดลองแสดงค่าความต่างศักย์จากตัวรับรู้เทียบกับอุณหภูมิ ของไส้หลอด.....57
ตารางที่ 5.4.1	ความคลาดเคลื่อนในการตรวจจับผู้บุกรุกที่ระยะ 4 เมตร เมื่อผู้บุกรุก เคลื่อนไหวต่างกันในเวลากลางวันและกลางคืน.....67

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

การเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้วัสดุไพโรอิเล็กทริก เป็นที่รู้จักกันดีมาตั้งแต่โบราณ ในศตวรรษที่ 18 มีการพบว่าพลอยสี (tourmaline) เมื่อทำให้ร้อนจะเกิดไฟฟ้าขึ้นได้ ในปี ค.ศ. 1824 เซอร์ เดวิด บรีวสเตอร์ (Sir David Brewster) สังเกตว่าปรากฏการณ์ดังกล่าวยังเกิดขึ้นได้ในผลึกหลายชนิด และได้ให้ชื่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ว่า ปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริก (pyroelectric effect) โดยลอร์ด เคลวิน (Lord Kelvin) ให้ความเห็นว่าเป็นปรากฏการณ์นี้เกิดจากผลึกมีโพลาริเซชันถาวร (permanent polarization)

ปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริก พบได้ในผลึกควอตซ์ (quartz) แบเรียมไททาเนต (barium titanate, BaTiO₃) ไตรไกลซีนซัลเฟต (triglycine sulfate, TGS) หรือจากเซรามิก (ceramic) เช่น เลดเซอร์โคเนตไททาเนต (lead zirconate titanate, PZT) นอกจากนี้ยังพบในสารพอลิเมอร์แต่มีสภาพไพโรอิเล็กทริกไม่สูงมากนัก จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1969 คาวาอิ (H. Kawai) ได้ค้นพบปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric) ที่แรงในพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นคือ พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (polyvinylidene fluoride) มีชื่อย่อว่า PVDF หรือ PVF₂ แผ่นฟิล์ม PVDF ที่มีสูตรโครงสร้างเป็น (-CH₂CF₂-)_n หลังจากที่ผ่านมากรรมวิธีทางกายภาพที่เหมาะสม คือ ยืด อบ และจัดจั่นโดยสนามไฟฟ้า จะเกิดสมบัติไพโรอิเล็กทริก (pyroelectric) ขึ้นในฟิล์ม คือมีผลการตอบสนองทางไฟฟ้าเมื่ออุณหภูมิของฟิล์มเกิดการเปลี่ยนแปลง

ในปี 1970 นักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกันชื่อ เบอร์กแมน (J.G. Bergman) และนักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่นชื่อนากามูระ (K. Nagamura) ต่างทำการทดลองและได้ทำการทดลองศึกษาสภาพไพโรอิเล็กทริกในฟิล์ม PVDF พบว่าสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกของฟิล์ม PVDF มีค่าต่ำกว่าใน TGS และ PbTiO₃ แต่ PVDF ก็มีสมบัติหลายอย่างที่ที่น่าสนใจ ได้แก่

1. สามารถดัดแปลงให้มีรูปร่างต่างๆได้ตามต้องการ
2. มีน้ำหนักเบา ความยืดหยุ่นและความทนทานสูง
3. สามารถทำให้มีขนาดบางมาก (น้อยกว่า 10 μm)
4. การผลิตไม่ต้องใช้เทคโนโลยีสูง

ปัจจุบันสภาพไฟโวลต์ใน PVDF ยังได้รับการพัฒนาให้สูงขึ้น โดยการผสมสารพอลิเมอร์ PVDF กับพอลิเมอร์ร่วม (copolymer) เช่น ไตรฟลูออโรเอทิลีน (trifluoroethylene) กลายเป็น P(VDF/TrFE) ทำให้ได้ประสิทธิภาพไฟโวลต์สูงกว่าเดิม การนำ PVDF ไปใช้งานด้านไฟโวลต์ทำได้หลายด้าน เช่น การนำไปตรวจจับรังสีอินฟราเรดในเครื่องเตือนเพลิงไหม้ เครื่องตรวจจับผู้บุกรุก ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งาน ได้มีการนำ PVDF ไปเคลือบลงบนซิลิกอน ซับสเตรตในอุปกรณ์มอสเฟต (mosfet) เพื่อทำเป็นตัวรับรังสีอินฟราเรดแบบต่างๆ โดยมีทั้งแบบเดี่ยว (single) และแบบแถวลำดับ (array) ซึ่งสามารถนำไปใช้ในงานด้านสร้างภาพถ่ายจากความร้อน (thermal imaging) ได้ (Wang,1988)

1.1 แนวเหตุผล

ร่างกายมนุษย์ตามปกติมีอุณหภูมิภายในร่างกาย 37 องศาเซลเซียส วัตถุที่มีอุณหภูมิสูงกว่า ศูนย์องศาเซลเซียสจะแผ่รังสีตามกฎการแผ่รังสีของวัตถุดำ เช่นเดียวกันกับร่างกายมนุษย์เปล่งรังสีในช่วงอินฟราเรดออกมาที่ตรวจวัดได้ โดยการตรวจจับรังสีอินฟราเรด ก็สามารถบ่งชี้ว่ามีบุคคลหรือวัตถุอื่นแปลกปลอมเข้ามาใกล้หรือไม่ ถ้ามีการเคลื่อนไหวจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มของรังสีอินฟราเรด และถ้าเครื่องตรวจวัดสามารถตรวจจับรังสีที่มาจากแหล่งที่มีการเคลื่อนไหว ก็หมายถึงมีผู้บุกรุกเครื่องจะส่งสัญญาณเตือนภัย

ฟิล์ม PVDF เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นตัวรับรังสีในการตรวจจับรังสีอินฟราเรดจากผู้บุกรุก ในงานด้านสร้างอุปกรณ์เตือนความปลอดภัย ฟิล์ม PVDF มีข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับสารไฟโวลต์ชนิดเซรามิก เช่น PZT คือ มีความยืดหยุ่นสูง จัดรูปทรงได้ง่าย และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่ำ ฟิล์ม PVDF สามารถรับรังสีอินฟราเรดได้หลายความถี่ ต่างจากตัวรับรังสีอินฟราเรดแบบเดิมที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ ซึ่งตอบสนองเฉพาะรังสีอินฟราเรดที่มีความถี่เท่ากับหรือสูงกว่าช่องว่างพลังงาน (band gap) ของสารเท่านั้น

ในงานวิจัยที่ผ่านมา ได้นำแผ่นฟิล์ม PVDF มาประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์ต่างๆ เช่น สวิตช์สัมผัส เครื่องเตือนอัคคีภัย ที่ใช้งานได้อย่างดี ในขณะที่สำหรับเครื่องตรวจจับรังสีอินฟราเรดจากผู้บุกรุกยังมีปัญหา เนื่องจากรังสีอินฟราเรดจากตัวผู้บุกรุกมีค่าต่ำและใกล้เคียงกับสัญญาณจากสิ่งแวดล้อม ดังนั้นเครื่องมือตรวจจับรังสีอินฟราเรดจากผู้บุกรุกที่มีผู้ประดิษฐ์แล้ว ยังคงทำงานผิดพลาดโดยส่งเสียงเตือนเองแม้ไม่มีผู้บุกรุก ในการวิจัยนี้จะทำการพัฒนาออกแบบวงจรที่เหมาะสม

เพื่อลดปัญหาดังกล่าวที่เคยเกิดขึ้น เพื่อให้ได้เครื่องตรวจจับสนิวฟราเรดจากที่ใช้ฟิล์ม PVDF เป็นตัวรับรู้ โดยสามารถเตือนภัยได้อย่างถูกต้อง

1.2 วัตถุประสงค์

พัฒนาเครื่องตรวจจับสนิวฟราเรดจากตัวผู้บุกรุก โดยใช้ฟิล์ม PVDF ไพโรอิเล็กทริก เป็นตัวรับรู้ เพื่อทำการเตือนภัยได้ทันเวลา

1.3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน

- 1.3.1 ศึกษาค้นคว้าผลงานที่มีอยู่เดิม และ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องจากเอกสาร
- 1.3.2 ศึกษาการตอบสนองของรังสีอินฟราเรดของฟิล์มPVDF และพัฒนาให้ฟิล์มมีความไวกับรังสีอินฟราเรด ให้ผลตอบสนองเป็นสัญญาณไฟฟ้าให้มากที่สุด
- 1.3.3 พัฒนาโครงสร้าง หน่วยรับรังสี เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจจับ
- 1.3.4 ศึกษาด้านสัญญาณรบกวนต่างๆที่มีผลต่อฟิล์ม PVDF ทั้งนี้การตอบสนองของฟิล์มต่อสัญญาณรบกวนต้องน้อยกว่าการตอบสนองสัญญาณจากผู้บุกรุกโดยตรง
- 1.3.5 พัฒนาวงจรีเล็กทรอนิกส์ เพื่อเปลี่ยนสัญญาณรังสีอินฟราเรดที่กระทบกับฟิล์ม (เนื่องจากผู้บุกรุก) ให้เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่มีขนาดพอเหมาะ พัฒนาระบบเพื่อลดสัญญาณรบกวน เลือกใช้วัสดุอิเล็กทรอนิกส์ที่มีคุณภาพ หาได้ในท้องตลาด และราคาพอควร
- 1.3.6 ตรวจสอบการทำงานของวงจร โดยลองตั้งในสถานที่จริง ตรวจสอบความน่าเชื่อถือ (reliability) ของเครื่องมือ
- 1.3.7 ปรับเปลี่ยนออกแบบใหม่เพื่อแก้ไขสิ่งบกพร่องที่มี จนได้เครื่องมือที่ใช้งานได้ดี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1.4.1 ศึกษาฟิล์มไพโรอิเล็กทริก PVDF เพื่อใช้ในการออกแบบเป็นตัวรับรู้ในเครื่องตรวจจับรังสีอินฟราเรดที่แผ่จากร่างกายมนุษย์
- 1.4.2 สร้างเครื่องมือตรวจจับรังสีอินฟราเรดจากผู้บุกรุก ให้สามารถจับความเคลื่อนไหวของผู้บุกรุกได้
- 1.4.3 ศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับเครื่องตรวจจับรังสีอินฟราเรดจากผู้บุกรุก เช่น ระยะห่างในการตรวจจับ ความไวของเครื่องมือ สภาพะที่ใช้งานได้ดี

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

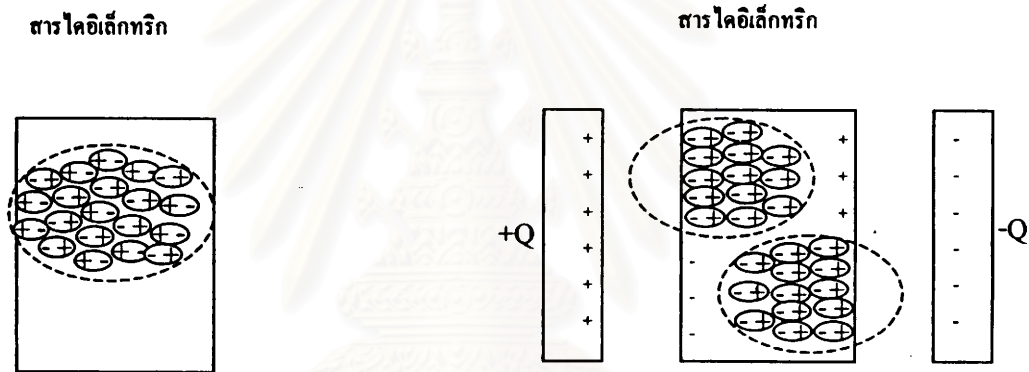
เกิดการศึกษและพัฒนา เครื่องตรวจจับรังสีอินฟราเรดจากร่างกายมนุษย์โดยฟิล์ม PVDF องค์ความรู้กรรมวิธีการปรับปรุงคุณภาพของฟิล์ม PVDF ให้เหมาะสมกับการใช้งานเครื่องตรวจจับรังสีอินฟราเรดที่ใช้งานได้ราคาถูกลง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

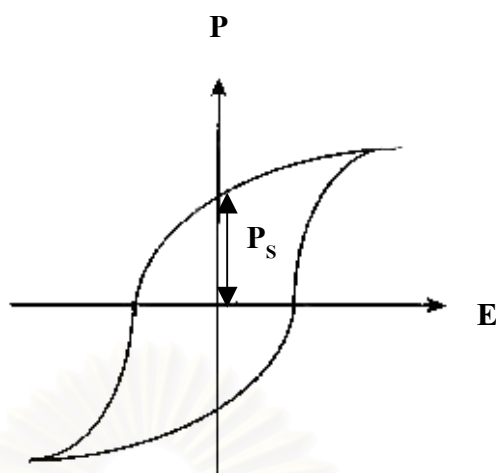
ฟิล์มไฟโรอิเล็กทริกพอลิเมอร์

โมเลกุลจำนวนมากในสารไดอิเล็กทริก (dielectric) จะแสดงสภาพเป็นขั้วคู่หรือไดโพล สารไดอิเล็กทริกโดยทั่วไปจะมีผลรวมของไดโพลโมเมนต์ (dipole moment) ต่อปริมาตร หรือโพลาไรเซชัน (polarization) เป็นศูนย์ เนื่องจากไดโพลจะวางตัวในลักษณะสุ่ม (random) จนทำให้ผลรวมของไดโพลหักล้างกันไปจนเป็นศูนย์ในที่สุด และเมื่อให้สนามไฟฟ้าเข้าไป กลุ่มไดโพลจะเรียงตัวในทิศทางของสนามไฟฟ้า ดังรูป 2.1 และโดยทั่วไปเมื่อสนามไฟฟ้าเป็นศูนย์ทำให้โพลาไรเซชันมีค่าลดลงเป็นศูนย์ด้วย



รูปที่ 2.1 การเกิดโพลาไรเซชันเมื่อวางสารไดอิเล็กทริกในสนามไฟฟ้า

มีสารไดอิเล็กทริกบางชนิด เมื่อนำสนามไฟฟ้าออกไปแล้วสารยังคงมีโพลาไรเซชันค้างอยู่ โพลาไรเซชันภายในสารไดอิเล็กทริกที่ยังเหลืออยู่นี้ เรียกว่าโพลาไรเซชันชนิดเกิดขึ้นเอง (spontaneous polarization) และสารไดอิเล็กทริกที่มีโพลาไรเซชันชนิดเกิดขึ้นเองนี้เรียกว่า สารเฟอร์โรอิเล็กทริก (ferroelectric material) รูป 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าที่ให้แก่สารไดอิเล็กทริกและโพลาไรเซชันในเนื้อสาร จากรูปจะเห็นว่าหลังจากเพิ่มสนามไฟฟ้าแล้วลดสนามไฟฟ้าลงจนเป็นศูนย์จะมีโพลาไรเซชันตกค้างอยู่ P_s คือ โพลาไรเซชันชนิดเกิดขึ้นเอง



รูปที่ 2.2 วงแห่งความล่า (hysteresis loop) ของสารเฟอร์โรอิเล็กทริก

2.1 ทฤษฎีไฟโรอิเล็กทริก

โดยทั่วไปสารเฟอร์โรอิเล็กทริกสามารถแสดงสมบัติไฟโรอิเล็กทริกได้ วัสดุไฟโรอิเล็กทริกจะมีการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง โดยโพลาริเซชันชนิดขึ้นเกิดเองของวัสดุไฟโรอิเล็กทริกจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น และจะมีค่าเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิคูรี (Curie temperature) สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากเมื่อเกิดการเพิ่มของอุณหภูมิทำให้โมเลกุลในผลึกเกิดการเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบมากยิ่งขึ้น เป็นผลให้ผลรวมของไดโพลโมเมนต์ลดลง ทำให้เกิดการลดลงของโพลาริเซชัน

สมบัติไฟโรอิเล็กทริก (pyroelectric) คือ ผลทางไฟฟ้าเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ดังนั้น อัตราการเปลี่ยนแปลงของโพลาริเซชันชนิดเกิดเอง เทียบกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ก็คือ ค่าสัมประสิทธิ์ไฟโรอิเล็กทริก (pyroelectric coefficient) p

$$p = \frac{dP}{dT} \quad (2.1.1)$$

เมื่อไม่มีความเค้น ($X = 0$) โพลาริเซชันของสารไพโรอิเล็กทริก จะขึ้นกับสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิ คือ $P(E, T)$ โดยการกระจายแบบอนุกรมเทเลอร์ (Taylor series expansion) รอบจุดที่สนามไฟฟ้าเป็นศูนย์และ อุณหภูมิเริ่มต้นเป็น T_0 จะได้

$$\begin{aligned} P(E, T) &= P(0, T_0) + \left(\frac{\partial P}{\partial E} \right)_{T=T_0} E + \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_{E=0} dT \\ &= P_s + \chi \varepsilon_0 E + p(T - T_0) \end{aligned} \quad (2.1.2)$$

โดย χ คือ สภาพซึมซับได้ (electric susceptibility)

ε_0 คือ สภาพยอมของสุญญากาศ (permittivity)

P_s คือ โพลาริเซชัน เมื่อ $E = 0$, $T = T_0$

ในกรณีสารไม่ได้รับความเค้น ($x=0$) ได้ว่า $P_s = P_r$ โดย P_r คือ โพลาริเซชันตกค้าง (residual polarization) จากสมการ (2.1.2) เมื่อให้ $P_s = P_r$ สามารถเขียนได้เป็น

$$P - P_r = \chi \varepsilon_0 E + p \Delta T \quad (2.1.3)$$

เมื่อ P_r คือ เป็นค่าโพลาริเซชันตกค้างที่เหลืออยู่ขณะที่ $E = 0$, $T = T_0$, $X = 0$

สมการ (2.1.3) หมายความว่าถ้ามีรังสีอินฟราเรดมาตกกระทบฟิล์ม ทำให้ฟิล์มร้อนขึ้น อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป ΔT เกิดการสั่นไหวของโมเลกุลภายในฟิล์มเพิ่มขึ้น ทำให้โพลาริเซชันของฟิล์มเปลี่ยนแปลงไป

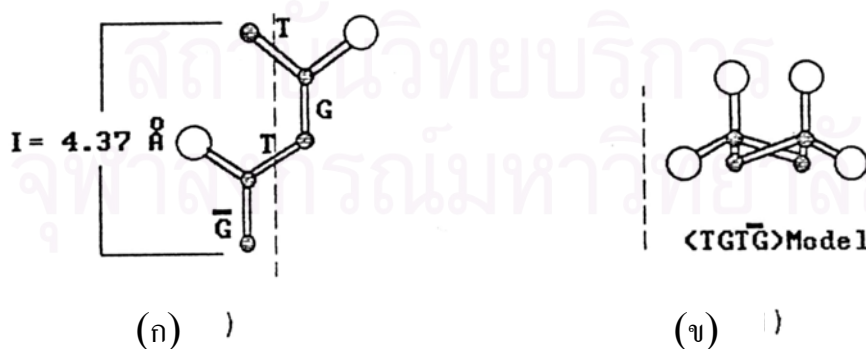
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2 พอลิเมอร์ไนลีนฟลูออไรด์

หลังจากที่ได้ทราบทฤษฎีไพโรอิเล็กทริกมาแล้ว ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงสารไพโรอิเล็กทริกที่เราสนใจ สมบัติไพโรอิเล็กทริกพบได้ในสารเซรามิกและพอลิเมอร์หลายชนิด แต่สภาพไพโรอิเล็กทริกที่พบในพอลิเมอร์ยังไม่สูงมากนัก จนกระทั่งปี ค.ศ. 1969 นักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่นชื่อ คาวาอิ (Kawai) ได้สังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่ มีชื่อว่า พอลิไวไนลีนฟลูออไรด์ (polyvinylidene fluoride) หรือ PVDF ซึ่งเมื่อผ่านกรรมวิธีทางกายภาพที่เหมาะสมสามารถทำให้มีสภาพไพโรอิเล็กทริกสูงขึ้น สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้

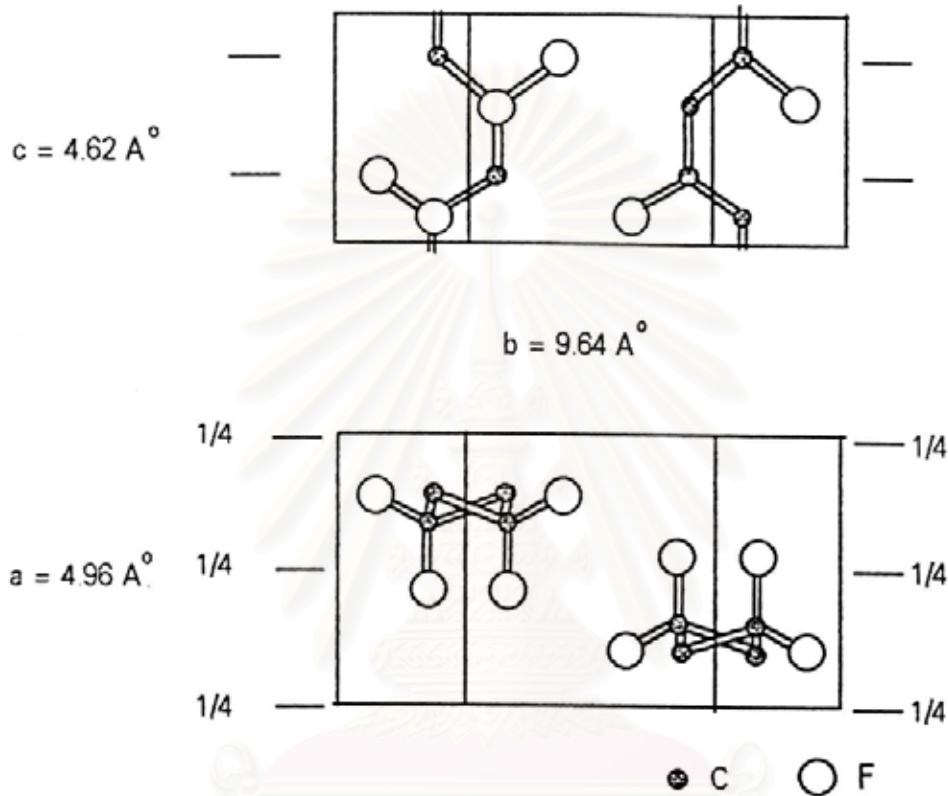
2.2.1 โครงสร้างผลึกของ PVDF

โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์ชนิดนี้มีลักษณะซับซ้อน เนื่องจากมีถึง 4 แบบด้วยกัน PVDF เป็นพอลิเมอร์กิ่งผลึก ประกอบด้วยมอนอเมอร์ $(-CH_2CF_2-)_n$ ต่อกันเป็นสายโซ่ยาวถึง 100 เท่าของความหนาของผลึกพับทบไปมา ที่อุณหภูมิสูง PVDF จะหลอมเหลว และเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า $150^{\circ}C$ สารนี้จะแข็งตัวเกิดโครงสร้างแบบ สเฟียรูไรท์ (spherulite) คือมีส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphous) และผลึก (crystal) ปนกัน ผลึกแบบนี้จะมีโครงสร้างแบบ II หรือ เฟสแอลฟา (α - phase) การวางตัวของสายโซ่อะตอมคาร์บอนเป็นแบบ $TGT\bar{G}$ (Takahashi,1983) แสดงดังรูปที่ 2.2.1 ซึ่งถ้ามองรูป 2.2.1(ก) จากด้านบน จะเห็นอะตอมต่างๆ เป็นดังรูป 2.2.1(ข) โดยไม่ได้แสดงอะตอมไฮโดรเจน ในรูปวงกลมขนาดเล็กและใหญ่แสดงอะตอมของคาร์บอนและฟลูออรีนตามลำดับ



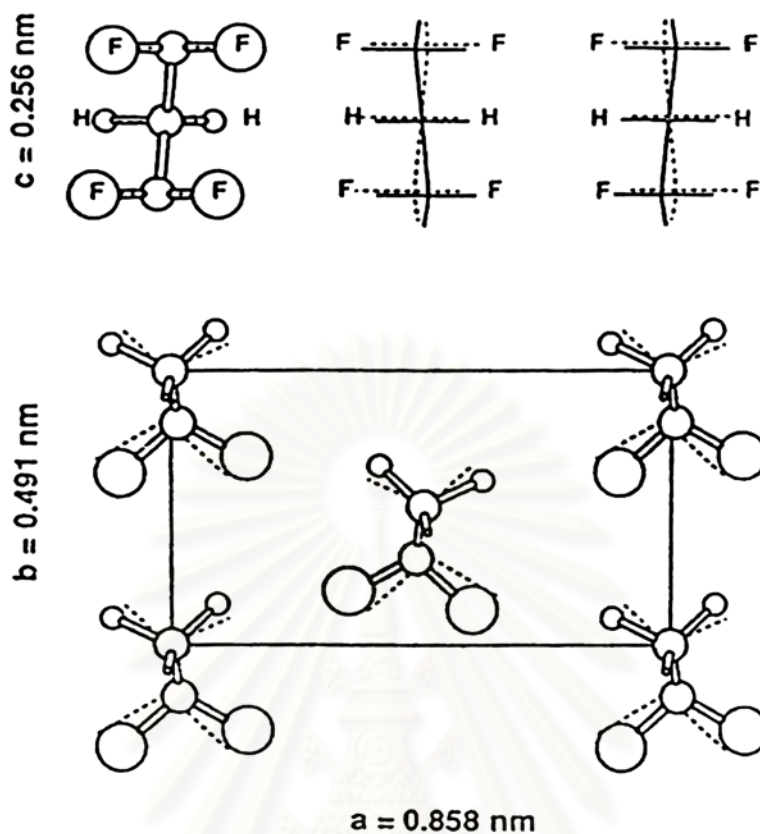
รูปที่ 2.2.1 โครงสร้างโมเลกุลของสายโซ่ PVDF แบบ II (α - phase)

เซลล์หน่วย (unit cell) ของผลึกนี้เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular lattice) ดังรูปที่ 2.2.2 แต่ละเซลล์หน่วยประกอบด้วยสายโซ่โพลีเมอร์สองสาย และเนื่องจากทิศทางของโมเมนต์ขั้วคู่ของทั้งสองสายมีทิศสวนกันจึงหักล้างกันหมด ทำให้ผลึกแบบ II นี้ ไม่แสดงขั้ว ไม่แสดงสมบัติไพโรอิเล็กทริก



รูปที่ 2.2 โครงผลึกและเซลล์หน่วยของ PVDF แบบ II (α - phase)

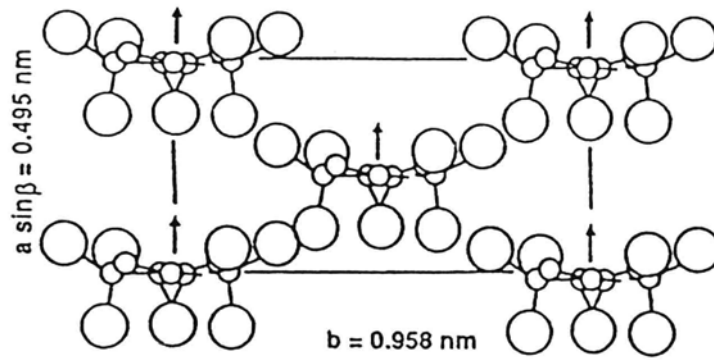
ถ้าดึงฟิล์ม PVDF ซึ่งประกอบด้วยโครงผลึกแบบแอลฟา ให้ยืดออก 3 - 4 เท่า ที่อุณหภูมิประมาณ 80°C จากนั้นอบฟิล์มที่อุณหภูมิประมาณ 100°C เป็นเวลา 4 - 5 นาที จะทำให้สายโซ่คาร์บอนยืดออกไปตามแนวแรงที่ดึง โครงสร้างแบบ II จะเปลี่ยนเป็นแบบ I (β - phase) โดยอะตอมของคาร์บอน จะวางตัวซิกแซกอยู่ในระนาบที่ตั้งฉากกับกระดาษดังรูปที่ 2.2.3 ส่วนอะตอมของฟลูออรีนและคาร์บอนจะวางตัวขึ้นลงดังรูป จากการศึกษาย่างละเอียดโดยรังสีเอกซ์พบว่า เนื่องจากรัศมีแวนเดอร์วาลส์ของอะตอมฟลูออรีนเท่ากับ 1.35 \AA ซึ่งใหญ่เกินกว่าที่จะบรรจุในสายโซ่แบบนี้ อะตอมคาร์บอนจึงวางตัวทำให้สายโซ่โพลีเมอร์บิดไปเล็กน้อย ดังรูป 2.2.3



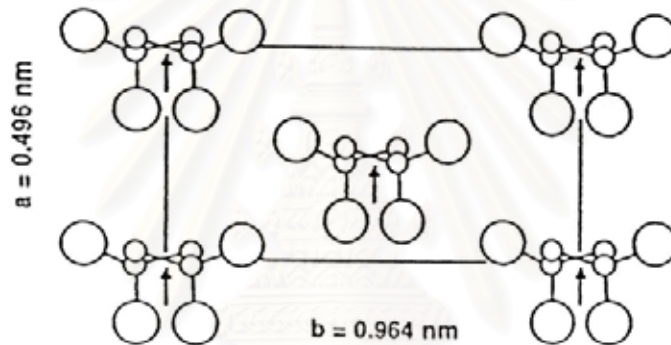
รูปที่ 2.2.3 แสดงโครงสร้างโครงผลึกของ PVDF แบบ I (β - phase)

เซลล์หน่วยของผลึกเฟสเบตา แกนของสายโซ่คาร์บอนคือแกน c แต่ละเซลล์หน่วยประกอบด้วยสายโซ่โมเลกุล 2 สายที่มีแนวขนานกัน เนื่องจากอะตอมของ F มีค่าสภาพทางไฟฟ้าเป็นลบมากกว่าอะตอม C และอะตอม H มีค่าสภาพไฟฟ้าบวกมากกว่าอะตอม C แต่ละมอนอเมอร์จะมีไดโพลโมเมนต์ถาวร ทำให้ผลึกแบบ I (β - phase) นี้มีขั้ว แต่ทิศทางของโมเมนต์ขั้วคู่แต่ละผลึกยังมีทิศแบบสุ่ม ทำให้โพลาริเซชันเป็นศูนย์ จะต้องผ่านการจัดขั้วด้วยสนามไฟฟ้า แผ่นฟิล์มที่ได้จึงจะแสดงสภาพไพโรอิเล็กทริกได้

ผลึกอีก 2 แบบของ PVDF คือ ผลึกแบบ III หรือเฟสแกมมา (γ - phase) และผลึกแบบ IV หรือเฟสเดลตา (δ - phase) โครงสร้างของผลึกทั้งสองแสดงดังรูป 2.2.4 และ รูป 2.2.5 โดยผลึกเฟสแกมมาและเดลตา จะมีไดโพลถาวรแต่น้อยกว่าผลึกเฟสเบตา (Lovinger,1983)

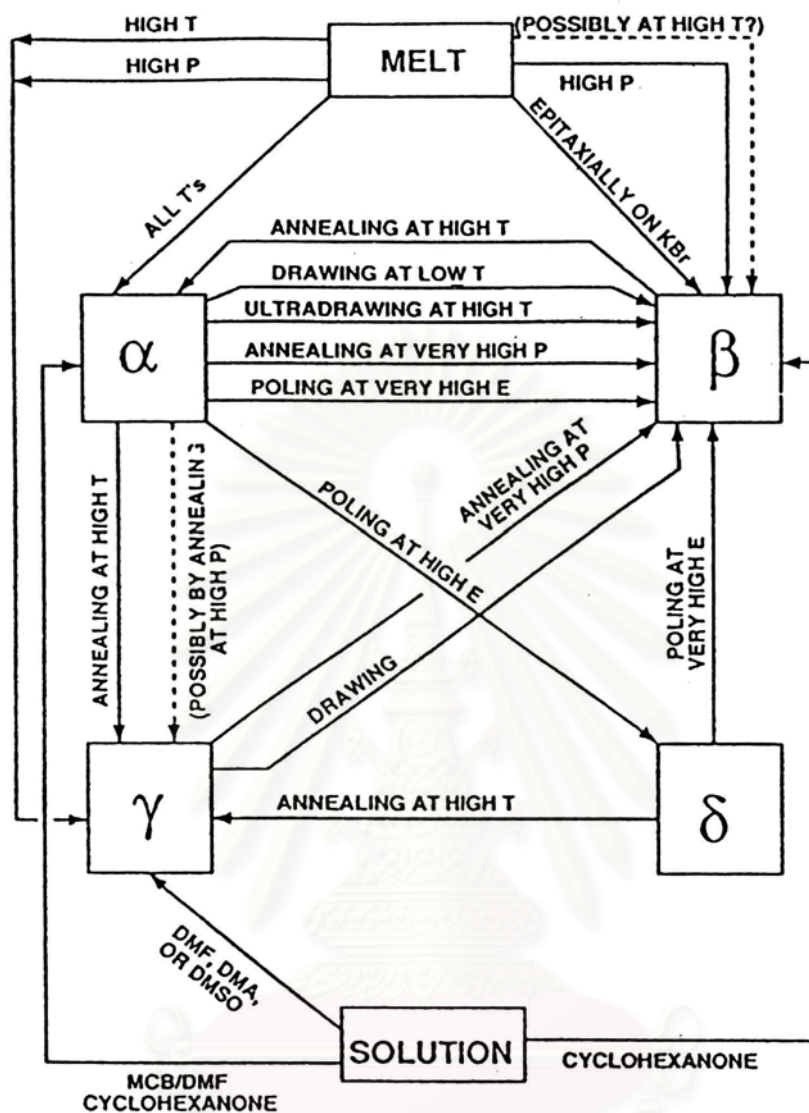


รูปที่ 2.2.4 แสดงการจัดเรียงตัวโมเลกุลของ PVDF แบบ III (γ - phase)



รูปที่ 2.2.5 แสดงการจัดเรียงตัวโมเลกุลของ PVDF แบบ IV (δ - phase)

เนื่องจาก PVDF สามารถเปลี่ยนเฟสเป็นแบบต่าง ๆ ได้ ดังนั้นโลวินเจอร์ ได้พัฒนาแผนภาพขึ้นมาเพื่อช่วยในการอธิบายการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างผลึกเฟสต่างๆของ PVDF (Kepler, 1992) เช่น โดยการยืด การจัดข้อ การอบที่อุณหภูมิสูง และการหล่อฟิล์มในสารละลายต่างชนิดกัน แสดงดังรูป 2.2.6



รูปที่ 2.2.6 แผนภาพแสดงการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกต่างๆของ PVDF (DMF , DMA, DMSO และ MCB คือ ไดเมทิลฟอร์มามาไมด์ (dimethylformamide), ไดเมทิลอะซิตาไมด์(dimethylacetamide), ไดเมทิลซัลฟอกไซด์(dimethyl sulfoxide) ตามลำดับ โดยใช้ไซโคลเฮกซะนอล(cyclohexanone) เป็นตัวทำละลายในการหล่อฟิล์ม

2.2.2 การเตรียมฟิล์มไพโรอิเล็กทริก PVDF

จากหัวข้อที่ผ่านมาได้กล่าวถึงโครงสร้างของ PVDF พบว่าฟิล์ม PVDF ธรรมดา(เฟสแอลฟา) จะไม่มีสมบัติไพโรอิเล็กทริก จะต้องพัฒนาให้ฟิล์มอยู่ในเฟสเบตา ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีผู้ทำการวิจัยพัฒนาแผ่นฟิล์ม PVDF ด้วยเครื่องมือที่ไม่ยุ่งยาก ผลที่ได้พบว่าแผ่นฟิล์มที่พัฒนาได้มีคุณสมบัติที่ดัดเทียบกับฟิล์มมาตรฐาน สามารถนำไปประยุกต์ทำเครื่องมือต่างๆ ได้ ในที่นี้จะกล่าวถึงวิธีการเหล่านั้นพอสังเขป

ฟิล์ม PVDF ที่นำมาใช้ศึกษาสมบัติทางไพโรอิเล็กทริกมีหลายแบบ ที่ผ่านมา PVDF ที่นำมาใช้เป็นสารตั้งเคราะห์สำเร็จรูปจากประเทศญี่ปุ่น มีลักษณะเป็นฟิล์มบางใสหนาประมาณ 72 ไมโครเมตร (ชูศรี,2537) นอกจากนี้ ยังมีการเตรียมฟิล์ม PVDF เองจากแผ่น PVDF หนาประมาณ 5 มิลลิเมตร จากการอัดเบ้าจนได้ฟิล์มหนาประมาณ 200 ไมโครเมตร (พูนศักดิ์,2541) โดยขั้นตอนในการพัฒนาฟิล์ม PVDF ธรรมดาให้เป็น PVDF ไพโรอิเล็กทริก ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนคือ

1. ขั้นตอนการยืดฟิล์ม

การยืดฟิล์มทำให้โซโมเลกุลของ PVDF มีความเป็นระเบียบยิ่งขึ้นและทำให้โครงผลึกเปลี่ยนจากเฟสแอลฟาเป็นเฟสเบตา ขั้นตอนการยืดฟิล์มต้องหนีบฟิล์มเข้ากับเครื่องยืด ดังรูป 2.2.7 การยืดฟิล์มที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้ฟิล์มฉีกขาดเพราะฟิล์มจะมีความแข็ง (strength) จึงทำการยืดฟิล์มในน้ำร้อนอุณหภูมิ 80 °C – 90 °C ยืดออกให้ยาวเป็นอัตราส่วน 3.5-4 เท่าของความยาวเดิม เพราะถ้ายืดด้วยอัตราส่วนต่ำกว่านี้การเรียงตัวของโซโมเลกุลจะเป็นระเบียบน้อย ส่วนการยืดด้วยอัตราส่วนมากกว่านี้ จะทำให้ฟิล์มฉีกขาดได้ง่าย จากนั้นอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ประมาณ 5 นาที จะทำให้ความเหนียวของฟิล์มลดลงอย่างมาก และโมเลกุลปรับตัวเข้ากับความยาวใหม่ของฟิล์ม ไม่หดลงเมื่อถอดจากเครื่องยืด

2. ขั้นตอนการทำอิเล็กโทรด

แผ่นฟิล์มที่ผ่านการยืดและอบ จะต้องนำไปจัดขั้วเพื่อให้เกิดทางของโมเมนต์ขั้วคู่ในแผ่นฟิล์มเป็นระเบียบมากขึ้น เพื่อความสะดวกในการจัดขั้วและนำฟิล์มไปใช้งานต่อไป ต้องทำอิเล็กโทรดให้กับฟิล์ม การทำอิเล็กโทรดทำได้หลายแบบ เช่น การเตรียมอิเล็กโทรดโดยใช้วิธีระเหยไออะลูมิเนียมในสุญญากาศ (high vacuum evaporation) การเตรียมอิเล็กโทรดโดยใช้กาวเงิน (silver conductive paint) โดยอิเล็กโทรดที่เตรียมโดยใช้กาวเงินจะมีความหนากว่า ไม่เหมาะในการใช้งานด้านเพียโซอิเล็กทริก แต่สามารถใช้ได้ในงานด้านไพโรอิเล็กทริก การทาเงินไม่ควรทาหนาหนากว่า 10 ไมโครเมตร เพราะจะทำให้รังสีอินฟราเรดไม่สามารถเข้าถึงตัวฟิล์มได้ และทำให้ความ

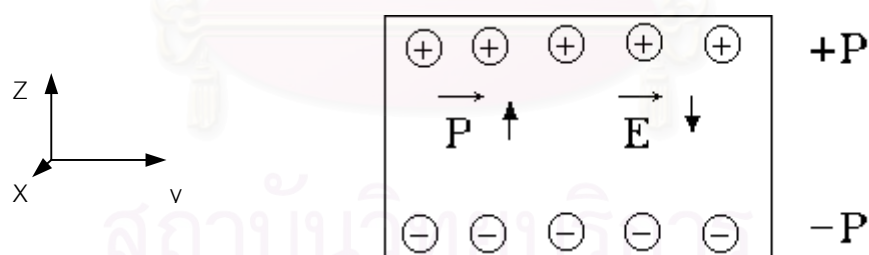
จุความร้อนฟิล์ม(heat capacity) เพิ่มขึ้น เมื่อรับรังสีอินฟราเรดแล้วอุณหภูมิของฟิล์มเปลี่ยนแปลงไปน้อยลง ทำให้สมบัติไพโรอิเล็กทริกลดลงไป

3. ขั้นตอนการจัดตัวของฟิล์ม

ถึงแม้แผ่นฟิล์มที่ผ่านกระบวนการยัดแล้วจะมีโครงสร้างแบบเฟสเบตา ซึ่งมีสภาพขั้วสูงที่สุด แต่ผลึกยังมีทิศของไดโพลโมเมนต์แบบสุ่ม จึงทำให้โพลาริเซชันรวมเป็นศูนย์ จำเป็นต้องทำการจัดขั้ว โดยการผ่านสนามไฟฟ้าความเข้มสูงเข้าไปในเนื้อฟิล์ม ไดโพลโมเมนต์เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้าจะถูกแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้ากระทำในทิศทางของสนาม แผ่นฟิล์มจึงมีโพลาริเซชันไม่เป็นศูนย์

การจัดขั้วมีหลายวิธี(Wang,1988) ในห้องปฏิบัติการได้ใช้วิธีจัดขั้วโดยให้ความร้อน(thermal poling) โดยให้สนามไฟฟ้าแรงสูงที่อุณหภูมิสูงภายในช่วงเวลาพอเหมาะ จากนั้นลดอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิก่อนที่จะนำสนามไฟฟ้าออก เป็นวิธีการผลิตแท่งไฟฟ้า(thermoelectret) ไดโพลถาวรซึ่งขึ้นอยู่กัอุณหภูมิ(dipole orientation) จะถูกแช่แข็งค้างอยู่ภายในแท่งไฟฟ้านั้น และเหนี่ยวนำไดโพลข้างเคียงทำให้เกิดโพลาริเซชันเพิ่มขึ้นจากการเหนี่ยวนำ(induced polarization) ทำให้ฟิล์มมีสภาพไพโรอิเล็กทริกสูงขึ้น

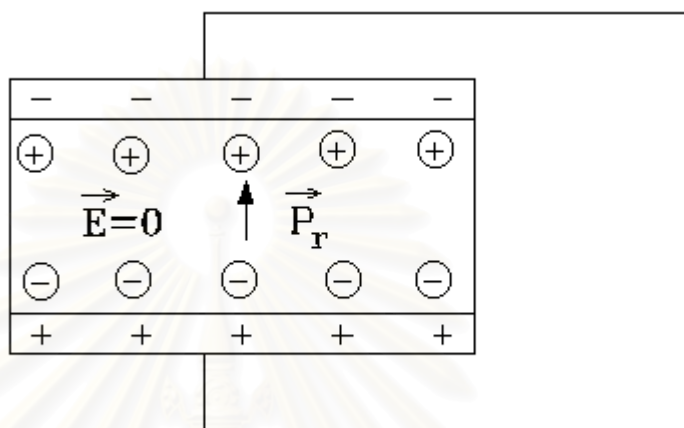
2.3 สัญญาณไฟฟ้าจากฟิล์ม PVDF ไพโรอิเล็กทริก



รูปที่ 2.3.1 ฟิล์มไพโรอิเล็กทริกในสภาพทั่วไป

ฟิล์มไพโรอิเล็กทริก PVDF ที่ด้านบนและด้านล่างของฟิล์มมีโลหะตัวนำเป็นอิเล็กโทรด จากรูป 2.3.1 ได้ขยายความหนาของฟิล์ม P คือโพลาริเซชันของฟิล์มมีทิศขึ้น($+\hat{z}$) และตั้งฉากกับระนาบฟิล์ม (ระนาบ xy) จากทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซ์เวลล์ ให้คิดว่าบริเวณเนื้อสารมีประจุโพลาริเซชัน (polarization charge) ที่ด้านบนและด้านล่างเป็น $\vec{P} \cdot \hat{z}$ หรือ เท่ากับ

$+P$ และ $-P$ ตามลำดับ สนามไฟฟ้าภายในฟิล์มเนื่องจากไดโพลมีค่าเป็น $E = -\frac{P}{\epsilon_0} \hat{z}$ เมื่อ ϵ_0 คือสภาพยอมของสุญญากาศ (permittivity of free space) มีค่าเท่ากับ 8.85×10^{-12} ฟารัดต่อเมตร



รูปที่ 2.3.2 ฟิล์มไพโรอิเล็กทริกที่อุณหภูมิ T เมื่ออิเล็กโทรดทั้งสองถูกลัดวงจร

เมื่อลัดวงจรระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสอง ทำให้สนามไฟฟ้าภายในฟิล์มเป็นศูนย์ (electrically free) แสดงว่าประจุลบจะเคลื่อนย้ายออกจากอิเล็กโทรดด้านล่างขึ้นไปอยู่ที่อิเล็กโทรดด้านบน เมื่อรวมกับประจุโพลาไรเซชันของฟิล์มแล้ว จะอยู่ในสภาพเป็นกลาง (neutralized) และทิ้งประจุบวกไว้ที่ด้านล่าง เมื่อรวมกับประจุโพลาไรเซชันด้านล่างแล้วจะอยู่ในสภาพเป็นกลางเช่นกัน ในขณะนี้โพลาไรเซชันของฟิล์ม P จะเปลี่ยนเป็น P_r หรือโพลาไรเซชันตกค้าง แสดงได้ดังรูปที่ 2.3.2 ถ้าให้ D_r เป็นการกระจัดทางไฟฟ้าที่แผ่นฟิล์มมีทิศ $+\hat{z}$ และ $\pm Q$ เป็นประจุโพลาไรเซชันที่อิเล็กโทรดพื้นที่ A จะได้ $E=0$ และได้ว่า (Mort, 1982)

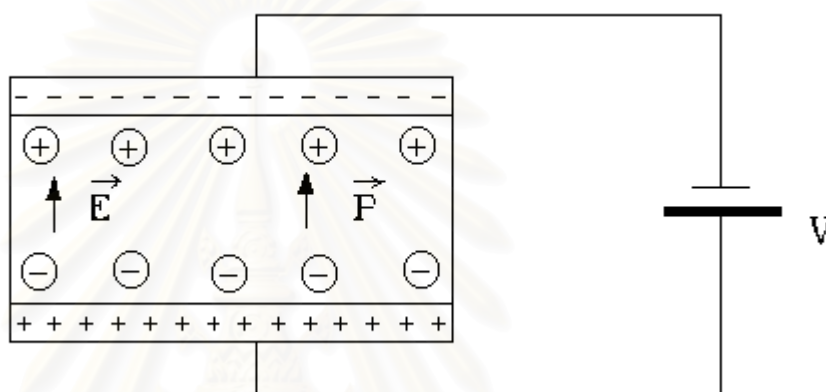
$$D = \frac{Q}{A} = D_r = P_r \quad (2.3.1)$$

เมื่อมีความต่างศักย์จากเซลล์ไฟฟ้า ต่อเข้าระหว่างขั้วไฟฟ้าของสารไพโรอิเล็กทริก จะทำให้เกิดประจุเหนี่ยวนำ $+Q$ และ $-Q$ ขึ้นที่ขั้วบวกและขั้วลบซึ่งมีพื้นที่ A ดังรูป 2.3.3 ประจุเหนี่ยวนำส่วนหนึ่งจะไปหักล้างกับประจุโพลาไรเซชันที่มีอยู่แล้วภายในเนื้อสาร ประจุที่เหลือจะ

ทำให้เกิดสนามไฟฟ้ามีขนาด $E = \frac{V}{b}$ ขึ้นภายในเนื้อสาร ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างประจุเหนี่ยวนำ Q และโพลาริเซชัน P จากทฤษฎีไฟฟ้าสถิต

$$D = \epsilon_0 E + P \quad (2.3.2)$$

โดย D คือ การกระจัดทางไฟฟ้า (electric displacement) และ $D = \frac{Q}{A}$



รูปที่ 2.3.3 ประจุที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าของฟิล์มไพโรอิเล็กทริก เมื่อต่อความต่างศักย์ V

ดังนั้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ΔT จาก สมการ (2.1.3) (2.3.1) และ (2.3.2) จะได้

$$D - D_r = \epsilon_0(1 + \chi)E + p\Delta T \quad (2.3.3)$$

ในที่นี้ $D_r = P_r$ เมื่อ $E = 0$ และ $T = T_0$ และ เนื่องจาก $\epsilon = \epsilon_0(1 + \chi)$ ดังนั้น

$$\Delta D = \epsilon E + p\Delta T \quad (2.3.4)$$

สมการนี้แสดงการเปลี่ยนแปลงการกระจัดไฟฟ้าที่ผ่านฟิล์ม หรือประจุไฟฟ้าจริงต่อพื้นที่ที่เล็ก
 โทรดที่เพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก T เป็น $T + \Delta T$ ปริมาณต่างๆในสมการ(2.3.4) ที่จริง
 เป็น เทนเซอร์ (tensor) ในปริภูมิ 3 มิติ สำหรับพอลิเมอร์ไพโรอิเล็กทริก เมื่อนำมายึดออกตามแนว
 ดิ่ง และใส่สนามไฟฟ้าความเข้มสูงในทิศทางที่ตั้งฉากกับฟิล์ม ($E_1 = E_2 = E_3$) ทำให้ฟิล์มมี

โมเมนต์ขั้วคู่สุทธิอยู่ที่แนว 3 เท่านั้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลงประจุบนผิวแนวที่ 1 (direction of stretch) และแนวที่ 2 (transverse direction) ทำให้ สมการ 2.3.4 เขียนได้เป็น

$$\Delta D_3 = \epsilon_{33} E_3 + p_3 \Delta T \quad (2.3.5)$$

เมื่อมีรังสีอินฟราเรดมาตกกระทบ ทำให้อุณหภูมิของฟิล์มเพิ่มขึ้นจาก T เป็น $T + \Delta T$ ทำให้โพลาริเซชันของฟิล์มเปลี่ยน ถ้าคิดว่าความต้านทานของโวลต์มิเตอร์ที่ใช้มีค่ามาก เหมือนสภาพวงจรเปิด จะเกิดความต่างศักย์และสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองขึ้น โดยค่าความต่างขณะนี้หาได้ โดย กรณีไม่มีการถ่ายเทประจุ (เป็นวงจรเปิด) $\Delta D = 0$ จากสมการ (2.3.4) จะได้ว่า

$$0 = \epsilon E + p \Delta T \quad (2.3.6)$$

ถ้าให้ฟิล์มที่ใช้มีพื้นที่ A ความหนา b ความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองคือ

$$V = b|E| = \frac{|p|b\Delta T}{\epsilon} \quad (2.3.7)$$

ขณะที่ ΔT คงที่ ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรด V และประจุอิสระที่ผิวอิเล็กโทรด $\pm Q$ ในกรณีพิจารณาว่าฟิล์มไพโรอิเล็กทริกเป็นสารไดอิเล็กทริก

$$V = \frac{Q}{C} \quad (2.3.8)$$

โดยที่ C หมายถึงความจุไฟฟ้า กำหนดโดย

$$C = \frac{K\epsilon_0 A}{b} \quad (2.3.9)$$

เมื่อ K คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

จาก (2.3.8) ขณะเกิดการเคลื่อนย้ายประจุ V จะค่อยๆ ลดลง โดย

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{1}{C} \frac{dQ}{dt} \quad (2.3.10)$$

จากกระแส $i = -\frac{dQ}{dt} = \frac{V}{R}$ ดังนั้น $\frac{dV}{dt} = -\frac{VC}{R}$ จากการอินทิเกรตจะได้

$$V = V_0 e^{-\frac{t}{CR}} \quad (2.3.11)$$

พิจารณาฟิล์ม PVDF หนา 30 ไมโครเมตร พื้นที่อิเล็กโทรด 2 ตารางเซนติเมตร ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก K เท่ากับ 12 ความจุของฟิล์มที่คำนวณได้โดยสมการที่ (2.3.9) จะมีค่า 708 พิโกฟารัด ถ้ารั้งสี่ฟาราเดตตกกระทบฟิล์มนี้ทำให้ฟิล์มมีความต่างศักย์ V_0 เท่ากับ 1 โวลต์ และจากโวลต์มิเตอร์ตัวเลขธรรมดาส่วนใหญ่มีความต้านทานภายใน 10 เมกกะโอห์ม วัดความต่างศักย์นี้ตามสมการที่ (2.3.11) แทนค่าความจุของฟิล์มและความต้านทานของมิเตอร์ จะได้ความต่างศักย์ที่โวลต์มิเตอร์อ่านได้เป็น

$$V = e^{-\frac{t}{7.08 \times 10^{-3}}}$$

นั่นคือเพียง 1 วินาทีผ่านไป V ที่ปรากฏบนโวลต์มิเตอร์ลดลงเกือบเป็นศูนย์ เพราะประจุไฟฟ้าเคลื่อนย้ายออกจากฟิล์มอย่างรวดเร็ว ดังนั้นในการวัดความต่างศักย์จากฟิล์มจึงต้องใช้โวลต์มิเตอร์ ซึ่งมีความต้านทานภายในประมาณ 200 เทอราโอห์ม เพื่อให้ได้ค่าเวลาการผ่อนคลายทางไฟฟ้าที่มากขึ้น

โดยทั่วไป ในการวัดกระแสหรือประจุไฟโวลต์มิเตอร์ จะทำโดยการใช้วิธีตัดวงจรระหว่างขั้วทั้งสองของอิเล็กโทรด ทำให้สนามไฟฟ้าในแนวที่ตั้งฉากกับฟิล์มเป็นศูนย์จะได้ว่า

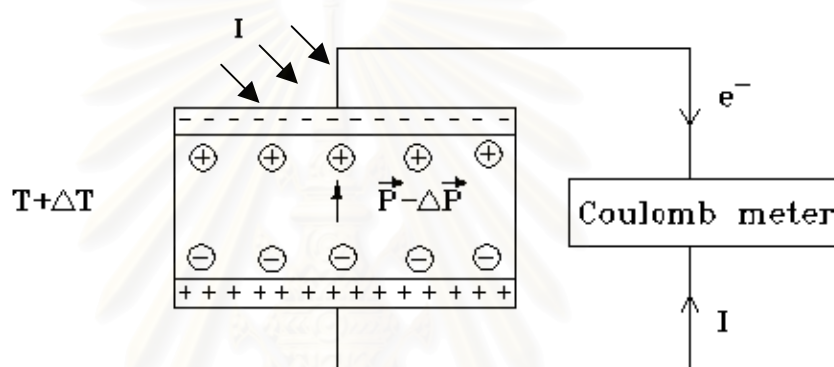
$$\Delta D = \frac{\Delta Q}{A} = p \Delta T$$

ถ้ามีรั้งสี่อินฟาราเรดฉายมาตกกระทบผิวฟิล์ม ตามรูป 2.3.4 ฟิล์มจะร้อนขึ้น ΔT เพื่อให้ E ภายในฟิล์มเป็นศูนย์ จึงต้องมีการเคลื่อนย้ายประจุลบจากอิเล็กโทรดบนลงมาอิเล็กโทรดล่าง ถ้าต่อลวดตัวนำจากผิวฟิล์มเข้าเครื่องวัดประจุ (Coulomb meter) จะสามารถวัดประจุ Q ที่เคลื่อนย้ายนี้ได้ ดังรูป 2.3.4 ทำนองเดียวกันถ้าแทนเครื่องวัดประจุด้วยโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานภายในสูงก็สามารถวัดความต่างศักย์ของอิเล็กโทรดได้เช่นกัน

จากนิยามของสัมประสิทธิ์คือการเปลี่ยนแปลงของโพลาริเซชัน เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป นั่นคือ

$$P_{(\text{experiment})} = \frac{1}{A} \frac{dQ}{dT} \quad (2.3.12)$$

จากสมการที่(2.3.12) ถ้าเรารู้พื้นที่อิเล็กโทรดของฟิล์ม สามารถวัดประจุไฟฟ้าและอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปของฟิล์มได้ ทำให้สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกได้



รูปที่ 2.3.4 ฟิล์มไพโรอิเล็กทริก เมื่ออุณหภูมิของฟิล์มเพิ่มขึ้น จะมีกระแสไฟฟ้าไหลจากอิเล็กโทรดด้านล่างไปอิเล็กโทรดด้านบน

ในงานวิจัยที่ผ่านมา ได้มีการวัดสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกแบบประยุกต์ต่างๆ และใช้เครื่องมือที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการ โดยทดลองทำการวัดประจุที่เคลื่อนย้ายระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสอง ขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ΔT เมื่อจุ่มฟิล์มลงในน้ำมันหล่อลื่นที่อุ่นซึ่งเป็นตัวเพิ่มอุณหภูมิให้กับพอลิเมอร์

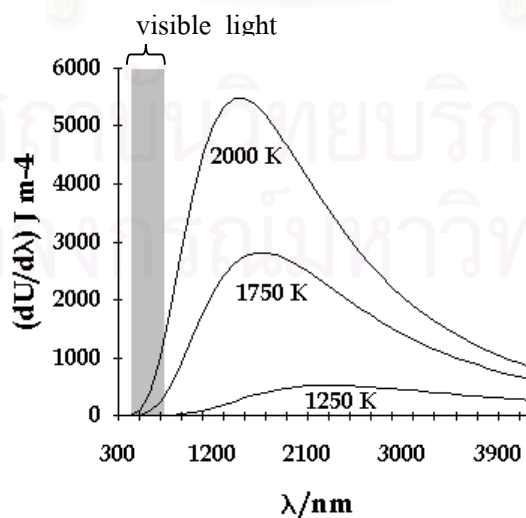
บทที่ 3

การตอบสนองทางไฟฟ้าของฟิล์มไพโรอิเล็กทริก

ฟิล์ม PVDF เมื่อผ่านกรรมวิธีทางกายภาพที่เหมาะสมจะแสดงสมบัติไพโรอิเล็กทริกมีการตอบสนองทางไฟฟ้าต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง แผ่นฟิล์มที่มีสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกสูงสามารถให้สัญญาณไฟฟ้าสูง ด้วยสมบัติเช่นนี้จึงนิยมนำมาทำเป็นตัวรับรู้พลังงานความร้อนหรือคลื่นอินฟราเรด การวัดอุณหภูมิของสารไพโรอิเล็กทริก เป็นวิธีการวัดอุณหภูมิของสารที่ต่างจากวิธีการวัดอุณหภูมิแบบอื่นคือ ตัววัดอุณหภูมิไม่ต้องสัมผัสกับวัตถุที่ต้องการวัดอุณหภูมิโดยตรง แต่วัดปริมาณรังสีของวัตถุที่แผ่ออกมาแทน

3.1 การวัดการแผ่รังสีของวัตถุ

วัตถุทุกชนิดที่มีอุณหภูมิสูงกว่าศูนย์องศาสัมบูรณ์ จะแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา ปริมาณการแผ่รังสีจะไม่ขึ้นกับชนิดของวัตถุแต่จะขึ้นอยู่กับค่าอุณหภูมิเท่านั้น โดยวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงกว่าย่อมจะให้พลังงานของการแผ่รังสี อินฟราเรดมากกว่าวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า เช่น ที่อุณหภูมิประมาณ 1000 K โลหะจะเริ่มมีสีแดงเรื่อยๆ ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นจะเปลี่ยนเป็นสีส้มที่ 1500 K และเมื่อเผาโลหะจนร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 3000 K สเปกตรัมของแสงสีขาวที่แผ่ออกมาจากวัตถุ เมื่อวัดโดยสเปกโตรมิเตอร์ แล้วพบว่าสเปกตรัมจะประกอบด้วย รังสีอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet) รังสีอินฟราเรด (infrared) และแสงที่ตามองเห็นได้ (visible light)



รูปที่ 3.1.1 การแผ่รังสีของวัตถุดำที่อุณหภูมิต่างๆ กัน

การแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อธิบายได้โดยศึกษาอุปลักษณะของการแผ่รังสีของวัตถุดำ (black body radiation) วัตถุดำ หมายถึง วัตถุที่ดูดกลืนรังสีต่างๆที่ตกลงบนวัตถุนั้นทั้งหมด ปกติ อัตราการแผ่และการดูดกลืนรังสีที่อุณหภูมิใดๆ ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของผิววัสดุ สภาพการเปล่ง e (emissivity) และสภาพดูดกลืน a (absorptivity) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 กับ 1 โดยวัตถุดำจะมี สภาพการดูดกลืน (absorptivity) เท่ากับ 1 ในทางปฏิบัติวัตถุดำทำขึ้นได้โดยทาสีดำในบริเวณ โพรงที่มีเพียงรูเล็กๆ ต่อกับภายนอก เมื่อรังสีตกเข้าไปในรูและเข้าไปภายในโพรงแล้ว รังสีจะถูก ดูดกลืนหมดโดยสะท้อนกลับไปมาภายในโพรงและไม่กระจายออกมาภายนอกอีก ซึ่งวัตถุที่ดูด กลืนรังสีความร้อนสูงก็จะเป็นวัตถุที่เปล่งรังสีความร้อนสูงเช่นกัน ตามกฎการแผ่รังสีของ เคิร์ชฮอฟฟ์ (Kirchhoff ' s law of radiation)

$$e = a = 1 \quad (3.1.1)$$

ชนิดของสาร	e
ผิวทองแดงขัดมัน	0.015
ผิวเงินขัดมัน	0.0198
ผิวทองเหลืองขัดมัน	0.03
ผิวนิกเกิลขัดมัน	0.045
แมกนีเซียม	0.07
อะลูมิเนียมพอยด์	0.085
ทองเหลืองมีคราบออกไซด์	0.60
คอนกรีต	0.63
กระดาษ	0.92
แก้วเรียบ	0.94
น้ำ	0.95
ผิวหนังมนุษย์	0.99
Blackbody	1.00

ตาราง 3.1.1 ค่าสภาพการเปล่งรังสี e (emissivity) ของสารต่างๆ (สมศักดิ์,2545)

โยเซฟ สเตฟาน (Joseph Stefan) ได้พบความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานการแผ่รังสีความร้อน W ที่เปล่งจากวัตถุดำกับอุณหภูมิของวัตถุดำ และ ลุดวิก โบลต์ซมันน์ (Ludwig Boltzman) ได้คำนวณทางทฤษฎีและได้ผลออกมาเช่นเดียวกัน กฎของสเตฟาน-โบลต์ซมันน์ อธิบายว่าพลังงานที่ปล่อยออกมาของวัตถุดำ(black body) ต่อหน่วยพื้นที่จะเป็นปฏิกภาคโดยตรงกับค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ของวัตถุดำกำลังสี่ ดังสมการ

$$W = \sigma T^4 \quad (3.1.2)$$

เมื่อ W คือ พลังงาน

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน)

σ คือ ค่า Stefan-Boltzmann constant = $5.6697 \times 10^{-10} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$

สมการ (3.1.2) เป็นจริงเมื่อตัวดำอยู่ที่ 0 เคลวิน ดังนั้น ในกรณีที่ตัวดำอยู่ที่ T_0 เคลวิน สมการของการถ่ายพลังงานความร้อนจะเป็น

$$W = \sigma (T^4 - T_0^4) \quad (3.1.3)$$

กรณีวัตถุไม่ได้เป็นวัตถุดำอย่างสมบูรณ์ จะได้ว่า

$$W = e\sigma (T^4 - T_0^4) \quad (3.1.4)$$

โดย e คือสภาพการเปล่งรังสีของวัสดุ

ทฤษฎีการวัดอุณหภูมิด้วยวิธีการสร้างพลังงานจากการแผ่รังสีของวัตถุ ของสเตฟานได้กลายเป็นทฤษฎีของเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่แพร่หลายในปัจจุบัน

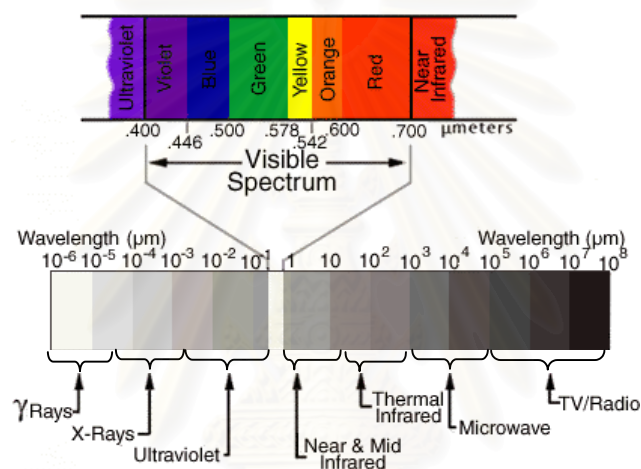
วิน (Wein) ได้คำนวณการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นของการแผ่รังสี ได้ว่า การเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นเป็นปฏิกภาคโดยตรงกับอุณหภูมิ ดังสมการ

$$\lambda_p (nm) \times T (K) = 2.8979 \times 10^6 (nm \cdot K) \quad (3.1.5)$$

เมื่อ λ_p = ความยาวคลื่นสูงสุด

รังสีอินฟราเรด (infrared radiation) เป็นช่วงคลื่นหนึ่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงประมาณ $0.75 \mu\text{m}$ ถึงประมาณ $1000 \mu\text{m}$ รังสีอินฟราเรดเกิดจากวัตถุต่างๆ เช่น คน สัตว์ รดยนต์ ที่มีอุณหภูมิในช่วง $290 - 390$ องศาเซลวิน รังสีอินฟราเรดออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่

1. ช่วงอินฟราเรดใกล้ (near infrared) ซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ $0.75 \mu\text{m} - 3 \mu\text{m}$
2. ช่วงอินฟราเรดกลาง (middle infrared) อยู่ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ $3 \mu\text{m} - 25 \mu\text{m}$
3. ช่วงอินฟราเรดความร้อน (far infrared) อยู่ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ $25 \mu\text{m} - 1000 \mu\text{m}$

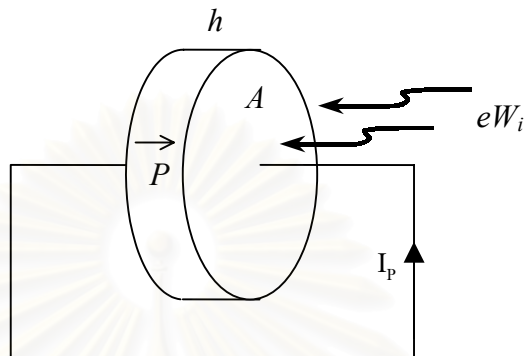


รูปที่ 3.1.2 สเปกตรัมของแสง

ดวงตามนุษย์มีความไวต่อรังสีเฉพาะในช่วงแสงที่มองเห็น ซึ่งมีความยาวคลื่นประมาณ $0.4 - 0.7 \mu\text{m}$ ดังนั้นตาของมนุษย์จึงไม่สามารถมองเห็นรังสีอินฟราเรดได้ ร่างกายมนุษย์มีอุณหภูมิประมาณ 37 องศาเซลเซียส หรือเท่ากับ 310 องศาเซลวิน เมื่อหาค่าตามสมการของเวิน จะให้ความยาวคลื่นที่แผ่ออกมาจากร่างกายมนุษย์เท่ากับ $9.35 \mu\text{m}$ ซึ่งอยู่ในช่วงของอินฟราเรดกลาง

3.2 การตอบสนองทางไฟฟ้าของตัวรับรู้โฟโวลต์

พิจารณากระแสโฟโวลต์ที่เกิดขึ้นเมื่อแหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรดแผ่รังสีออกมาด้วยกำลัง eW_i กระทบลงผิวฟิล์มพื้นที่ A เป็นเวลา dt



รูปที่ 3.2.1 ตัวรับรู้แบบโฟโวลต์

จากรูป 3.1 ถ้าหากการดูดกลืนรังสีเป็นไปตามกฎการแผ่รังสีของเคิร์ชฮอฟฟ์ กำลังรังสีที่ฟิล์มดูดกลืนได้คือ $aW_i = eW_i$ และปริมาณรังสีที่ตกกระทบถูกดูดกลืนและแผ่กระจายไปอย่างรวดเร็วตลอดปริมาตรของฟิล์ม ทำให้อุณหภูมิของฟิล์มเพิ่มขึ้น dT จะได้ว่า (Moulson, 1990)

$$eW_i dt = HdT \quad (3.2.1)$$

เมื่อ H คือค่าความจุความร้อน (heat capacity) ของสาร
ค่าความจุความร้อน ขึ้นกับความหนาแน่น (ρ) ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (specific heat) c
และปริมาตร (พื้นที่ $A \times$ ความหนา h) โดย $H = \rho c A h$

ถ้าพลังงานที่ฟิล์มดูดกลืนบางส่วนสูญเสียให้กับสิ่งแวดล้อม ด้วยอัตรา G สมการที่ (3.2.1) จะเขียนได้เป็น

$$eW_i dt - GTdt = HdT \quad (3.2.2)$$

หรือ

$$HT + GT = eW_i \quad (3.2.3)$$

- เมื่อ H คือ ค่าความจุความร้อนของสาร (heat capacity)
 G คือ อัตราการพาความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม (thermal conduction)
 ต่อหนึ่งหน่วยอุณหภูมิที่สารได้รับ
 W_i คือ ปริมาณรังสีที่ตกกระทบ
 e คือ ค่าความสามารถในการแผ่รังสี (emissivity)
 T, \dot{T} คือ อุณหภูมิและอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อหนึ่งหน่วยเวลา ตามลำดับ

เนื่องจากตัวรับรู้ชนิดไพโรอิเล็กทริก สามารถทำงานได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเท่านั้น โดยถ้าต้องการใช้วัสดุรังสีอินฟราเรดคงที่จะต้องมีการตัดเป็นรังสีช่วงๆ (chopping) พิจารณากรณีที่ ซอปเปอร์ปิด ($W_i = 0$)

$$H\dot{T} + GT = 0 \quad (3.2.4)$$

จาก (3.2.4) สามารถหาค่าอุณหภูมิที่ฟิล์มได้รับได้ โดยจะได้ว่า

$$T = T_0 e^{\left(\frac{t}{\tau_T}\right)} \quad (3.2.5)$$

- เมื่อ T_0 คือ อุณหภูมิเริ่มต้น ที่ได้รับเมื่อเวลา $t = t_0$
 τ_T คือ ค่าคงที่เวลาทางอุณหภูมิ โดย $\tau_T = \frac{H}{G}$

กระแสไพโรอิเล็กทริก I_p ที่ออกมาจากอิเล็กโทรดของฟิล์มไพโรอิเล็กทริกคืออัตราการเปลี่ยนแปลงของประจุบนผิวอิเล็กโทรด

$$I_p = \dot{Q} = \dot{T} \frac{dQ}{dT} \quad (3.2.6)$$

เมื่อ Q คือประจุที่เกิดขึ้น ในเวลา dt ขณะที่ฟิล์มมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น dT ถ้าพิจารณาประจุที่เกิดขึ้นในรูปของโพลาริเซชัน

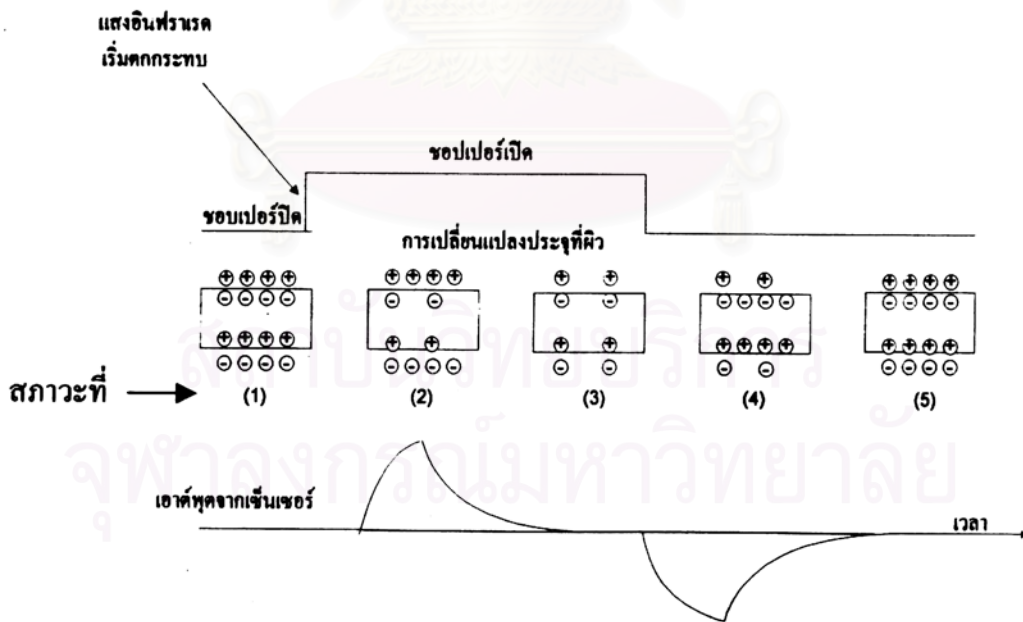
$$dQ = AdP = ApdT \quad (3.2.7)$$

ดังนั้น
$$I_p = pAT \dot{\quad} \tag{3.2.8}$$

3.2.1 การตอบสนองต่อความถี่ของสารไพโรอิเล็กทริก

การทำงานของตัวรับรู้ไพโรอิเล็กทริกจะไม่ตอบสนองกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่คงที่ตามเวลา แต่ตอบสนองกับพลังงานที่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่ดูดกลืนต่อเวลา ต้องถูกตัดเป็นช่วง(chopping) ดังรูป 3.2.2

เนื่องจากตามปกติสารไพโรอิเล็กทริกจะมีโพลาไรเซชันชนิดเกิดเอง และที่ผิวของสารจะมีประจุไฟฟ้าปกคลุมตลอดเวลา แต่ประจุที่ออกนอในอากาศรอบๆ จะเป็นตัวช่วยให้ผิวมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า เมื่อมีรังสีตกกระทบ จะดูดกลืนทำให้อุณหภูมิของสารสูงขึ้น เป็นเหตุให้ค่าโพลาไรเซชันที่ตกค้างอยู่เปลี่ยนแปลง และประจุไฟฟ้าที่ผิวจะอยู่ในสภาพไม่สมดุลกับภายในสาร ดังนั้นการวัดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าที่ผิว จะทำให้ทราบค่าประจุไฟฟ้าที่ไม่สมดุลซึ่งเกิดจากรังสีนั่นเอง



รูปที่ 3.2.1 การทำงานของตัวรับรู้ไพโรอิเล็กทริก(ภูมินทร์,2543)

พิจารณาการเพิ่มอุณหภูมิให้ฟิล์มโดยการฉายรังสีอินฟราเรด ในรูป 3.2.2 ในสถานะที่(1) ที่อุณหภูมิสมดุลฟิล์มจะอยู่ในสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า เมื่อรังสีอินฟราเรดตกกระทบฟิล์มไฟโรอิเล็กทริกดังในสถานะที่(2) ฟิล์มจะดูดกลืนรังสีทำให้อุณหภูมิของฟิล์มจะสูงขึ้น จึงเกิดการไม่สมดุลขึ้นระหว่างประจุที่ผิวผลึกกับประจุไอออนในอากาศ เป็นเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของฟิล์ม แต่ในระหว่างที่รังสียังคงตกกระทบอยู่นี้ ประจุไอออนในอากาศรอบๆ พยายามสร้างสมดุลกับประจุที่ผิว ทำให้เกิดการสมดุลของประจุอีกครั้งเป็นผลให้ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวเป็นศูนย์อีกครั้งดังแสดงในสถานะที่ (3) และเมื่อเราปิดแสงไฟในสถานะที่ (4) จะทำให้อุณหภูมิของฟิล์มไฟโรอิเล็กทริกเย็นลงเป็นผลให้ค่าโพลาริเซชันชนิดเกิดขึ้นเองเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการไม่สมดุลระหว่างประจุที่ผิวและประจุไอออนในอากาศอีกครั้ง ดังนั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของฟิล์มอีกครั้งหนึ่ง แต่จะเป็นการเปลี่ยนแปลงในทิศตรงกันข้ามกับตอนแรก หลังจากนั้นประจุไอออนในอากาศจะพยายามสร้างสมดุลกับประจุที่ผิวทำให้ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มเป็นศูนย์อีกครั้ง ดังแสดงในสถานะที่(5) จากหลักการทํางานจะเห็นว่าตัวรับรู้ชนิดไฟโรอิเล็กทริกสามารถทํางานได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเท่านั้น ดังนั้นถ้าต้องการใช้วัดแสงคงที่จึงต้องมีการตัดแสง (chopping) ด้วย

ดังนั้นเพื่อให้ได้การตอบสนองต่ออุณหภูมิอย่างต่อเนื่องของสารไฟโรอิเล็กทริกจะกำหนดให้รังสีที่ตกกระทบมีการเปลี่ยนแปลงเป็นพัลส์ ความถี่ ω และแอมพลิจูด W_0 โดย $W_i = W_0 e^{j\omega t}$ (Moulson ,1990) สมการที่ (3.2.3) สามารถเขียนได้เป็น

$$H\dot{T} + GT = eW_0 e^{j\omega t} \quad (3.2.9)$$

หรือ

$$\dot{T} + \frac{1}{\tau_T} T = \frac{e}{G\tau_T} W_0 e^{j\omega t} \quad (3.2.10)$$

เมื่ออินทิเกรต โดยใช้ตัวแทนการอินทิเกรต (integrating factor) $e^{\frac{t}{\tau_T}}$ สุดท้ายจะได้

$$T = \left\{ G\tau_T \left(\frac{1}{\tau_T} + j\omega \right) \right\}^{-1} eW_i \quad (3.2.11)$$

จากสมการ (3.2.11) แทนค่า \dot{T} ลงในสมการ (3.2.8) จะได้สมการของกระแสไฟโรอิเล็กทรอนิกส์เป็น

$$I_p = j\omega \left\{ (GT) \left(\frac{1}{\tau_T} + j\omega \right) \right\}^{-1} pAeW_i \quad (3.2.12)$$

3.2.2 สภาพตอบสนองทางกระแส (current responsivity)

นิยามของสภาพตอบสนอง (R) คือ สัญญาณออก(output)ทางไฟฟ้า (แรงดันหรือกระแส) ที่วัดได้ต่อหนึ่งหน่วยกำลังของรังสีอินฟราเรดที่มากกระทบบนตัวรับรู้ ซึ่งสมบัตินี้จะขึ้นกับชนิดของตัวรับรู้

$$R_i = \frac{\text{electrical output}}{\text{optical input}} \quad (3.2.13)$$

พิจารณาสภาพตอบสนองทางกระแส (current responsivity) จากสมการที่ (3.12) เมื่อแทนลงในนิยามข้างต้น จะได้ค่าสภาพตอบสนองทางกระแส

$$R_i = \left| \frac{I_p}{W_i} \right| = \left| j\omega pAe \left\{ G\tau_T \left(\frac{1}{\tau_T} + j\omega \right) \right\}^{-1} \right|$$

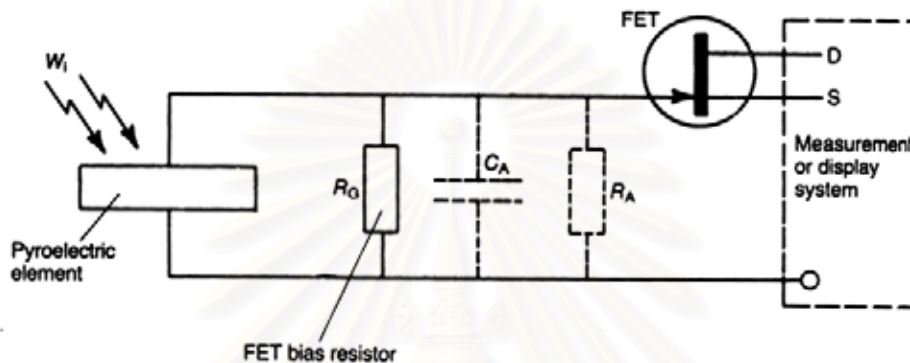
หรือ

$$R_i = \frac{pAe\omega}{G} (1 + \omega^2 \tau_T^2)^{-\frac{1}{2}} \quad (3.2.14)$$

จะเห็นได้จากสมการว่าค่าการตอบสนองเชิงกระแสจะมีค่าสูง เมื่อตัวรับรู้มีค่าสัมประสิทธิ์ไฟโรอิเล็กทรอนิกส์ พื้นที่รับรังสี และค่าสภาพการเปล่งสูง ส่วนค่าอัตราการพาความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมจะต้องต่ำ ๆ ซึ่งจะพิจารณาถึงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

3.2.3 สภาพตอบสนองทางแรงดัน (voltage responsivity)

พิจารณาระบบที่จะตรวจจับแรงดัน V จากตัวรับรู้ชนิดไพโรอิเล็กทริก มักใช้ขาเกทของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า (field effect transistors , FET) หรือ เฟต ต่อกับตัวรับรู้ไพโรอิเล็กทริก ดังรูป 3.2.3



รูปที่ 3.2.3 ระบบตรวจวัดแบบไพโรอิเล็กทริกทั่วๆไป

เมื่อ R_G คือความต้านทานอินพุทของเฟต C_A และ R_A คือ ค่าความจุและความต้านทานอินพุทของวงจรขยาย และ ระบบอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ที่ เกี่ยวข้อง แรงดันที่วัดได้คือ $\frac{I}{Y}$ เมื่อ Y คือค่าความยอมทางไฟฟ้า (admittance) ซึ่งจากรูป 3.2.3 สามารถหาค่าความยอมทางไฟฟ้าได้ดังนี้

$$Y = \frac{1}{R_G} + \frac{1}{R_A} + j\omega(C_E + C_A) \quad (3.2.15)$$

C_E คือ ค่าความจุของตัวรับรู้ โดยปกติแล้ว $R_A \gg R_G$ และ $C_A \ll C_E$ ดังนั้น ได้ว่า

$$Y \approx R_G^{-1} + j\omega C_E \quad (3.2.16)$$

และ

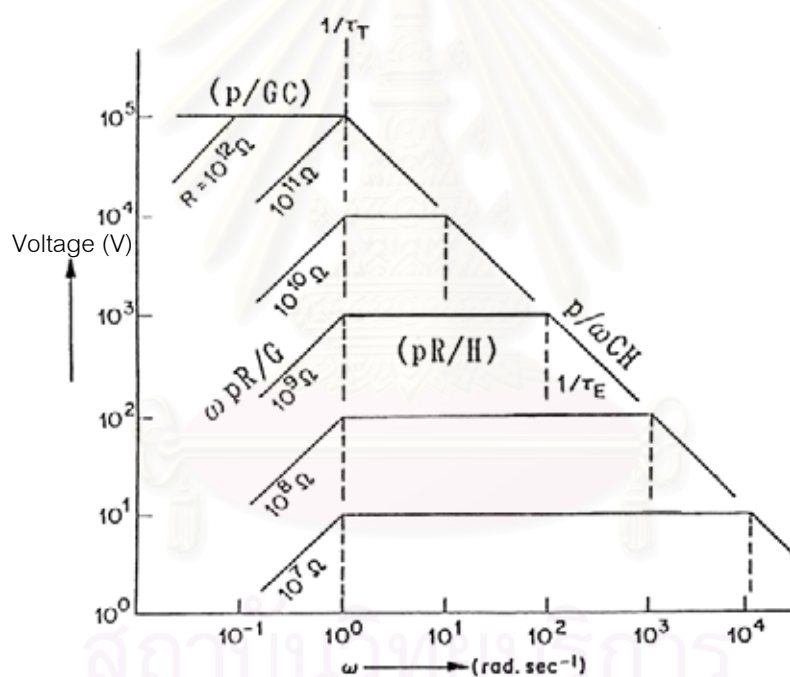
$$|Y| = R_G^{-1}(1 + \omega^2 \tau_E^2)^{1/2} \quad (3.2.17)$$

เมื่อ $\tau_E = R_G C_E$ คือค่าคงที่ของเวลาเชิงไฟฟ้า (electrical time constant) ดังนั้น จะสามารถหาค่าการตอบสนองทางแรงดันได้เป็น

$$R_V = \left| \frac{V}{W_i} \right| = \left| \frac{I}{Y W_i} \right| = \frac{R_I}{|Y|} \quad (3.2.18)$$

แทนค่า $|Y|$ จากสมการ (3.2.3) และ ค่า R_I จากสมการ (3.1.2) ในที่สุดจะได้

$$R_V = \frac{R_G p A \omega e}{G(1 + \omega^2 \tau_T^2)^{1/2} (1 + \omega^2 \tau_E^2)^{1/2}} \quad (3.2.19)$$



รูปที่ 3.2.4 กราฟการตอบสนองของตัวรับรู้ ต่อสัญญาณไฟ ไรโอเล็กทริกที่ความถี่ต่างกัน เมื่อ $\tau_T = 1$ วินาที

การตอบสนองทางแรงดันของฟิล์มไฟ ไรโอเล็กทริก มีความสมมาตรทางความถี่ (symmetric frequency) ขึ้นกับ τ_E และ τ_T ดังรูป 3.2.4 (Eizo, 1988) และมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อ $\omega = 0$ กราฟค่าการตอบสนองทางแรงดัน R_V และความถี่ จะแบ่งออกเป็น 3 บริเวณ โดย

บริเวณที่ 1 สำหรับช่วงความถี่ต่ำ ($\omega \ll \tau_T^{-1}$) ค่า R_V จะแปรผันตรงกับความถี่ โดย

$$R_V = \frac{R_G p A \omega e}{G}$$

บริเวณที่ 2 สำหรับความถี่ช่วงระหว่างกลาง ($\tau_T^{-1} \ll \omega \ll \tau_E^{-1}$) ค่า R_V จะไม่ขึ้นกับความถี่ แต่จะมีค่า $R_V = \frac{p A e}{C_E G}$ เมื่อ $\tau_E^{-1} \ll \tau_T^{-1}$ หรือ $R_V = \frac{R_G p A e}{H}$ เมื่อ $\tau_E^{-1} \gg \tau_T^{-1}$

บริเวณที่ 3 สำหรับช่วงความถี่สูงๆ ($\omega \gg \tau_T^{-1}, \tau_E^{-1}$) ค่า R_V จะแปรผกผันกับความถี่ โดย

$$R_V = \frac{p A e}{C H \omega}$$

พิจารณาค่า R_V ที่มากที่สุด จะเกิดขึ้นเมื่อ $\omega = \frac{1}{\tau_E \tau_T}$ ซึ่งเป็นความถี่ช่วงแคบๆ ในบริเวณความถี่บริเวณช่วงกลาง ซึ่งโดยปกติแล้วค่าจะอยู่ใน ช่วง 0.1 - 10 Hz

$$R_V(\max) = \frac{R_G p A \omega e}{G(\tau_E + \tau_T)} \quad (3.20)$$

พิจารณาจากสมการ (3.20) การเพิ่มค่า R_V อาจทำได้โดยลดค่าของ τ_T และ τ_E ค่า $\tau_E = RC$ สามารถลดลงได้โดยการเพิ่มค่าตัวต้านทาน R_G ขนานเข้ากับฟิล์ม จากรูป 3.2.4 จะเห็นว่าตัวรับรู้ไฟโรอิเล็กทริกที่ต่อเข้ากับตัวต้านทานค่าต่ำกว่า การตอบสนองในช่วงความถี่จะกว้างและ R_V มีค่าต่ำกว่า โดยเหตุผลที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก ค่าความจุตามธรรมชาติของฟิล์มที่ไม่คงที่ ซึ่งสร้างความแตกต่างให้กับตัวรับรู้ไฟโรอิเล็กทริกจากตัวรับรู้ความร้อนชนิดอื่น (Eustance ,1984) และค่า $\tau_T = \frac{H}{G}$ เป็นลักษณะเฉพาะของวัสดุ การลดค่าความจุความร้อนเพื่อเพิ่ม R_V ทำได้โดยให้เล็กลงวัสดุไฟโรอิเล็กทริกที่บาง ซึ่งเป็นข้อดีของฟิล์ม PVDF เพราะสามารถทำให้บางได้มากกว่าสารไฟโรอิเล็กทริกจำพวกเซรามิก เนื่องจากมีความยืดหยุ่นสูง

3.3 ข้อพิจารณาในการใช้ตัวรับรังสีอินฟราเรดแบบไพโรอิเล็กทริก

รังสีอินฟราเรดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีปะปนอยู่ทั่วไป และเดินทางได้ด้วยความเร็วสูงมาก การใช้งานนอกจากค่าการตอบสนองทางไฟฟ้าและแรงดันของตัวรับรังสีดังกล่าวมาแล้ว ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติต่างๆอีกหลายด้าน เช่น ความเข้มและความยาวคลื่นของรังสีที่จะตรวจวัด ความเร็วในการทำงานของตัวรับรังสี เสถียรภาพและราคาของตัวรับรังสี เป็นต้น

ต่อไปนี้จะอธิบายรายละเอียด เกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่ควรพิจารณาในการใช้สิ่งประดิษฐ์ตรวจรับรังสีอินฟราเรด

3.3.1 ค่ากำลังเอาต์พุตเทียบสัญญาณรบกวน (noise equivalent power ,NEP)

ค่ากำลังเอาต์พุตเทียบสัญญาณรบกวน คือ ค่าฟลักซ์ของรังสี(radiant flux) ต่ำสุดที่ทำให้ค่ากำลังเอาต์พุตต่อสัญญาณรบกวน (signal - to -noise ratio) เท่ากับ 1 ใช้เป็นเกณฑ์บอกชี้ว่าตัวรับรังสีสามารถวัดรังสีที่มีความเข้มต่ำสุดได้เท่าไร เพราะถ้าค่ากำลังเอาต์พุตต่อสัญญาณรบกวนน้อยกว่า 1 จะทำให้การวัดทำได้ยาก ค่า NEP ในบางกรณีนิยมเป็นอัตราการตรวจรับต่ำสุดต่อค่ารากที่สองของความกว้างแถบความถี่ (bandwidth) ที่ใช้ ทำให้ค่า NEP มีหน่วยเป็น $\frac{W}{\sqrt{Hz}}$

$$NEP = \frac{\text{electrical noise}}{\text{electrical output}} \times \text{optical input} \quad (3.3.1)$$

ถ้ากำหนดให้สัญญาณรบกวน คือ ΔV_n ดังนั้น

$$NEP = \frac{\Delta V_n}{R} \quad (3.3.2)$$

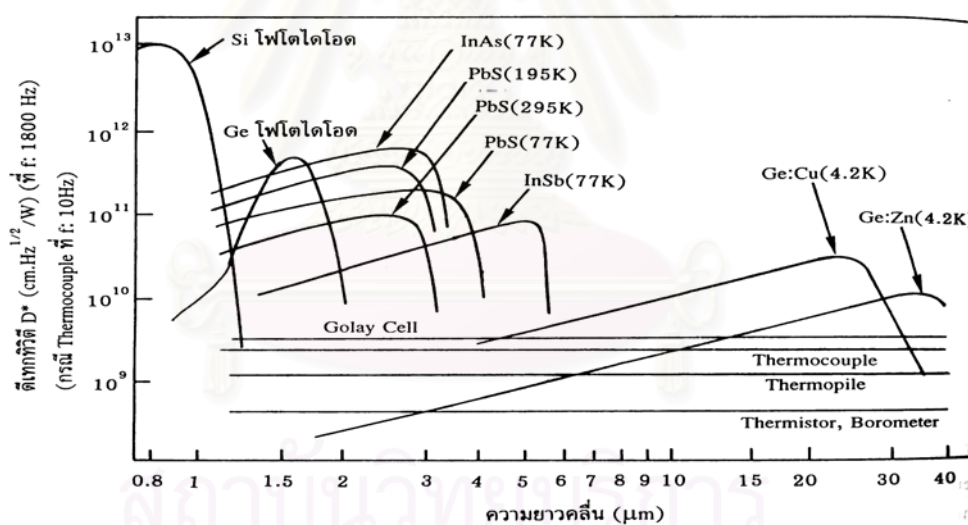
ดังนั้นค่า NEP ยิ่งมากเท่าไร แสดงว่า ค่าสภาพการสนองของตัวรับรังสีมีค่าน้อย ในทางปฏิบัติมักต้องการปริมาณที่มีค่าเพิ่มขึ้นเหมือนกับประสิทธิภาพของตัวรับรังสีที่เพิ่มขึ้นจึงกำหนดพารามิเตอร์ซึ่งเป็นส่วนกลับของ ค่า NEP คือ ค่า D* (Delaney,1992)

3.3.2 ค่าความสามารถในการตรวจจับ (detectivity : D^*)

ค่าความสามารถในการตรวจจับ นิยมใช้สัญลักษณ์ D^* หมายถึง อัตราส่วนของสัญญาณเอาต์พุตต่อสัญญาณรบกวน กรณีที่มีกำลังของแสงอินพุตมีค่าเท่ากับ 1 W ค่า D^* จะไม่ขึ้นกับพื้นที่รับแสง แต่จะเป็นค่าเฉพาะตัวของวัสดุ เพราะฉะนั้นสามารถใช้ค่า D^* เปรียบเทียบคุณภาพของตัวตรวจจับรังสีชนิดต่างๆ ด้วยกันได้ ค่า D^* มีหน่วยเป็น $\frac{m \cdot Hz^{1/2}}{W}$

$$D^* = \sqrt{A \cdot \Delta f} \frac{1}{NEP} \quad (3.3.3)$$

โดยทั่วไปค่า D^* จะเป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่นแสง ความถี่การตัดแสงและความกว้างแถบความถี่ (bandwidth) ของสัญญาณรบกวน รูปที่ 3.3.1 แสดงตัวอย่างค่า D^* ของวัสดุต่างๆ ในฟังก์ชันของความยาวคลื่นแสง



รูปที่ 3.3.1 ตัวอย่างสเปกตรัมค่า D^* ของวัสดุชนิดต่างๆ

3.3.3 ผลตอบสนองเชิงสเปกตรัม (spectral response)

โดยปกติตัวรับรู้แสง จะมีผลตอบสนองไม่เท่ากันในแต่ละความยาวคลื่นแสงที่เปลี่ยนแปลงไปดังรูป 3.3.1 ผลตอบสนองเชิงสเปกตรัม ใช้สัญลักษณ์ $R(\lambda)$ ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วย

อัตราส่วนของกระแส $I(\lambda)$ หรือแรงดันเอาต์พุต $V(\lambda)$ ต่อกำลังของแสงอินพุต $P(\lambda)$ กล่าวคือ

$$R(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{P(\lambda)} \quad (3.3.4)$$

วัสดุ		ชนิด	ความยาวคลื่น (μm)	อุณหภูมิใช้งาน(K)	
Thermal Type	Thermocouple, Thermopile				
	Bolometer	Goley cell		300	
	Pneumatic cell	LiTaO ₃	ไม่ขึ้นกับ	300	
	Pyroelectric detectors	PZT,PVDF	ความยาวคลื่น	300	
Quantum Type	Intrinsic	Photoconductive	PbS	1-3	300
			PbSe	1-4.5	300
			HgCdTe	2-12	77
	Type	Photovoltaic	Ge	0.6-0.9	300
			InAs	1-3	77
			InSb	2-5.5	77
			HgCdTe	2-12	77
	Extrinsic Type		Ge:Au	1-10	77
		Ge:Hg	2-14	4.2	
		Ge:Cu	2-30	4.2	
		Ge:Zn	2-40	4.2	
		Si:Ga	1-17	4.2	
		Si:As	1-23	4.2	

ตาราง 3.3.1 ตัวอย่างลักษณะสมบัติของตัวรับรังสีอินฟราเรดชนิดต่างๆ (Hamamatsu,1993)

3.3.4 ความเป็นเชิงเส้น (linearity)

คือความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของแสงอินพุตและขนาดของสัญญาณเอาต์พุต ว่าเป็นเชิงเส้นหรือไม่ นับเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่จะต้องพิจารณาในการใช้งาน โดยทั่วไปแล้ว ถ้าแสงอินพุตมีความเข้มต่ำ กระแสไฟฟ้ามืด (dark current) จะเป็นตัวกำหนดความเป็นเชิงเส้น และถ้าแสงอินพุตมีความเข้มสูง ค่าความต้านทานอนุกรมของสิ่งประดิษฐ์จะเป็นตัวกำหนดความเป็นเชิงเส้น

3.3.5 Figure of Merit

Figure of Merit หรือ quality factor หรือ Q – factor เป็นลักษณะเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิด โดยเท่ากับอัตราส่วนของพลังงานสะสมสูงสุดเทียบกับพลังงานที่สูญเสียโดยวงจร

$$\text{Figure of Merit} = 2\pi \frac{\text{Maximum energy stored}}{\text{Energy dissipate by cycle}} \quad (3.3.5)$$

พิจารณากรณีที่ฟิล์มไพโรอิเล็กทริก ใช้งานในช่วงความถี่สูงๆ ($\omega \gg \tau_r^{-1}, \tau_e^{-1}$) ค่าการตอบสนองทางแรงดันจะเป็น $R_V = \frac{pAe}{CH\omega}$ แทนค่า $H = \rho cAh$ และ $C = \frac{\epsilon A}{h}$ ดังนั้น

$$R_V = \frac{p\xi}{c'Ae\omega} \quad (3.3.6)$$

เมื่อ c' คือ volume specific heat

จากสมการ (3.3.6) ค่า Figure of Merit ถูกกำหนดในเทอมที่ใช้อธิบายเฉพาะคุณสมบัติของวัสดุเท่านั้น คือ

$$F_V = \frac{p}{c'\epsilon} \quad (3.3.7)$$

Figure of Merit ใช้เป็นตัวตัดสินใจในการที่จะเลือกสภาวะในการทำงาน และการเลือกใช้งานตัวรับรู้ คุณสมบัติต่างๆ ของสารไพโรอิเล็กทริก แสดงดังตาราง 3.3.2

material	p ($\mu\text{Cm}^{-2}\text{K}^{-1}$)	T_c ($^{\circ}\text{C}$)	ϵ	c' ($\text{Jcm}^{-3}\text{K}^{-1}$)	F_v ($10^{-10} \text{ C cm}^{-1}\text{J}$)
TGS	350	49	50	2.5	2.8
LiTaO ₃	170	618	43	3.2	1.2
PZT	300	490	200	3.2	0.47
PVDF	27	150	11	2.3	0.87

ตาราง 3.3.2 ตารางแสดงสมบัติของสารไพโรอิเล็กทริกชนิดต่างๆ (Eizo, 1988)

จะเห็นว่าถึงแม้ PVDF จะมีค่าสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกต่ำกว่าสารไพโรอิเล็กทริกอื่นมาก แต่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และ c' ที่ต่ำ ทำให้ค่า F_v มีค่าที่สูงพอสมควรเมื่อเทียบกับ PZT ทำให้เหมาะที่จะเลือกใช้เป็นตัวรับรู้อินฟราเรด

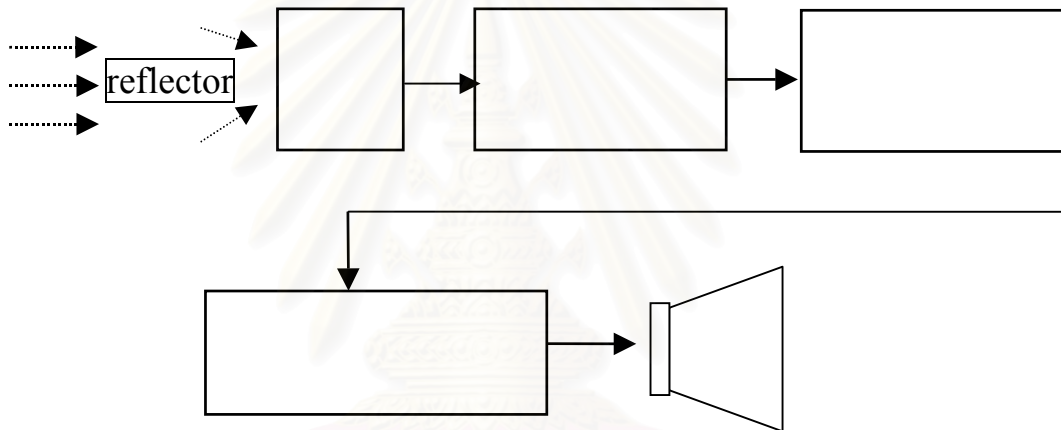
หลังจากได้ทราบหลักการวัดการแผ่รังสี และทราบข้อพิจารณาต่างๆในการใช้งานตัวรับรู้อินฟราเรด รวมถึงการตอบสนองแบบไพโรอิเล็กทริกมาบ้างแล้ว เนื่องจากตามปกติมนุษย์มีอุณหภูมิภายในร่างกาย 37 องศาเซลเซียส ดังนั้นร่างกายมนุษย์แผ่รังสีในช่วงอินฟราเรดออกมาที่ตรวจวัดได้ โดยการตรวจจับรังสีอินฟราเรด เป็นการบ่งชี้ว่ามีบุคคลหรือวัตถุอื่นแปลกปลอมเข้ามาใกล้หรือไม่ และถ้ามีการเคลื่อนไหวจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มของรังสีอินฟราเรด และถ้าเครื่องตรวจวัดสามารถตรวจจับการเคลื่อนไหวของผู้บุกรุกได้ก็จะเป็นวิธีหนึ่งในการเตือน ในบทต่อไปจะเป็นการออกแบบนำฟิล์ม PVDF ซึ่งเป็นฟิล์มไพโรอิเล็กทริกมีคุณสมบัติสามารถวัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเนื่องจากการแผ่รังสีได้ มาสร้างเป็นตัวรับรู้รังสีอินฟราเรด และออกแบบวงจรที่เหมาะสม เพื่อสร้างเป็นเครื่องตรวจจับผู้บุกรุก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

เครื่องตรวจจับผู้บุกรุกจากตัวรับรู้ PVDF

ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ตัวรับรู้ไพโรอิเล็กทริกจากฟิล์ม PVDF โดยนำตัวรับรู้พอลิเมอร์ไพโรอิเล็กทริก มาใช้เป็นตัวรับรู้ในเครื่องตรวจจับผู้บุกรุก (intruder detector) มาบ้างแล้ว (พูนศักดิ์, 2541) แต่รังสีอินฟราเรดจากตัวผู้บุกรุกจะมีค่าต่ำและใกล้เคียงกับสัญญาณรบกวน ดังนั้น เครื่องมือตรวจจับรังสีอินฟราเรดจากผู้บุกรุกที่เคยทำ ยังคงมีการทำงานผิดพลาดโดยส่งเสียงเตือนเองแม้ยังไม่มีผู้บุกรุก แผนผังการทำงานในรูปที่ 4.1 เป็นการแสดงหลักการทำงานของเครื่องตรวจจับผู้บุกรุก



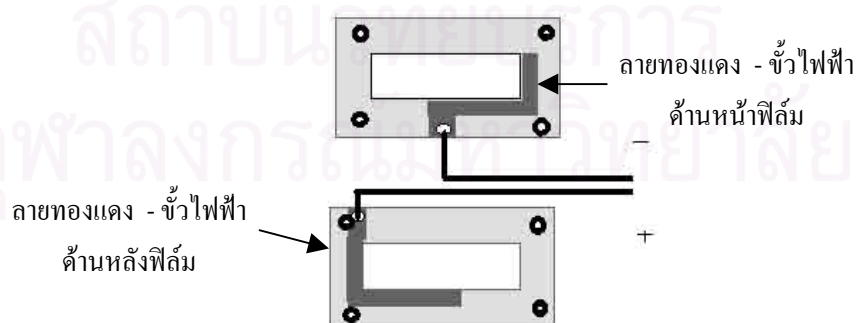
รูปที่ 4.1 แผนผังการทำงานของเครื่องตรวจจับผู้บุกรุก

เมื่อมีผู้บุกรุก อุณหภูมิที่ตัวผู้บุกรุกซึ่งเป็นคลื่นความร้อนจะกระทบแผ่นสะท้อนไปสู่วัสดุ PVDF ทำให้เกิดปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริก คือให้ผลตอบสนองทางไฟฟ้าเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าที่ขาคาทของมอสเฟต กระแสไฟฟ้าน้อยๆ ระดับไมโครแอมแปร์จะผ่านเข้าสู่จอร์ปรีแอมป์ (preamplifier) ทำหน้าที่ขยายกระแสและได้อาตพุทเป็นแรงดันออกจากขาคเรนของมอสเฟต เข้าสู่จอร์ขยายและกรองความถี่ (amplifier & bandpass filter) จนได้สัญญาณที่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์ด้วยวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ (comparator & discriminator) สัญญาณที่ได้จะไปกระตุ้นในวงจรฟลิปฟลอป (flip-flop) ทำหน้าที่ส่งสัญญาณเตือนภัยให้ผู้บุกรุกหยุดการกระทำ

4.1 ตัวรับรู้ PVDF และหน่วยรับรังสี

ในด้านการออกแบบเพื่อใช้งานฟิล์ม PVDF เป็นตัวรับรู้อินฟราเรดได้จริง จะต้องทำให้ฟิล์มมีความไวต่อการตอบสนองมากที่สุดและแยกแยะผลต่างระหว่างสัญญาณรบกวนและสัญญาณที่ต้องการจะวัดได้อย่างชัดเจน เนื่องจากความไวต่อการตอบสนองของฟิล์มขึ้นกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ออกแบบและสร้างขึ้น เพื่อรับสัญญาณไพโรอิเล็กทริกด้วย การเลือกใช้อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมจึงมีส่วนที่ทำให้ฟิล์มทำงานได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ฟิล์ม PVDF เป็นฟิล์มที่มีความต้านทานเชิงซ้อน (impedance) สูงมาก (ประมาณ 10^{11} โอห์ม) ก่อนนำไปใช้งานในวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะต้องมีตัวแปลงความต้านทานเชิงซ้อนของฟิล์มทำให้ต่ำลง ที่ผ่านมามักเพิ่มเอาท์พุทให้กับฟิล์ม โดยต่อตัวต้านทานขนาด 500 เมกกะโอห์มก่อนเข้าสู่วงจรตามแรงดันที่สร้างจากออปแอมป์เพื่อทำการปรับค่าความต้านทานเชิงซ้อน ซึ่งตัวต้านทานที่มีขนาดสูงขนาดนี้ หาซื้อได้ยาก และการนำตัวต้านทานจำนวนมากมาอนุกรมกันเพื่อให้ได้ค่าที่ต้องการ จะทำให้เกิดปัญหาสัญญาณรบกวนเนื่องจากรอยต่อของตัวต้านทานแต่ละตัว

สัญญาณจากฟิล์มไพโรอิเล็กทริกเป็นสัญญาณที่ต่ำมาก การต่อฟิล์มเข้ากับวงจรตามแรงดันแบบเดิม ถึงแม้จะทำให้ฟิล์มทำงานได้ แต่สัญญาณรบกวนก็ยังคงสูง ในแง่ของการนำไปใช้วัดการแผ่ของรังสีอินฟราเรดจากร่างกายผู้บุกรุก จำเป็นต้องใช้ฟิล์มที่มีขนาดใหญ่เพื่อรับสัญญาณได้มาก ประมาณ 7 ตารางเซนติเมตร เนื่องจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ พบว่าฟิล์มที่ขนาดเล็กกว่านี้ไม่สามารถทำให้เห็นสัญญาณไพโรอิเล็กทริกที่ชัดเจนพอที่จะนำมาใช้งานสำหรับตรวจจับผู้บุกรุก การทำขั้วให้กับฟิล์มทำโดยเจาะแผ่นลายวงจรให้เท่ากับช่องรับแสง 2 ชั้น และกัดลายทองแดงออกให้เป็นขั้วไฟฟ้ากับฟิล์มดังรูป 4.1.1



รูปที่ 4.1.1 ภาพขั้วสำหรับวางฟิล์ม PVDF เพื่อไปใช้งาน

เมื่อเชื่อมสายไฟให้เรียบร้อย วางฟิล์ม (อิเล็กโทรดทาสีดำ) และ ประกบแผ่นลายวงจรทั้ง 2 กับฟิล์มให้ตึงพอดีด้วยนอต ต้องระวังอย่าขันนอตให้แน่นเกินไปเพราะจะทำให้เกิดผลทางเพียสโซอิเล็กทริกและทำให้ฟิล์มย่น พบว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่สามารถดึงสัญญาณออกจากฟิล์มได้แน่นอน โดยอิเล็กโทรดไม่เลื่อนหลุดจากขั้ว นำไปต่อกับอุปกรณ์อื่นได้ง่าย และสามารถปรับเปลี่ยนใช้กับฟิล์มได้หลายๆชิ้นในกรณีที่ฟิล์มเสื่อมสภาพ นอกจากนี้แผ่นทองแดงด้านหลังของขั้วยังทำหน้าที่ป้องกันสัญญาณรบกวนได้ด้วย

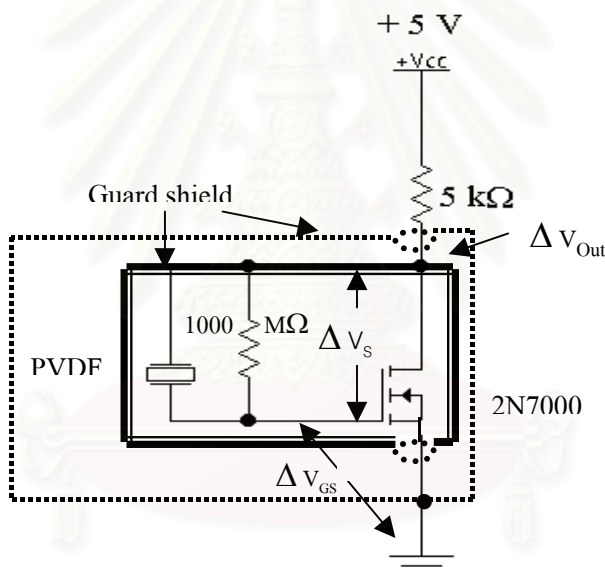
เนื่องจากพื้นที่อิเล็กโทรดที่มาก แม้ขยายสัญญาณให้มีขนาดใหญ่ขึ้นแต่พื้นที่ที่รับรังสี กระตุ้นมากผลที่ตามมาคือสัญญาณรบกวนจากรังสีพื้นก็มากเช่นเดียวกัน การขจัดปัญหานี้ทำได้ โดยไม่หันหน้าฟิล์มรับคลื่นที่รวมมากับสัญญาณรบกวนโดยตรง แต่ใช้แผ่นสะท้อน (reflector) ที่ ออกแบบเพื่อรับคลื่นให้ได้มากที่สุดและโฟกัสให้ลงสู่แผ่นฟิล์ม วิธีการเช่นนี้นอกจากจะช่วยตัดสัญญาณรบกวนเนื่องจากใช้อิเล็กโทรดขนาดใหญ่ในการรับคลื่น ยังมีข้อดีคือสามารถเพิ่มระยะในการตรวจจับได้ไกลขึ้นได้อีกด้วย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รูปที่ 4.1.2 แผ่นสะท้อนที่ใช้ในการโฟกัสคลื่นให้ตัวรับรู้

4.2 วงจรขยายเบื้องต้น (preamplifier)

วงจรขยายเบื้องต้นที่ใช้ เป็นดังรูป 4.2.1 วงจรขยายเบื้องต้นที่ใช้จะเป็นการต่อฟิล์มเข้ากับทรานซิสเตอร์แบบมอสเฟต (metal oxide semiconductors field effect transistors, MOSFET) เป็นวงจรปรับค่าความต้านทานเชิงซ้อน(impedance) มอสเฟตเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเหมือนตัวต้านทานมี 3 ขั้ว ขั้วด้านหนึ่งเรียกว่า ซอร์ส(source) อีกขั้วหนึ่งเรียกว่าเดรน(drain) ส่วนขั้วที่สามคือเกต(Gate) มีฉนวนกั้นกลาง จากขั้วที่กล่าวข้างต้นข้อดีของมอสเฟตคือ ความต้านทานที่ขาเกตสูงมาก ทำให้ไม่ดึงกระแสจากวงจรที่เชื่อมต่อกับ มอสเฟตสามารถรับสัญญาณจากตัวรับรู้ โดยไม่เกิดการถ่วงภาระกับวงจร(loading effect) เหมาะสำหรับการใช้รับสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงในระดับน้อยๆ ของฟิล์มไพโรอิเล็กทริก PVDF และได้ทดลองพบว่ามอสเฟตเบอร์ 2N7000 เหมาะสมสำหรับงานนี้



รูปที่ 4.2.1 วงจรภายในของตัวรับรู้

การไหลของกระแสระหว่างเดรนกับซอร์ส จะถูกควบคุมโดยแรงดันที่ขาเกต ดังนั้นเมื่อแรงดันที่ขาเกตที่ต่อไว้กับฟิล์มไพโรอิเล็กทริกเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้กระแสไฟฟ้าระหว่างเดรนกับซอร์ส ของมอสเฟตเกิดการเปลี่ยนแปลงไปด้วยค่าความต้านทาน 5 กิโลโอห์มต่อไว้เพื่อเป็นการบังคับจุดการทำงานของมอสเฟตที่ขาเดรนให้อยู่ที่กึ่งกลางของแหล่งจ่าย

พิจารณาความสัมพันธ์ของแรงดันขาออก ΔV_{out} กับ แรงดันจากตัวรับรู้ ΔV_s เมื่อ แรงดันตกคร่อมขาเกตและซอร์ส คือ ΔV_{GS} จาก กฎของเคิร์ชฮอฟฟ์ (Kirchhoff) ผลรวมแรงดัน รอบวงจรมีค่าเป็นศูนย์ ได้ความสัมพันธ์

$$-\Delta V_{GS} + \Delta V_s + \Delta V_{out} = 0$$

ที่จุดทำงานมอสเฟต จะพยายามรักษาแรงดัน V_{GS} ให้คงที่เสมอ ดังนั้น $\Delta V_{GS} = 0$ ดังนั้นวงจรนี้ให้

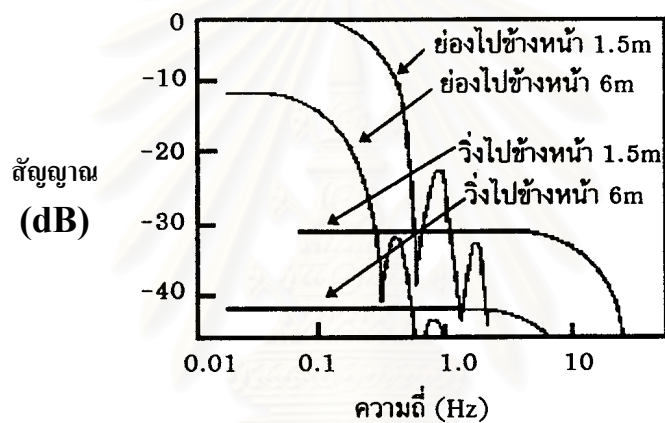
$$\Delta V_{out} = - \Delta V_s$$

การต่อในลักษณะขั้วฟิล์มด้านที่ถูกรังสี (ทาสีดำ) กับขาเดรนของมอสเฟต และ อีกด้านที่เหลือเข้ากับขาเกต มีข้อดีกว่าการต่อในลักษณะ common source แบบเดิม คือเป็นลดสัญญาณรบกวนเพราะต่อลอยขั้วด้านหนึ่งของฟิล์มลงดิน เสมือนเป็นเสาอากาศรับสัญญาณรบกวนจากภายนอก จากรูป 4.2.1 เส้นประ หมายถึง การกำบัง(shield)สัญญาณรบกวนด้วยโลหะ ได้ทำให้สองชั้นด้วยกันคือ ชั้นในเป็นการกำบังด้วยเอาท์พุทของมอสเฟต โดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ทั้งคู่อีกด้านที่ไม่สัมผัสฟิล์ม และชั้นนอกกำบังด้วยกราวด์(ground) โดยกล่องโลหะเพื่อเป็นการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนต่างๆ เป็นการลดทอนสัญญาณรบกวนชั้นแรก ก่อนนำสัญญาณไปผ่านวงจรขยายซึ่งสำคัญมากในการออกแบบวงจรในการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงสัญญาณระดับต่ำอย่างเช่น ฟิล์มไพโรอิเล็กทริก PVDF

ในการใช้งานจริงวงจรขยายเบื้องต้นที่ใช้ จะมีไอซีเรกูเลเตอร์ LM 336 เป็นตัวป้อนแรงดันให้กับตัวต้านทานที่ต่อกับขาเดรนของมอสเฟตและรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าระหว่างเดรนกับซอร์ส (V_{DS}) ให้คงที่ ข้อดีของการต่อในลักษณะนี้คือไม่เกิดความยุ่งยากในการแยกแหล่งจ่ายไฟของวงจรขยายเบื้องต้นจากวงจรในส่วนอื่นๆและลดปัญหาสัญญาณรบกวนจากสนามไฟฟ้า 50 Hz จากสายส่งในอาคาร ได้แรงดันที่จ่ายให้กับมอสเฟตที่จุดทำงาน 2.5 V พอดี โดยวงจรขยายเบื้องต้นและคุณสมบัติและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ที่ใช้อยู่ในภาคผนวก

4.3 การออกแบบวงจรขยายและกรองความถี่ (amplifier and bandpass filter)

วงจรขยายจะทำหน้าที่ขยายสัญญาณจากวงจรพีแอมป์ให้มีขนาดใหญ่ขึ้นพอที่จะประมวลสัญญาณได้ ส่วนวงจรกรองจะทำหน้าที่กรองสัญญาณรบกวนทิ้งไป ให้เหลือเฉพาะความถี่ของสัญญาณที่ต้องการตรวจจับ ตัวรับรู้ไพโรอิเล็กทริกจะตรวจจับรังสีอินฟราเรดที่เกิดจากร่างผู้บุกรุกที่ผ่านเข้ามาในบริเวณที่ตรวจจับ คลื่นของการเคลื่อนไหว ดังรูปที่ 4.3.1 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการเคลื่อนไหวของมนุษย์และความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจากตัวรับรู้ที่ได้ (คูสิต, 2542) โดยค่าความถี่มีรูปคลื่นไฟฟ้าอยู่ในช่วงความถี่สัญญาณที่จะยอมให้ผ่าน เหมาะสมให้เป็นสัญญาณขนาดใหญ่นำไปวิเคราะห์ในวงจรถัดไป



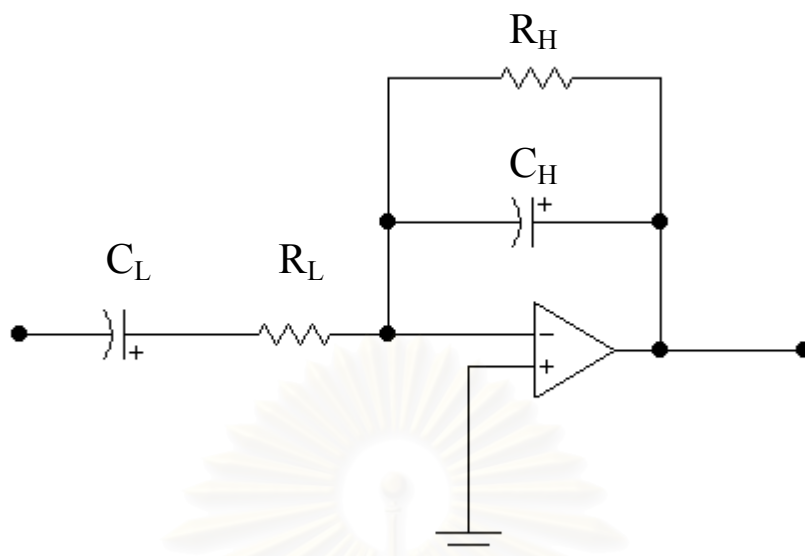
รูปที่ 4.3.1 ความเร็วในการเคลื่อนที่ของมนุษย์และความถี่ ของสัญญาณที่ได้

วงจรกรองที่ใช้เป็นวงจรกรองความถี่แบบแถบผ่าน (bandpass filter) โดยมีลักษณะเป็นวงจรชนิด RC แสดงดังรูป 4.3.2 ซึ่งค่าความถี่ตัดด้านต่ำและความถี่ตัดด้านสูง สามารถคำนวณได้จากสูตรดังนี้

$$\text{ความถี่ตัดด้านต่ำ} \quad f_L = \frac{1}{2\pi C_L R_L} \quad (4.3.1)$$

$$\text{ความถี่ตัดด้านสูง} \quad f_H = \frac{1}{2\pi C_H R_H} \quad (4.3.2)$$

$$\text{อัตราขยาย} \quad A = 1 + \frac{\omega C_L R_H}{(1 + \omega C_L R_L)(1 + \omega C_H R_H)} \quad (4.3.3)$$



รูปที่ 4.3.2 วงจรกรองความถี่แบบแถบผ่าน

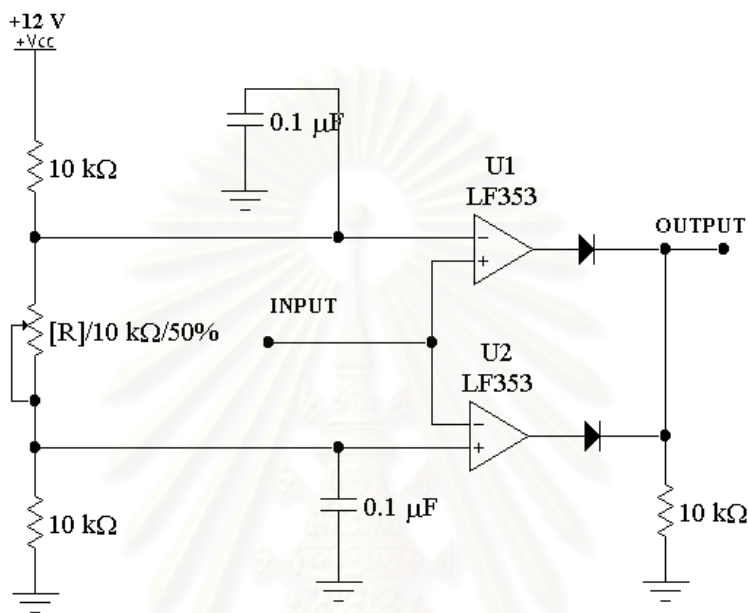
ถ้าเราต้องการวงจรที่มีความถี่ตัดด้านต่ำ 0.34 Hz และความถี่ตัดด้านสูง 10 Hz และต้องการอัตราขยายประมาณ 1 ล้านเท่า เราจะใช้วงจรในรูป 4.3.2 ต่อพ่วงเรียงกันแบบอนุกรม (cascade) กันเป็น 3 ชุดโดยแต่ละชุดมีอัตราขยาย 100 เท่า วงจรที่ใช้สามารถดูได้ที่ภาคผนวก

4.3 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ (Comparator)

วงจรส่วนนี้จะทำหน้าที่เปรียบเทียบสัญญาณอินพุตกับแรงดันอ้างอิง ที่สามารถปรับค่าได้ ซึ่งเป็นส่วนที่กำจัดสัญญาณรบกวนเนื่องจากความแปรปรวนของอุณหภูมิ และความไม่เสถียรของแผ่นฟิล์ม PVDF สามารถตั้งระดับช่องสัญญาณ (window) เพื่อตั้งระดับการเปรียบเทียบไว้ 2 ระดับ คือระดับเปรียบเทียบสัญญาณด้านสูง (upper level) และระดับเปรียบเทียบสัญญาณด้านล่าง (lower level) ทำให้วงจรนี้สามารถปรับระดับสัญญาณรบกวน ที่อยู่ระหว่างระดับทั้งสองนี้ได้ (discriminator circuit)

วงจรเปรียบเทียบสัญญาณมีคุณสมบัติคือถ้าความต่างศักย์ระหว่างขาอินพุตทั้งสองมีค่าเป็นลบ คือแรงดันที่ขาอินพุตลบสูงกว่าแรงดันที่ขาอินพุตบวก สวิตซ์ด้านเอาต์พุตจะปิดทำให้ขาเอาต์พุตต่อกับกราวด์

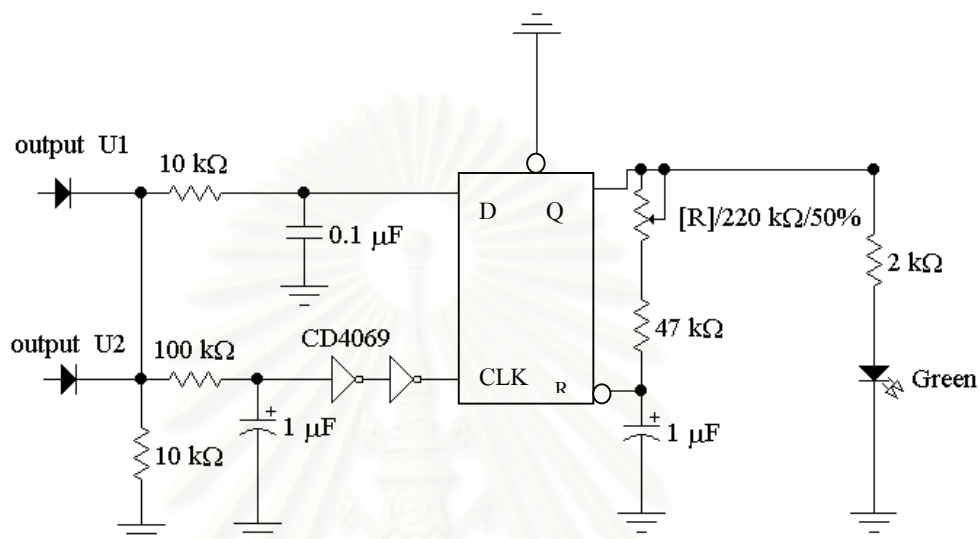
แต่ถ้าความต่างศักย์ระหว่างขาอินพุททั้งสองมีค่าเป็นบวก คือแรงดันที่ขาอินพุทบวกสูงกว่าแรงดันที่ขาอินพุทลบ สวิตช์ด้านเอาต์พุทจะเปิด ทำให้ขาเอาต์พุทมีสถานะลอย ส่วนวงจรเปรียบเทียบแรงดันอ้างอิงด้านล่าง (U2) จะทำงานกลับกัน



รูปที่ 4.4.1 วงจรเปรียบเทียบแรงดันแบบ 2 ด้าน

จากรูป 4.4.1 เป็นวงจรเปรียบเทียบแรงดันแบบ 2 ด้าน มี U1 และ U2 เป็นวงจรเปรียบเทียบแรงดันอ้างอิงด้านบน(Upper Threshold) และ ด้านล่าง (Lower Threshold) ตามลำดับ สาเหตุที่ต้องทำเช่นนี้ เพราะการเคลื่อนไหวในลักษณะเคลื่อนที่เข้าหาและผ่านไป ทำให้ เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนแบบเพิ่มขึ้นและลดลง ในเวลาใกล้เคียงกัน เป็นผลให้สัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากตัวรับรู้มีการเปลี่ยนแปลงทั้งในทางเพิ่มขึ้นและลดลง การตั้งระดับการเปรียบเทียบแรงดันไว้ 2 ทางเช่นนี้ทำให้การผิดพลาดในการตรวจจับลดลงอีกขั้นหนึ่งด้วย ผลของการเปรียบเทียบสัญญาณทั้งสอง จะผ่านวงจรออร์เกต (or gate) เพื่อเลือกใช้สัญญาณใดสัญญาณหนึ่งก็ได้ เป็นข้อมูล(data ,D) สัญญาณการเตือนภัยเตรียมพร้อมให้กับวงจรฟลิปฟล็อป (flip-flop) โดยวงจรจะทำการสะสมสัญญาณ (integrator circuit) ว่าอยู่ในระดับที่เพียงพอที่จะยอมให้เตือนภัยหรือไม่ หากเพียงพอ จะ

ส่งสัญญาณคлок (clock pulse , CLK) ไปกระตุ้นข้อมูลที่รอกอยอยู่ที่ D ให้ปรากฏผลออกที่เอาต์พุต Q ของฟลิปฟลอปตัวเดียวกัน และแสดงผลด้วย LED (สีเขียว) ติดสว่าง ในส่วนนี้จะเป็นการแสดงผลการเตือนภัยแบบชั่วคราว (Momentary Alarm)



รูปที่ 4.4.2 วงจร เตือนภัยแบบชั่วคราว (Momentary Alarm)

สัญญาณที่ออกจากฟลิปฟลอปตามรูป 4.4.2 จะผ่านเข้าสู่ฟลิปฟลอปอีกตัวซึ่งมีการทำงานในลักษณะเดียวกันแต่ทั้งนี้จะไม่มีการทำงานแบบชั่วคราวแต่จะเป็นสัญญาณเตือนภัยแบบถาวร และส่งกระแสไฟฟ้าไปขับกริ่งให้ดังเตือนภัยขึ้น กระทั่งผู้เป็นเจ้าของมาทำการกดสวิตช์ยกเลิก (Manual Reset) โดยรายละเอียดทั้งหมดของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณและส่วนวงจรของระบบการเตือนภัยดูได้ที่ภาคผนวก

บทที่ 5

ผลการทดสอบ

การทดสอบการทำงานแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือการทดสอบเพื่อศึกษาการทำงานของตัวรับรู้ไพโรอิเล็กทริก PVDF โดยจะทำการศึกษาว่าการตอบสนองของตัวรับรู้ไพโรอิเล็กทริกที่สร้างขึ้นจากแผ่นฟิล์ม PVDF ในด้านต่างๆ รวมถึงศึกษาการทำงานแบบไพโรมิเตอร์ของตัวรับรู้ PVDF และการทดสอบการทำงานของเครื่องตรวจจับผู้บุกรุก

5.1 การทดสอบการทำงานของตัวรับรู้ PVDF

ฟิล์มไพโรอิเล็กทริกที่ใช้เป็นฟิล์มจากบริษัท Kureha มีค่าสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกเท่ากับ $40 \mu\text{C}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ มีความหนาเท่ากับ 30 ไมโครเมตร สมบัติต่างๆทางไพโรอิเล็กทริกแสดงดังตาราง

property		Kureha KF Piezo film
curie temperature	$10^{-9} \text{ coul}/\text{cm}^2 \text{ deg}$	120
pyroelectric coefficient		4
dielectric constant		13
volume specific heat	$\text{J}/\text{cm}^3 \text{ deg}$	2.5
figure of merit	10^{-10}	1.2
heat conductivity	$10^{-3} \text{ W}/\text{cm deg}$	1.3
thermal diffusivity	$10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$	0.53

ตาราง 5.1.1 สมบัติทางไพโรอิเล็กทริกของฟิล์ม PVDF (Kureha KF) ที่ใช้สร้างตัวรับรู้

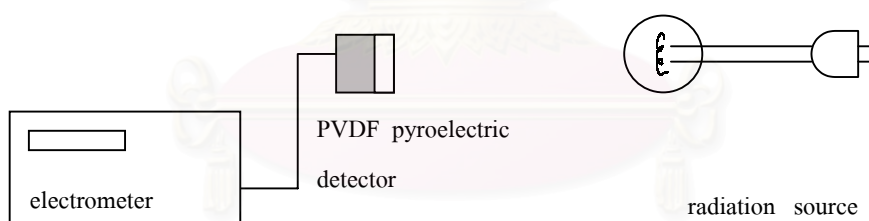
ฟิล์มไพโรอิเล็กทริกที่ดีต้องมีค่าสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกสูง ที่เหมาะกับการนำมาใช้ในงานด้านตรวจจับรังสีอินฟราเรด ต้องมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ผิวต่ำ และดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้มาก เนื่องจากการฉาบด้วยอะลูมิเนียมเพื่อเป็นอิเล็กโทรด การสะท้อนของรังสีที่ผิวอะลูมิเนียมที่มันวาวเป็นผลให้ดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่ถูกลบลง ดังนั้นจึงต้องปรับปรุงผิวอิเล็กโทรดด้านที่ต้องการ

ให้ถูกวิธี ให้สามารถดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้ดีลดการสะท้อน พบว่าหลังการทำด้วยสีดำ ทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดที่วัดได้เพิ่มขึ้นจากเดิมถึง 150 เปรอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ความหนาของสีดำที่พ่นจะต้องพอเหมาะ เพราะหากหนามากเกินไปทำให้รังสีความร้อนไปถึงผิวของฟิล์มได้น้อยลง ก่อนที่จะนำไปออกแบบใช้งานร่วมกับวงจรอื่นได้ทำการทดสอบการทำงานของตัวรับรู้

การทดลองทำโดยเก็บผลของแรงดันที่ได้จากตัวรับรู้ PVDF ขณะเปิดแหล่งแผ่รังสีที่วางห่างจากตัวรับรู้ 1 ฟุต แบบต่อเนื่องเป็นเวลาประมาณ 20 วินาที เก็บข้อมูลแรงดันทุกๆ 1/3 วินาที จากเครื่อง 617 Programable Electrometer โดยทดลองกับแหล่งกำเนิดรังสี 3 ชนิดคือ

- 1) หลอดไส้ทั้งสแตน ขนาด 100 วัตต์ 220 โวลต์ วางที่ระยะ 1 ฟุต
- 2) ซีเลียม-นีออน เลเซอร์ ขนาด 0.5 มิลลิวัตต์ วางที่ระยะ 1 ฟุต
- 3) ปลายหัวแรง 220 โวลต์ 30 วัตต์ ที่เผาร้อนคงตัวแล้ว

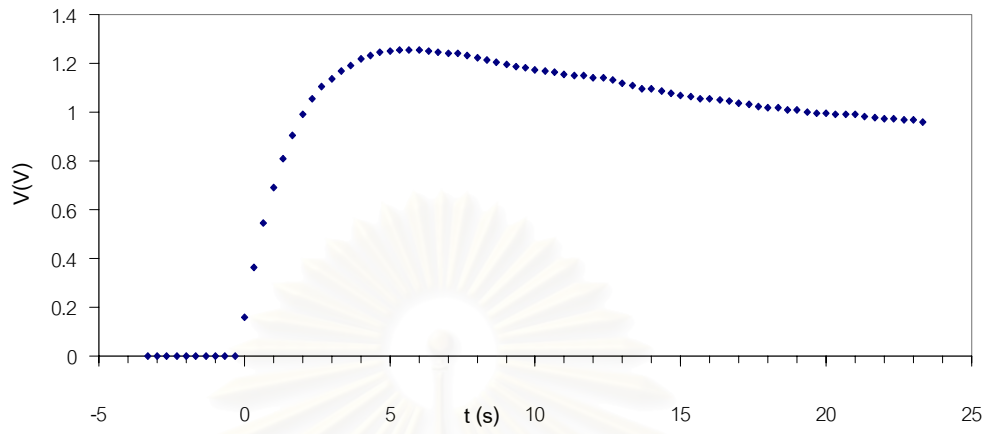
โดยระบบที่ใช้ศึกษาการตอบสนองของตัวรับรู้ PVDF ต่อแหล่งกำเนิดรังสีชนิดต่างๆ เป็นดังรูป 5.1.1



รูปที่ 5.1.1 ระบบที่ใช้ศึกษาการตอบสนองของตัวรับรู้ PVDF ต่อแหล่งกำเนิดรังสีชนิดต่างๆ

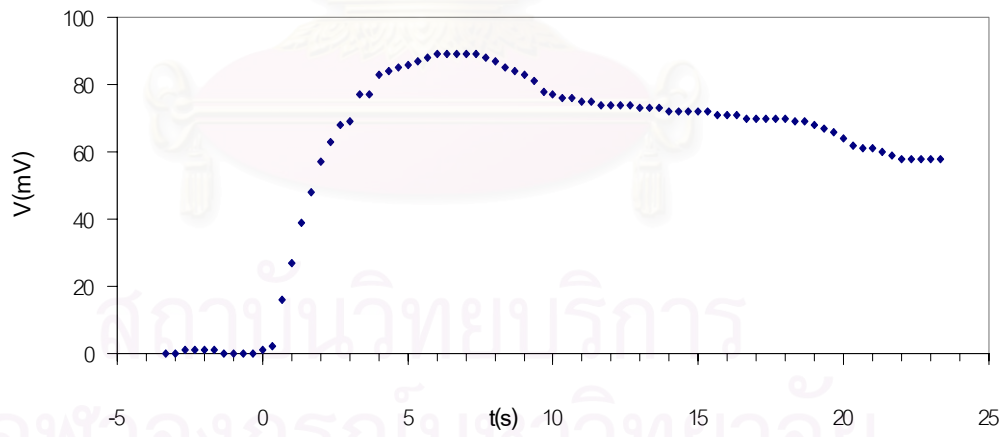
ผลการทดสอบการทำงานของตัวรับรู้เป็นดังกราฟ 5.1.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าไปตามเวลา ตั้งแต่เริ่มเปิดรับแสง ของแหล่งกำเนิดรังสีชนิดต่างๆ

100 W Bulb



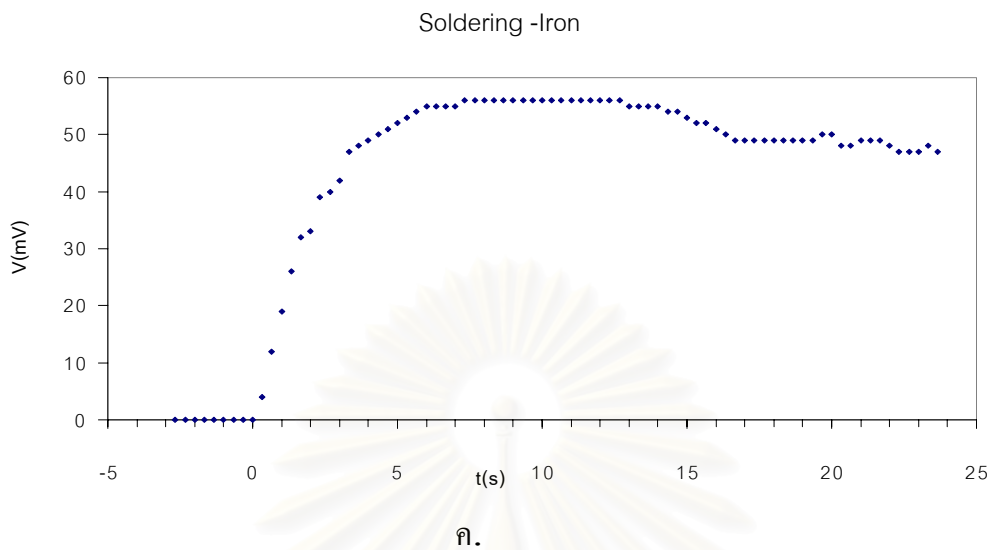
ก.

Laser



ข.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.1.2 กราฟสัญญาณเอาต์พุตจากตัวรับรู้ PVDF เมื่อเปลี่ยนแปลงแหล่งแผ่รังสีต่างกัน (ที่ระยะห่าง 1 ฟุตเท่ากัน)

- . หลอดไส้ทั้งสแตน ขนาด 100 วัตต์ 220 โวลต์
- . ฮีเลียม-นีออน เลเซอร์ ขนาด 0.5 มิลลิวัตต์
- . ปลายหัวแรง 220 โวลต์ 30 วัตต์ที่เผาเรียบร้อยแล้ว

พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของ ΔV_{out} จะมีค่ามากเรียงตามลำดับความแรงของแหล่งกำเนิด คือ หลอดไส้ทั้งสแตน ฮีเลียมนีออนเลเซอร์ และหัวแรง โดย ΔV_{out} จะมีค่ามากที่สุดเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 6 วินาที ค่าคงที่เวลาทางความร้อนของฟิล์ม PVDF บริสุทธิ์มีค่าเท่ากับ 0.9 วินาที (Measurement Specialties, 1998) เวลาที่เพิ่มขึ้นน่าจะมีสาเหตุมาจาก ขนาดของฟิล์มที่ใช้ใหญ่ทำให้การกระจายความร้อนเป็นไปได้ช้า

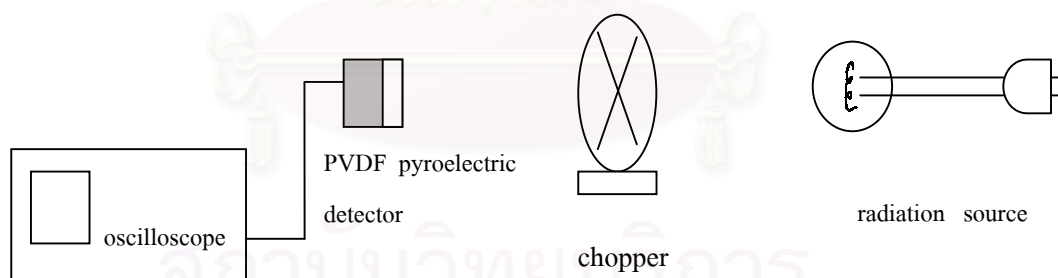
ค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุดสามารถนำไปคำนวณหา ประจุที่เปลี่ยนแปลง สรุปได้ดังตาราง โดยฟิล์มที่ใช้ทดสอบมีความหนา 30 ไมโครเมตร ขนาด 2 ตารางเซนติเมตรและค่าคงที่ได้ไอเล็กทริกเท่ากับ 12 หาค่าความจุได้ 708 พิโกฟารัด เมื่ออัตราขยายของตัวรับรู้มีค่าเท่ากับ -1 ค่าความจุสามารถในการวัดของตัวรับรู้นี้มีค่าประมาณ 1.41 mV/pC

source	voltage (mV)	charge output (pC)	sensitivity (mV/nC)
100 W blub	1250	885	1.412
He-Ne laser	90	63.7	1.413
soldering	56	39.6	1.414

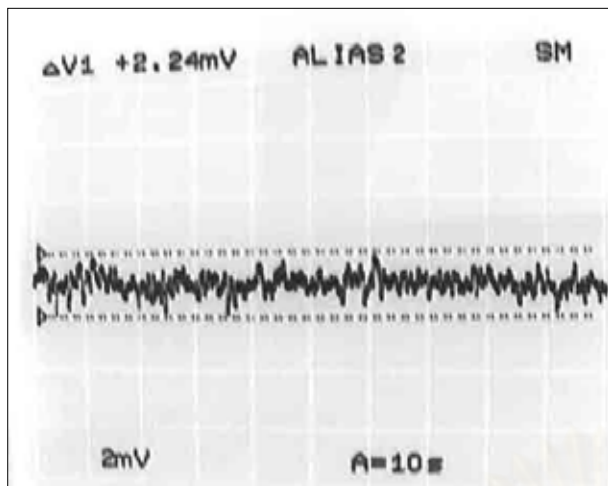
ตาราง 5.1.1 ผลการตอบสนองของตัวรับรู้ไพโรอิเล็กทริก PVDF

5.1.1 การตอบสนองต่อความถี่

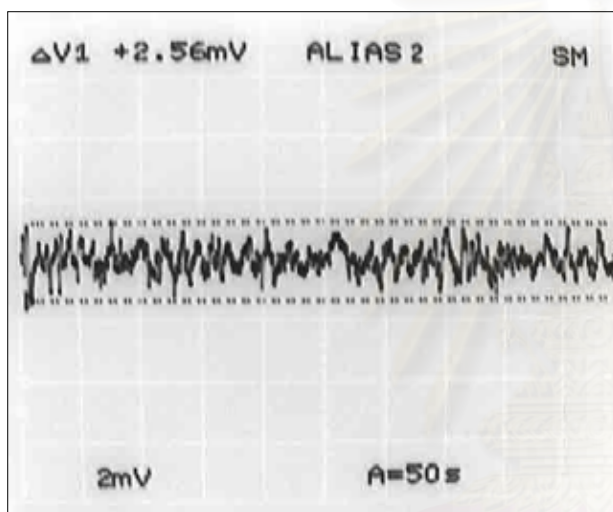
การทดสอบการตอบสนองต่อความถี่ของฟิล์มทำโดยใช้ การตัดแสงจากแหล่งกำเนิด 2 ชนิด คือหลอดไส้ทั้งสแตนด์ และ ฮีเลียมนีออนเลเซอร์ โดยใช้ชอปเปอร์ ที่สามารถปรับความถี่ได้ แต่ละความถี่ที่แสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์ม บันทึกค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุด ภาพของระบบที่ใช้ทดลองแสดงดังรูป 5.1.2 ส่วนรูปที่ 5.1.3 เป็นตัวอย่างภาพถ่ายจากจอออสซิลโลสโคปขณะทดลองการตอบสนองของฟิล์มที่ความถี่ 1.4 Hz



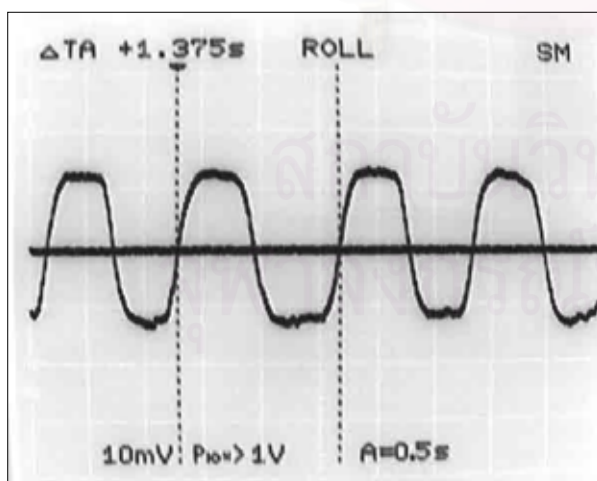
รูปที่ 5.1.3 ระบบที่ใช้ ทำการทดลองศึกษาการตอบสนองของตัวรับรู้ PVDF ต่อความถี่



(ก) สัญญาณรบกวนขณะยังไม่ได้เปิด
ชอปเปอร์



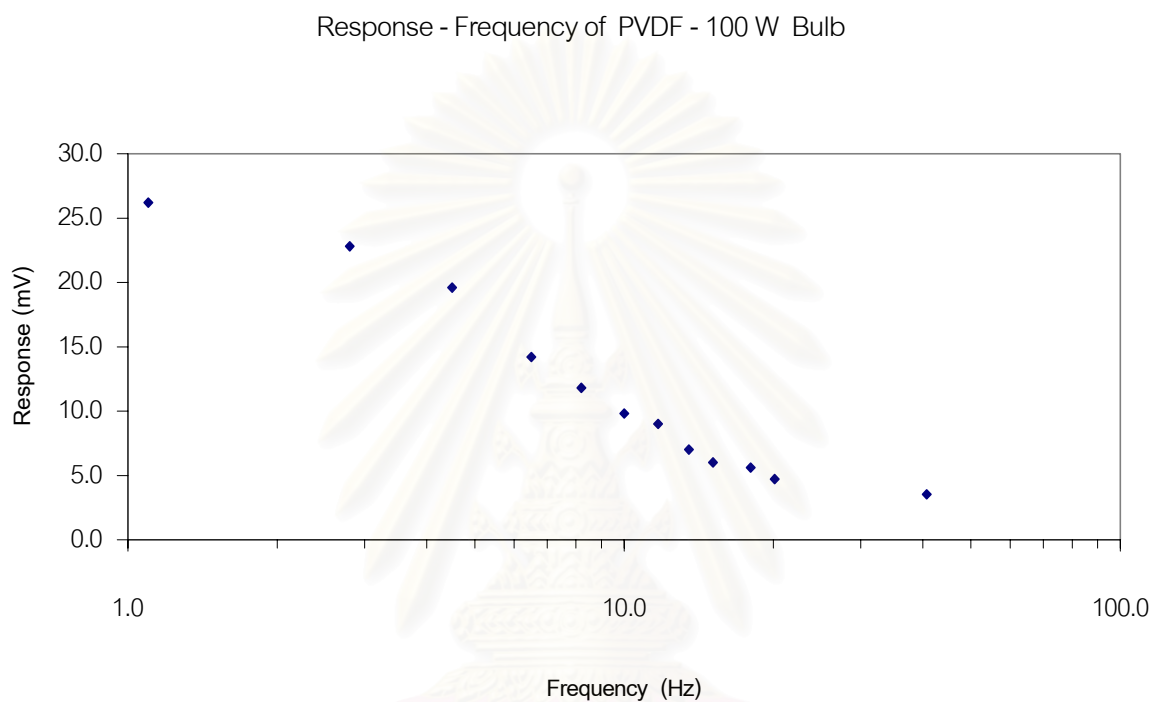
(ข) สัญญาณขณะเปิดชอปเปอร์ ความถี่ 1.4 Hz
แต่ไม่ได้เปิดแหล่งกำเนิดแสง



(ค) สัญญาณการตอบสนองของตัวรับรู้ขณะเปิด
แหล่งกำเนิดแสงผ่านชอปเปอร์ความถี่
1.4 Hz

รูปที่ 5.1.4 ภาพถ่ายสัญญาณจากตัวรับรู้ PVDF ไพโรอิเล็กทริก ผ่านจอสซซิลโลสโคป

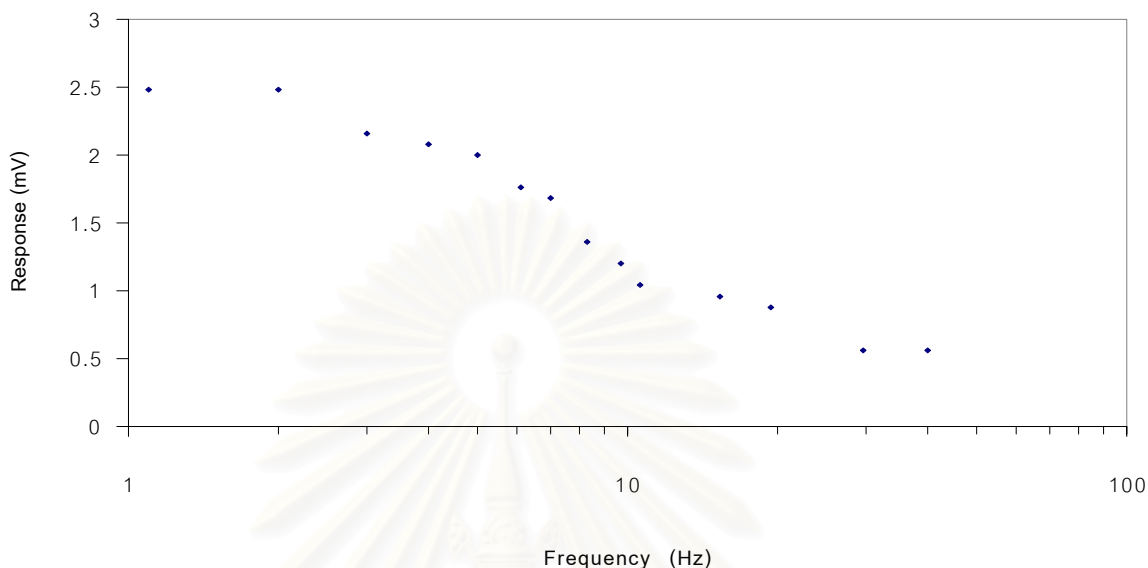
เมื่อเปลี่ยนค่าความถี่ของซอปปเปอร์ ทำให้สามารถศึกษาสมบัติของตัวรับรู้ PVDF ในการตอบสนองต่อความถี่ของคลื่นที่เข้ามาตกกระทบได้ โดยแรงดันที่วัดได้จากตัวรับรู้และความถี่ของคลื่นจากแหล่งกำเนิด หลอดไส้ และ เลเซอร์ ที่ใช้ แสดงดังรูป 5.1.5 และ 5.1.6 ตามลำดับ



รูปที่ 5.1.5 การตอบสนองของตัวรับรู้ไฟโรอิเล็กทริก ที่ช่วงความถี่ซอปปเปอร์ตั้งแต่ 1 – 40 Hz ต่อแหล่งกำเนิดหลอดไส้ทั้งสแตน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Response - Frequency of PVDF - He-Ne Laser



รูปที่ 5.1.6 การตอบสนองของตัวรับรู้ไฟโรอิเล็คทริกที่ ช่วงความถี่ชอปเปอร์ตั้งแต่ 1 – 40 Hz ต่อแหล่งกำเนิด He-Ne laser

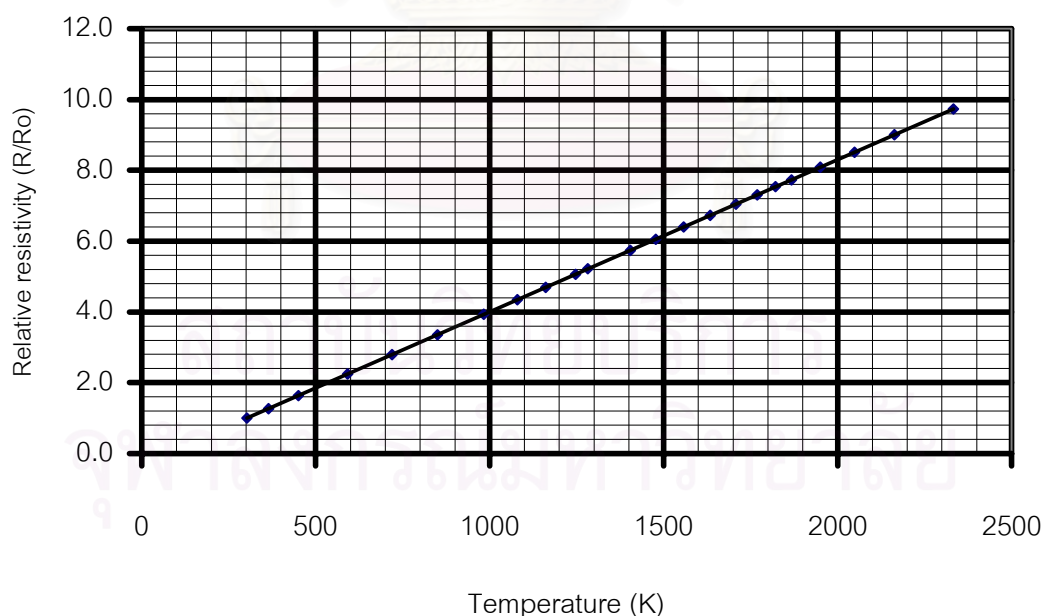
การทำงานของตัวรับรู้ไฟโรอิเล็คทริกต่อแหล่งกำเนิดที่รังสีแผ่ออกมาคงที่ จำเป็นต้องตัดแสง ผลจากการทดลองสรุปได้ว่า ตัวรับรู้ที่ใช้สามารถวัดการแผ่รังสีได้ดีในช่วงความถี่ต่ำ โดยพบว่าการตอบสนองจะลดลงจากช่วงเริ่มแรก 50 เฮอร์เซ็นต์ ที่ความถี่ประมาณ 6 Hz ดังนั้น การใช้งานตัวรับรู้ที่ให้ผลดีนั้นต้องทำที่ความถี่ต่ำๆ ในช่วง 1 – 10 Hz เพราะเมื่อความถี่สูงขึ้นทำให้ตัวรับรู้ตอบสนองต่อสัญญาณลดลง จนกระทั่งไม่สามารถแยกแยะสัญญาณที่ต้องการวัด กับสัญญาณรบกวนออกจากกันได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.1.2 การวัดอุณหภูมิโดยใช้ตัวรับรู้ไฟโรอิเล็กทริก PVDF

การใช้ตัวรับรู้ไฟโรอิเล็กทริกเป็นตัววัดอุณหภูมิทำโดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเอาต์พุตจากตัวรับรู้ กับแหล่งอุณหภูมิที่ทราบค่าแน่นอนที่แผ่ออกมา โดยได้เลือกใช้ความร้อนจากไส้หลอดทั้งสแตน วิธีการใช้ตัวรับรู้ไฟโรอิเล็กทริกหาอุณหภูมิของไส้หลอดทั้งสแตนมีวิธีการตามหลักการแผ่รังสีของวัตถุดำโดยอาศัยกฎของสเตฟาน (Stefan's law) การวัดอุณหภูมิและกำลังของไส้หลอดโดยตรงทำได้ยาก ต้องอาศัยความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานกับอุณหภูมิ $\frac{R}{R_0} = 1 + \alpha(T - T_0)$ เมื่อ α คือ ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของสภาพต้านทานไส้หลอด (temperature coefficient of resistivity for the filament) มีค่าเท่ากับ $0.0046(\text{เคลวิน})^{-1}$ สำหรับไส้หลอดทั้งสแตน และค่าความต้านทานไส้หลอด $R_0 = 40$ โอห์ม ที่อุณหภูมิห้อง $T_0 = 29$ องศาเซลเซียส ดังนั้นเมื่อค่อยๆเพิ่มความต่างศักย์ให้กับไส้หลอดและวัดกระแสที่ผ่านไส้หลอด ก็จะทราบความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไป และทราบอุณหภูมิของไส้หลอด ซึ่งการทดลองเช่นนี้สามารถทดสอบการแผ่รังสีแบบวัตถุดำของไส้หลอดได้ด้วย (Preston, 1991)

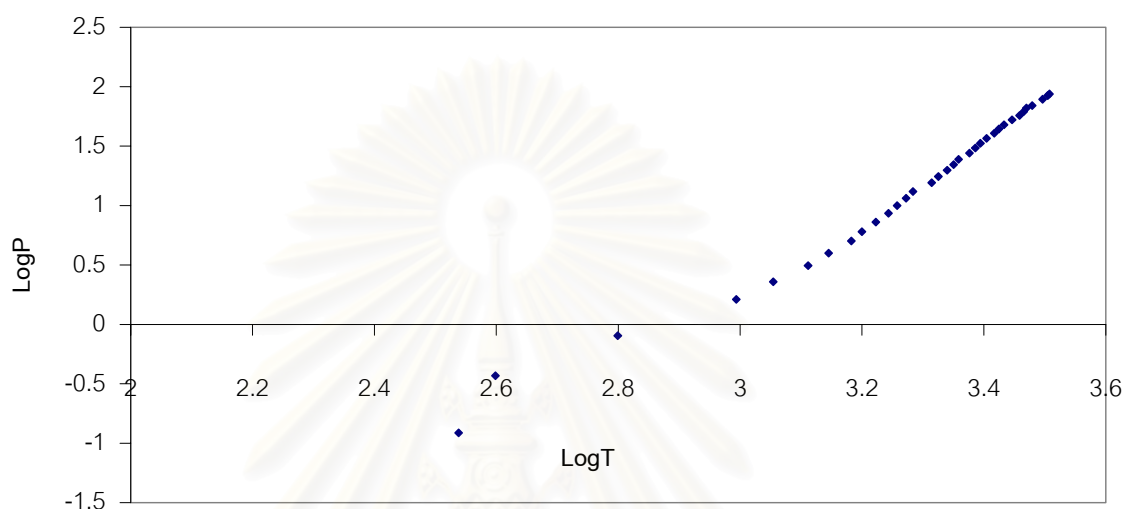
Temperature versus Resistivity from 100 W Tungsten Lamp



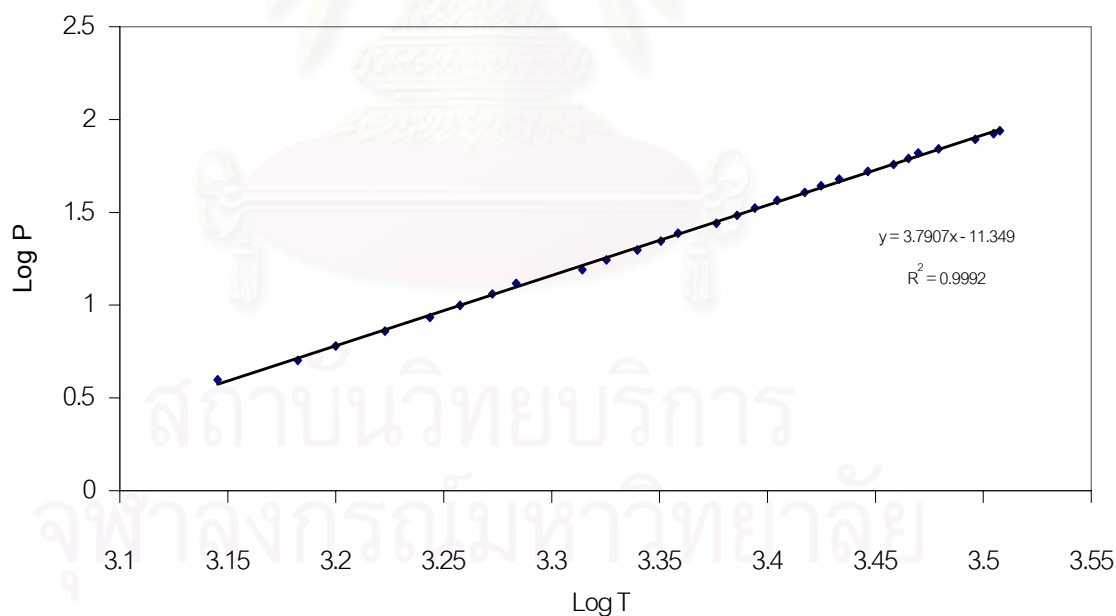
รูปที่ 5.1.7 ความสัมพันธ์ของความต้านทาน $\frac{R}{R_0}$ กับอุณหภูมิของไส้หลอด T โดย

ทดลองกับหลอดไส้ทั้งสแตนขนาด 100 วัตต์ มีความต้านทาน 40 โอห์ม ที่อุณหภูมิห้อง 29 องศาเซลเซียส

พิจารณากำลังที่เสียไปกับการแผ่รังสีของไส้หลอด เท่ากับกำลังไฟฟ้าที่หาได้จาก $P = IV$ โดยถือว่ากำลังที่เสียไปจากการนำความร้อนของไส้หลอดน้อยมากเมื่อเทียบกับกำลังที่เสียไปจากการแผ่รังสี $P \propto T^4$ ดังนั้น $\text{Log } P = 4\text{Log } T + \text{constant}$ จากผลการทดลองสามารถนำข้อมูลของ $\text{Log } P$ และ $\text{Log } T$ มาเขียนกราฟได้ดัง รูป 5.1.8



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.1.8 กราฟระหว่าง $\text{Log } P - \text{Log } T$

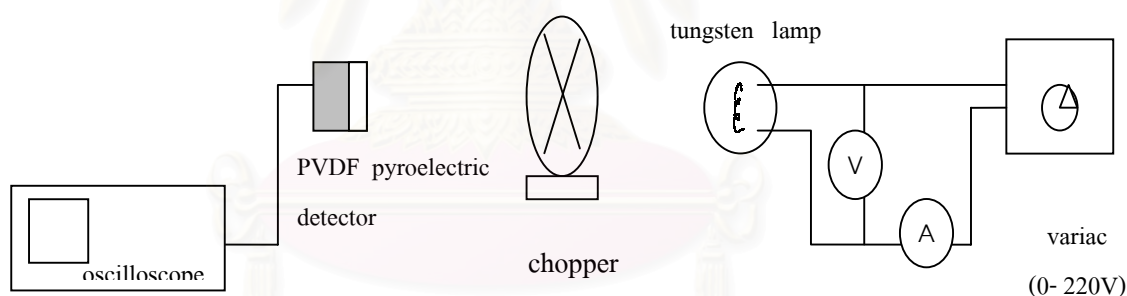
(ก) ทุกช่วงอุณหภูมิ

(ข) ที่อุณหภูมิสูงๆ

ที่อุณหภูมิค่า ๆ กราฟที่ได้จะไม่เป็นเส้นตรงเนื่องจากมีสัญญาณของวัตถุอื่นรบกวน และช่วงแรกที่ทำให้ความต่างศักย์ ขณะไส้หลอดยังไม่สว่างกำลังที่เสียไปจากการนำความร้อนที่ไส้หลอดจะมีผลด้วย ดังนั้นกำลังที่แผ่ออกจากไส้หลอดจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิสมมุติของกำลังสี่ ตามกฎการแผ่รังสีของวัตถุดำจะเริ่มพิจารณาตั้งแต่อุณหภูมิไส้หลอดมีค่าประมาณ 1000 องศาเคลวินขึ้นไป ยืนยันโดยค่าความชันของกราฟระหว่าง $\log P - \log T$ ค่าความชันใกล้เคียง 4

เมื่อทราบลักษณะการแผ่รังสีของไส้หลอดทั้งสแตนด์แล้ว จึงทำการจัดระบบเพื่อใช้ตัวรับรู้ไฟโรอิเล็กทรอนิกส์วัดการแผ่รังสีของไส้หลอด ดังรูปที่ 5.1.9 โดยระบบประกอบด้วย

1. ตัวรับรู้ต่อสัญญาณขาออกเข้ากับออสซิลโลสโคป
2. หลอดไฟฟ้าแบบไส้ (incandescent lamp)
3. ขอปเปอร์ ตั้งตัดการแผ่รังสีจากหลอดไฟ ตั้งระดับความถี่ไว้ที่ 1 Hz
4. โวลต์มิเตอร์และแอมป์มิเตอร์ เพื่อทำการหาค่าอุณหภูมิของไส้หลอดทั้งสแตนด์
5. ระบบควบคุมความต่างศักย์ที่จ่ายกับไส้หลอด ในที่นี้ใช้ variac ที่ปรับค่าแรงดันได้

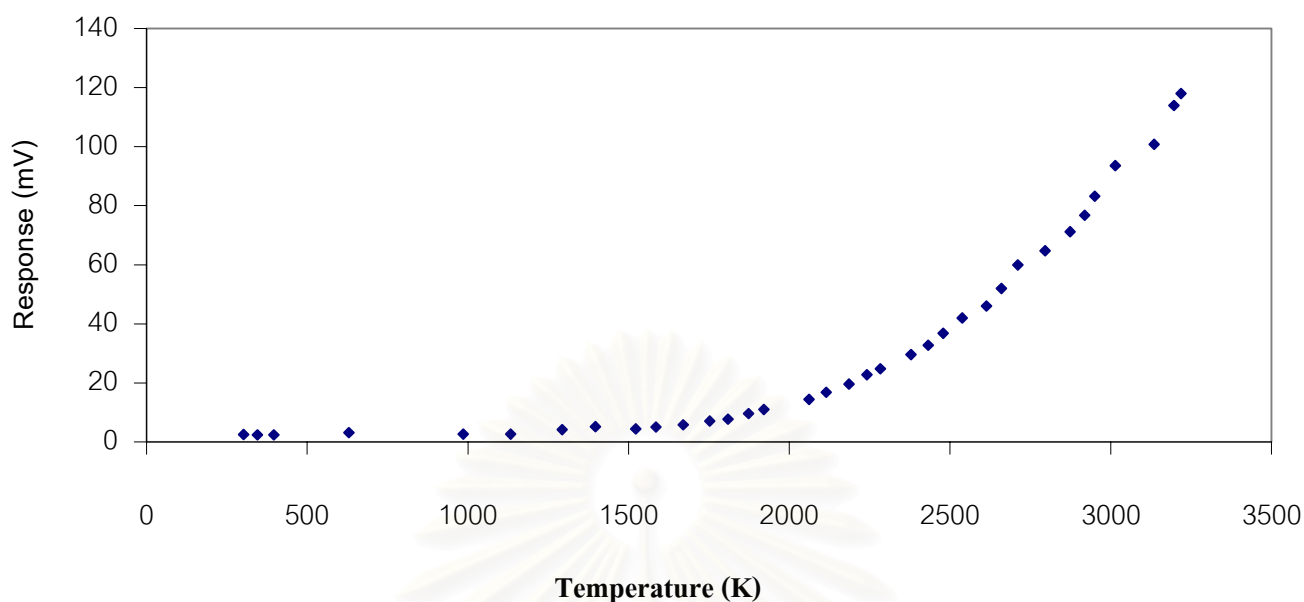


รูปที่ 5.1.9 ระบบสำหรับทดสอบการใช้ตัวรับรู้ไฟโรอิเล็กทรอนิกส์วัดการแผ่รังสีจากหลอดไส้ทั้งสแตนด์

โดยให้คิดว่าตัวรับรู้วัดกำลังการแผ่รังสีจากหลอดทั้งหมดโดยละเว้นการพิจารณาตามกฎกำลังสองผกผัน ทำการบันทึกค่าศักย์ไฟฟ้าขาออกของตัวรับรู้ขณะที่เปลี่ยนแปลงกำลังการแผ่รังสีของหลอดไฟจากการปรับค่าแรงดันจากเครื่อง variac ผ่านไส้หลอด พร้อมทั้งวัดค่าแรงดันและกระแสที่ผ่านไส้หลอดไว้ด้วย ได้ผลการทดลองดังตาราง 5.1.3

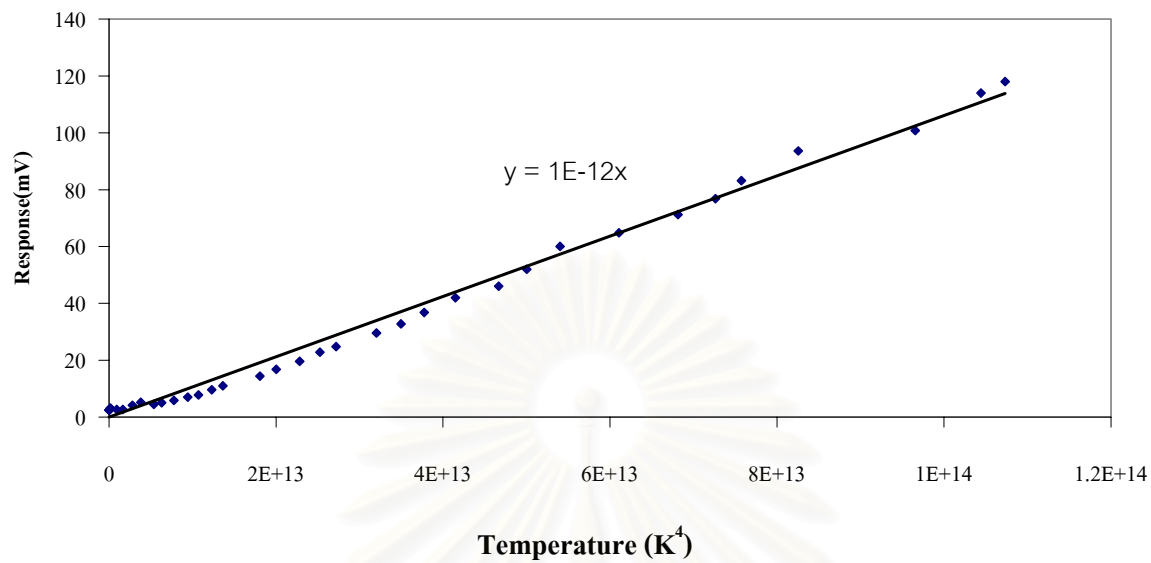
ศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้ไส้หลอด (V)	กระแส (A)	ความต้านทาน (Ω)	R/R ₀	อุณหภูมิของไส้ หลอด(K)	ความต่างศักย์จากตัวรับรู้ (mV)
0.0	0.00	41.13	1.00	302.0	2.55
2.4	0.05	48.80	1.19	345.4	2.44
4.6	0.08	57.88	1.41	396.7	2.40
8.9	0.09	99.11	2.41	629.8	3.20
16.2	0.10	162.00	3.94	985.4	2.64
20.7	0.11	188.09	4.57	1133.0	2.65
26.0	0.12	216.42	5.26	1293.1	4.16
30.5	0.13	234.85	5.71	1397.3	5.20
40.2	0.15	268.00	6.52	1584.8	5.04
45.3	0.16	283.13	6.88	1670.3	5.84
50.6	0.17	297.65	7.24	1752.4	7.04
55.4	0.18	307.78	7.48	1809.7	7.76
65.5	0.20	327.50	7.96	1921.2	11.00
74.0	0.21	352.38	8.57	2061.9	14.40
86.1	0.23	374.35	9.10	2186.1	19.60
92.2	0.24	384.17	9.34	2241.6	22.80
97.9	0.25	391.60	9.52	2283.7	24.80
106.2	0.26	408.46	9.93	2379.0	29.60
119.3	0.28	426.07	10.36	2478.6	36.80
126.6	0.29	436.55	10.61	2537.8	42.00
135.0	0.30	450.00	10.94	2613.9	46.00
149.5	0.32	467.19	11.36	2711.0	60.00
159.1	0.33	482.12	11.72	2795.5	64.80
168.6	0.34	495.88	12.06	2873.3	71.20
176.4	0.35	504.00	12.25	2919.2	76.80
190.1	0.37	520.82	12.66	3014.3	93.60
206.0	0.38	542.11	13.18	3134.6	100.80
220.0	0.40	556.96	13.54	3218.7	118.00

ตารางที่ 5.1.3 ผลการทดลองแสดงค่าความต่างศักย์จากตัวรับรู้เทียบกับอุณหภูมิของไส้หลอด



รูปที่ 5.1.10 กราฟผลการทดลองแสดงค่าความต่างศักย์จากตัวรับรู้เทียบกับอุณหภูมิของไส้หลอด

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ตัวรับรู้ PVDF ที่อุณหภูมิต่ำ ๆ ในช่วงแรก ตัวรับรู้ที่ใช้จะตอบสนองในระดับต่ำไม่สามารถแยกแยะระดับอุณหภูมิสัญญาณรบกวนได้ และตอบสนองดีขึ้นเป็นเมื่อไส้หลอดมีอุณหภูมิตั้งแต่ 2000 เคลวินขึ้นไป เมื่อนำข้อมูลของสัญญาณแรงดันที่ได้จากตัวรับรู้ PVDF และค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ของไส้หลอดยกกำลังสี่มาวาดกราฟอีกครั้ง จะได้ผลสอดคล้องตามกฎของสเตฟาน โดยแรงดันที่วัดได้จากตัวรับรู้มีลักษณะเป็นเชิงเส้นแปรผันตรงกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ของไส้หลอดยกกำลังสี่ ด้วยสัมประสิทธิ์เท่ากับ 10^{-12} มิลลิโวลต์ต่อเคลวินกำลังสี่ ดังนั้นตัวรับรู้มีสมบัติที่เหมาะสมในการใช้เป็นตัวตรวจวัดอุณหภูมิการแผ่รังสี (radiation detector) ได้

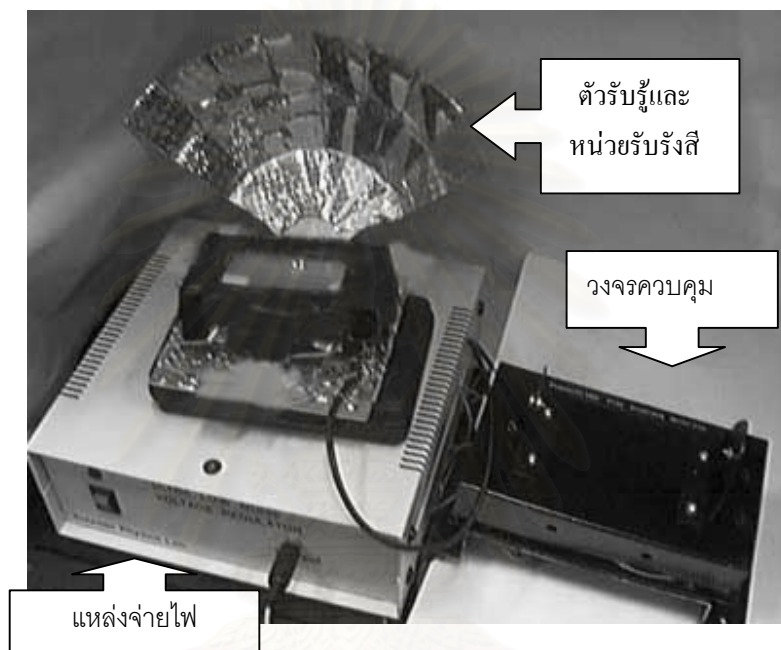


รูปที่ 5.1.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์จากตัวรับรู้เทียบอุณหภูมิ
ไต้หลอดกำลังสี่

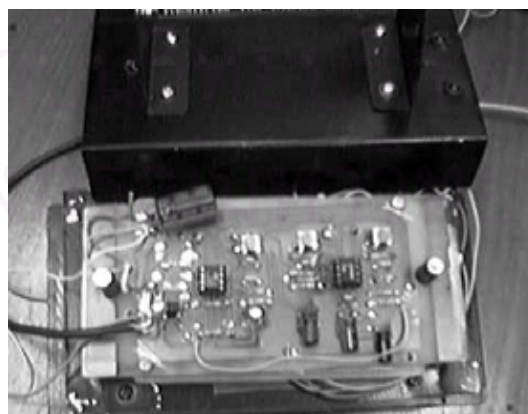
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2 การทดสอบการทำงานของเครื่องตรวจจับผู้บุกรุก

เมื่อออกแบบส่วนต่างๆของ เครื่องตรวจจับผู้บุกรุกจากฟิล์มพอลิเมอร์ไพโรอิเล็กทริก PVDF เสร็จแล้วจะได้รูปร่างเครื่องตรวจจับผู้บุกรุก ประกอบไปด้วย 3 ส่วนคือ ตัวรับรู้และหน่วยรับรังสี ส่วนวงจรควบคุมการทำงาน (วงจรขยายและกรองความถี่ และวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ) ส่วนการเตือนภัย และแหล่งจ่ายไฟสัญญาณรบกวนต่ำพิเศษ ดังรูป 5.2.1



รูปที่ 5.2.1 รูปร่างภายนอกของเครื่องตรวจจับผู้บุกรุก

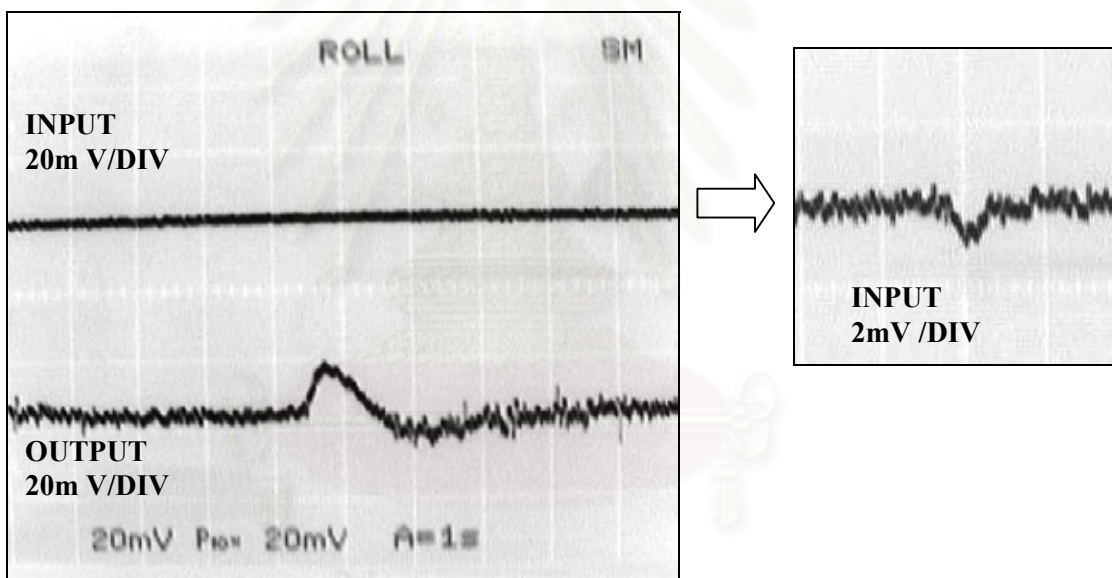


รูปที่ 5.2.2 ส่วนประกอบภายในของวงจรควบคุม

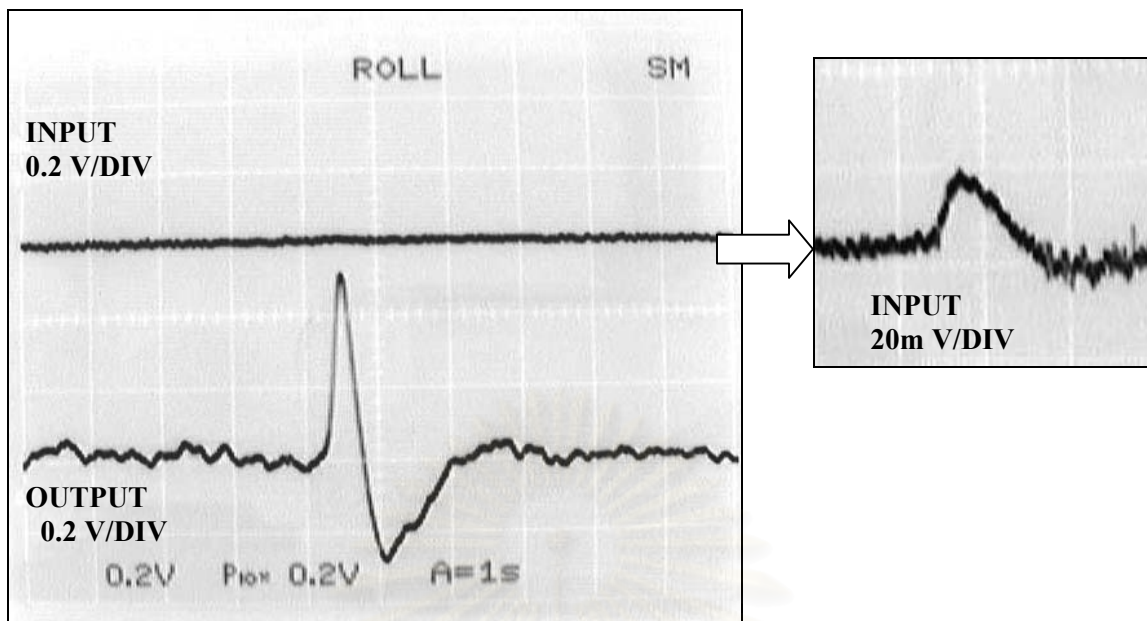
5.3 ผลการทดสอบการทำงานของวงจร

ในตอนแรกจะเป็นการตรวจสอบสัญญาณจากส่วนต่างๆของวงจร ว่ามีลักษณะสัญญาณออกมาตามที่ควรจะเป็นหรือไม่ โดยวัดสัญญาณจากส่วนต่างๆขณะมีผู้บุกรุกผ่านตัวตรวจจับ ซึ่งได้ผลการทดสอบดังนี้

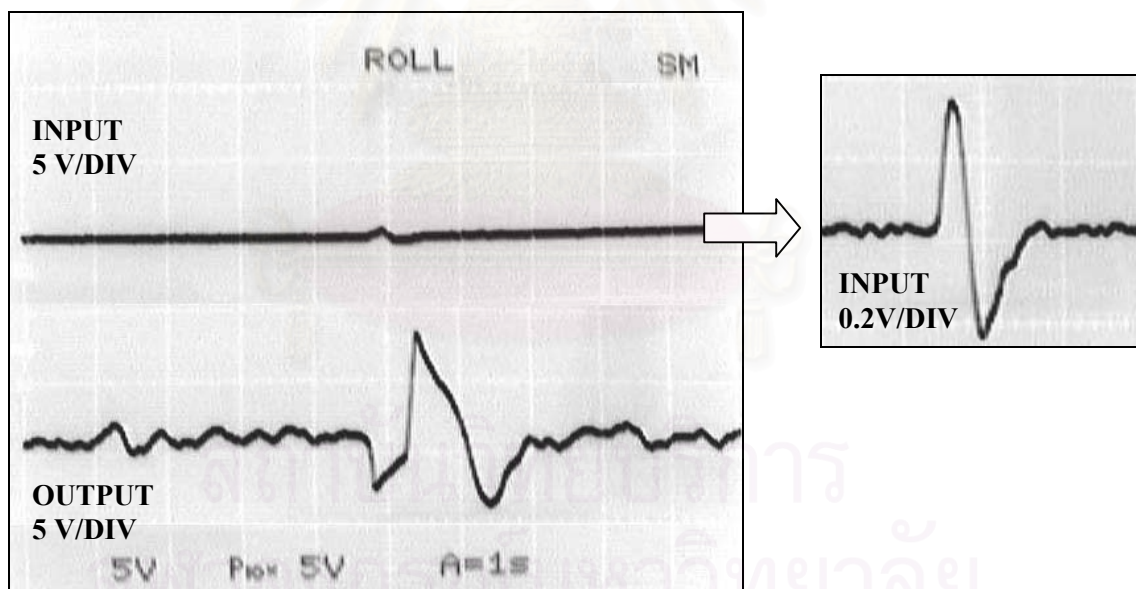
กราฟ 2 เส้นบนจอออสซิลโลสโคปในรูปที่ 5.3.1 แสดงสัญญาณขาเข้าและขาออกวงจรขยายและกรองความถี่ในลำดับที่ 1 (ในเสกกลเดียวกัน) โดยภาพเล็กด้านขวา แสดงภาพการขยายภาพสัญญาณขาเข้า ในทำนองเดียวกันกับรูปที่ 5.3.2 และรูปที่ 5.3.3 เป็นสัญญาณขาเข้าและขาออกของวงจรขยายและกรองความถี่ลำดับที่ 2 และ 3 ตามลำดับ



รูปที่ 5.3.1 สัญญาณขาเข้า(กราฟเส้นบน) และขาออก(กราฟเส้นล่าง) จากวงจรขยายและกรองความถี่ลำดับที่ 1

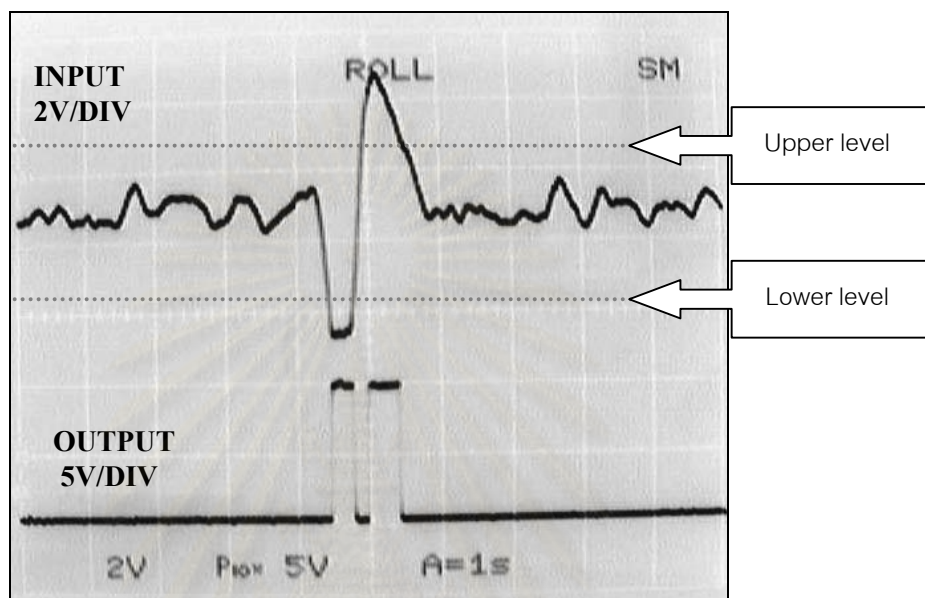


รูปที่ 5.3.2 สัญญาณขาเข้า(กราฟเส้นบน) และขาออก(กราฟเส้นล่าง) จากวงจรขยายและกรองความถี่ลำดับที่ 2



รูปที่ 5.3.3 สัญญาณขาเข้า(กราฟเส้นบน) และขาออก(กราฟเส้นล่าง) จากวงจรขยายและกรองความถี่ลำดับที่ 3

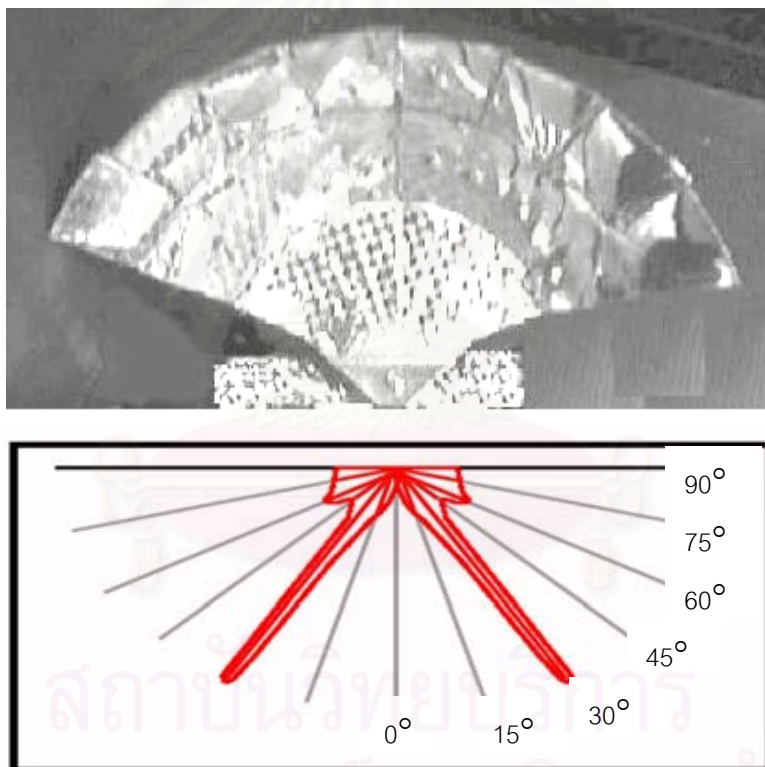
สัญญาณที่ถูกปรับแต่งและขยายจากวงจรขยายและกรองความถี่ ในลำดับที่ 3 (ลำดับสุดท้าย) จะถูกสังเกตวิเคราะห์ เพื่อตั้งระดับการเปรียบเทียบทางด้านสัญญาณสูงและต่ำของช่องสัญญาณ(window) ในวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ ดังที่อธิบายไว้แล้วในบทที่ 4 โดยการแสดงผลทางขาเข้าและขาออกของวงจรส่วนนี้จะเป็นดังรูป 5.2.5



รูปที่ 5.3.4 สัญญาณขาเข้า(กราฟเส้นบน) และขาออก(กราฟเส้นล่าง) จากวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ

5.4 ผลการทดสอบการทำงานการตรวจวัดผู้บุกรุกในเขตหวงห้าม

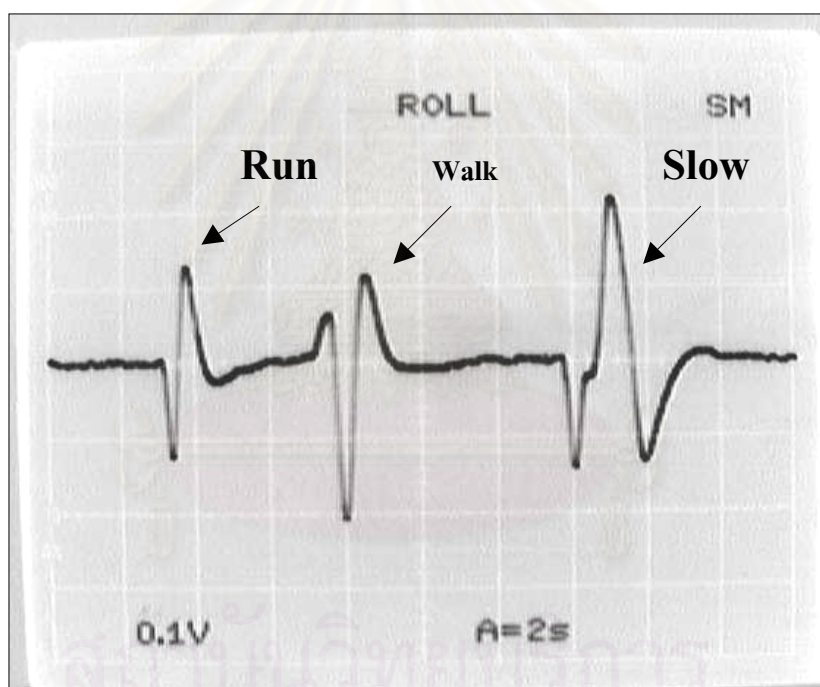
การทดสอบการทำงานของเครื่องตรวจจับผู้บุกรุกที่สร้างขึ้นจากฟิล์มไพโรอิเล็กทริกพอลิเมอร์ PVDF ได้ทำการทดสอบ 3 แบบ คือ การทดสอบขณะผู้บุกรุกเคลื่อนที่เร็ว (วิ่ง) การทดสอบขณะผู้บุกรุกเคลื่อนที่ช้า (เดิน) และการทดสอบขณะผู้บุกรุกเคลื่อนที่ช้ามาก (ย่อง) โดยทั้ง 3 แบบ จะทำการทดสอบที่ระยะต่าง ๆ กัน เพื่อดูขอบเขตที่เครื่องมือสามารถจะใช้ตรวจจับได้ด้วย เนื่องจากได้ใช้แผ่นสะท้อนในการรับคลื่นจากตัวผู้บุกรุกไปสู่ตัวรับรู้เป็นการเพิ่มสัญญาณในการตรวจจับ ดังนั้น มุมในการวางตัวรับรู้และหน่วยรับรังสี จึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้ได้ระยะตรวจจับที่ไกล จากการศึกษาตำแหน่งการทำมุมของแผ่นสะท้อนจะได้ผลดังรูป 5.4.1



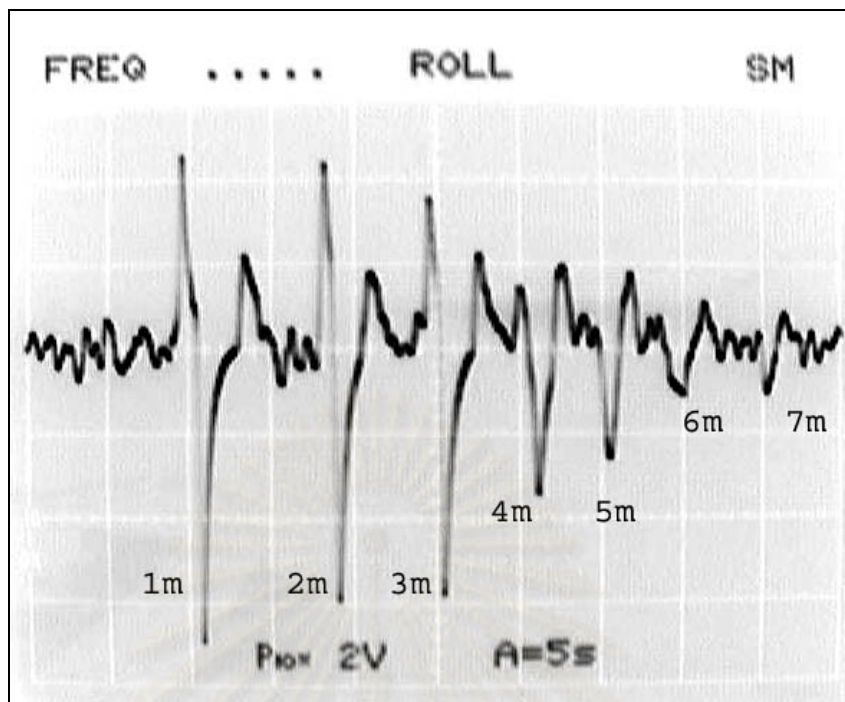
รูปที่ 5.4.1 ระดับความแรงของสัญญาณที่วัดได้ เมื่อทดสอบฉายแสงที่มุมต่างๆ ของหน่วยรับรังสี

จากรูป 5.4.1 ได้ว่าต้องตั้งหน่วยรับรังสีและตัวรับรู้ให้มุมของแผ่นสะท้อนทำมุมประมาณ 30 องศา กับบริเวณที่ต้องการตรวจจับผู้บุกรุกจึงจะได้การตรวจจับที่ผิดพลาดน้อยที่สุด และระยะเวลาในการตรวจจับที่ไกล

หลังจากเลือกวางเครื่องตรวจจับผู้บุกรุกในตำแหน่งที่เหมาะสมแล้ว ต่อไปจะเป็นการศึกษา ลักษณะสัญญาณในกรณีที่ผู้บุกรุกเคลื่อนที่ในแบบต่าง ๆ กัน เมื่อผู้บุกรุกเคลื่อนช้า ระยะเวลาที่คลื่นจะกระทบบนหน่วยรับรังสีจะยาวกว่าเมื่อผู้บุกรุกเคลื่อนที่เร็ว ทำให้ได้สัญญาณที่แรงกว่า ดังนั้น เครื่องตรวจจับผู้บุกรุกน่าจะตรวจจับผู้บุกรุกที่เคลื่อนที่ช้าได้แม่นยำกว่าผู้บุกรุกที่เคลื่อนที่เร็ว ลักษณะรูปคลื่นเมื่อผู้บุกรุกเคลื่อนที่ต่าง ๆ กัน ที่บันทึกภาพได้จากวงจรขยายและกรองความถี่แสดง ดังรูป 5.4.2



รูปที่ 5.4.2 ลักษณะรูปคลื่น(wave form) จากวงจรขยายและกรองความถี่ เมื่อผู้บุกรุกเคลื่อนที่เร็ว (Run) ช้า(Walk) และช้ามาก (Slow motion)



รูปที่ 5.4.3 ผลการทำงานของเครื่องตรวจจับผู้บุกรุก ในกรณีที่ผู้บุกรุกเคลื่อนไหวแบบซ้ำ ในระยะ 1-7 เมตร

พิจารณารูปที่ 5.4.3 ได้ว่าระยะในการตรวจจับที่ไกลพอที่จะผ่านการตัดสินใจของวงจรประมวลผลได้คือที่ระยะ 4 เมตร ถัดต่อไปเป็นการทดสอบความผิดพลาด ทำการทดสอบการทำงานหลาย ๆ ครั้งในระยะนี้ ใน 2 ช่วงเวลาแตกต่างกัน คือ ในเวลากลางวัน (9.00-12.00) และ กลางคืน (21.00 – 22.00 น.) เพื่อการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องตรวจจับผู้บุกรุกที่สร้างจากฟิล์มพอลิเมอร์ไพโรอิเล็กทริก PVDF ในสภาวะการบุกรุกที่แตกต่างกัน จากการทดสอบที่สภาวะการต่าง ๆ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.4.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สภาวะของผู้บุกรุก	% ความผิดพลาด	
	กลางวัน	กลางคืน
เคลื่อนที่ช้ามาก(ย่อง)	5	8
เคลื่อนที่ช้า(เดิน)	8	16
เคลื่อนที่เร็ว(วิ่ง)	12	25

ตาราง 5.4.1 ความคลาดเคลื่อนในการตรวจจับผู้บุกรุกที่ระยะ 4 เมตร เมื่อผู้บุกรุกเคลื่อนแตกต่างกันในเวลากลางวันและกลางคืน

โดยสรุปเครื่องตรวจจับผู้บุกรุกจากตัวรับรู้พอลิเมอร์ไฟโรอิเล็กทริกที่สร้างขึ้น สามารถตรวจจับผู้บุกรุกที่เคลื่อนที่ช้าและช้ามากได้ดี การตอบสนองในเวลากลางวันนอกจากตัวรับรู้ตอบสนองกับรังสีอินฟราเรดจากผู้บุกรุกที่ผ่านเข้ามาแล้ว ยังมีสัญญาณเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงแสง(มืด-สว่าง) เมื่อผู้บุกรุกผ่านเข้ามาด้วย การตอบสนองต่อความถี่ของสารไฟโรอิเล็กทริกเป็นแถบความถี่กว้าง อาจถือเป็นข้อดีเพราะเป็นการเสริมให้สัญญาณข้างต้นแรงขึ้น แต่หากบังแสงด้วยฟิลเตอร์พบว่ายังสามารถตรวจจับผู้บุกรุกได้ นี่คือสาเหตุที่ทำให้เวลากลางคืนที่มีดสนิทเมื่อมีผู้บุกรุกเครื่องตรวจจับผิดพลาดมากกว่าในระยะเดียวกันกับเวลากลางวัน การแก้ไขทำได้โดยเพิ่มอัตราขยายของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ให้มากขึ้นกว่าตอนกลางวัน และอาจเปิดไฟในห้องที่ตรวจจับให้สว่างไว้ด้วย อีกสาเหตุหนึ่งของความผิดพลาดในเวลากลางคืนคือในเวลากลางคืนมีอากาศที่ชื้นกว่าเวลากลางวันอาจทำให้ฟิล์มตอบสนองช้าลง

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

ปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริก หมายถึง สัญญาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง เครื่องตรวจจับผู้บุกรุกหรือดักจับความเคลื่อนไหวส่วนมากมักผลิตโดยใช้หลักการไพโรอิเล็กทริก โดยตรวจจับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเนื่องจากรังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกมาจากตัวผู้บุกรุก

ฟิล์มพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) เป็นสารพอลิเมอร์ ที่สามารถแสดงสภาพไพโรอิเล็กทริกออกมาได้หลังจากผ่านกรรมวิธีทางกายภาพที่เหมาะสม ทว่าสภาพไพโรอิเล็กทริกในพอลิเมอร์แบบนี้ ยังมีค่าไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับสารไพโรอิเล็กทริกชนิดเซรามิก แต่เนื่องจาก PVDF มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำทำให้มีการตอบสนองทางไฟฟ้าที่ดี และสามารถทำให้เป็นแผ่นบางได้มาก เป็นผลให้อุณหภูมิที่รับมากระจายได้ทั่วทั้งแผ่น โดยง่าย ทำให้มีความไวในการตรวจจับสูง

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนานำฟิล์มไพโรอิเล็กทริก PVDF มาทำเป็นตัวรับรู้เพื่อใช้ในเครื่องตรวจจับผู้บุกรุกได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลการตอบสนองในลักษณะต่างๆของฟิล์มไพโรอิเล็กทริก PVDF พบว่าระดับความแรงของสัญญาณไพโรอิเล็กทริกจะขึ้นกับความแรงของคลื่นอินฟราเรดที่แผ่ออกมาจากแหล่งกำเนิด โดยได้ค่าความสามารถในการวัดของตัวรับรู้เท่ากับ 1.41 mV/pC ฟิล์มไพโรอิเล็กทริก PVDF จะตอบสนองได้ดีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของรังสีอินฟราเรดที่มีความถี่ต่ำ (1-10Hz) และระดับการตอบสนองจะลดลงที่ความถี่สูงขึ้น และได้นำเสนอการประยุกต์นำตัวรับรู้ PVDF ไพโรอิเล็กทริกไปใช้วัดอุณหภูมิของไส้หลอดทั้งเสตน โดยให้ผลสอดคล้องตามหลักของการแผ่รังสีของสเตฟาน

เครื่องตรวจจับผู้บุกรุกโดยใช้ฟิล์มไพโรอิเล็กทริกพอลิเมอร์ PVDF นี้ สามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเนื่องจากการแผ่รังสีเวลามีผู้บุกรุกผ่านเข้ามาในบริเวณที่ตรวจจับได้ ไม่ว่าผู้บุกรุกจะเคลื่อนที่ช้าหรือเร็ว แต่จะมีความถูกต้องมากเมื่อผู้บุกรุกเคลื่อนที่ช้า โดยที่ระยะตรวจจับ 4 เมตร พบว่าเครื่องตรวจจับผู้บุกรุกที่สร้างขึ้นนี้ให้ความถูกต้องในการเตือนภัย 95 % สำหรับการเคลื่อนที่แบบช้ามากในเวลากลางวัน แต่ถ้านำไปตรวจจับผู้บุกรุกที่เคลื่อนที่เร็วจะให้ความผิดพลาดสูง ทั้งนี้เนื่องมาจากการที่ผู้บุกรุกเคลื่อนที่ช้าทำให้ตัวสะท้อนได้รับรังสีจากตัว

ผู้บุกรุกปริมาณมากกว่าเมื่อผู้บุกรุกเคลื่อนที่เร็ว ดังนั้นเครื่องตรวจจับผู้บุกรุกน่าจะใช้งานได้ดี เพราะผู้บุกรุกมักเคลื่อนที่ช้าเข้ามาบริเวณหวงห้าม และหากบริเวณที่ตรวจจับมีแสงสว่างก็จะทำให้การตรวจจับได้ผลดียิ่งขึ้น

6.2 ข้อเสนอแนะ

แนวทางที่จะปรับปรุงในการสร้างเครื่องตรวจจับผู้บุกรุกจากฟิล์มไพโรอิเล็กทริก PVDF ทำงานได้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นมีดังนี้

1. การทำตัวตรวจวัดจากฟิล์ม PVDF ควรหาฟิล์มที่มีประสิทธิภาพสูง เพื่อลดขนาดของตัวรับรู้ลงซึ่งมีผลในแง่ของการลดสัญญาณรบกวน การลดสัญญาณรบกวนให้ได้มากควรกระทำอย่างดี ตั้งแต่ก่อนเข้าสู่วงจรขยาย เนื่องจากวงจรขยายที่สามารถทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเวลา มีผู้บุกรุกต้องมีอัตราขยายเป็นหมื่นๆ เท่า จึงจะใช้งานได้

2. ในการสร้างเครื่องตรวจจับผู้บุกรุกพบปัญหาจากการเลือกอุปกรณ์มอสเฟต มาใช้ในวงจรถยายเบื้องต้น เนื่องจากมอสเฟตส่วนใหญ่มีคุณภาพไม่ตรงตามมาตรฐาน ทำให้สัญญาณที่ได้ไม่มีเสถียรภาพพอที่จะเข้าวงจรส่วนอื่นและทำงานได้ในตอนแรก ดังนั้นการเลือกอุปกรณ์ที่ใช้ในส่วนนี้จึงเป็นเรื่องสำคัญ

3. หน่วยรับรังสีหากมีขนาดใหญ่และรูปร่างที่เหมาะสมน่าจะให้ประสิทธิภาพเครื่องดีขึ้น อาจมีการเพิ่มเฟรสเนลเลนส์ (fresnel lens) และ ฟิลเตอร์ (filter) ที่สามารถกรองและโฟกัสเฉพาะรังสีอินฟราเรด ในช่วงเฉพาะจากร่างกายมนุษย์ ($9.35 \mu\text{m}$) ทำให้ตรวจจับแม่นยำถูกต้องในระยะที่ไกลขึ้น

4. ใช้หลอดไฟแบบไส้ ส่งคลื่นความร้อนไว้ตลอดเวลาที่บริเวณตรวจจับ จะทำให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อมีผู้บุกรุกผ่านเข้ามา มีมากกว่าการเปลี่ยนแปลงในกรณีอุณหภูมิห้องปกติ ซึ่งจะทำให้การตรวจจับแม่นยำยิ่งขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

คูสิต เครื่องงาม. สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยี และการใช้งาน เล่ม 1.

กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542 .

ชูศรี มีอุทัยสิน . การพัฒนาพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์พอลิเมอร์เป็นไฟโรอิเล็กทริกและการประยุกต์
. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
, 2536.

พูนศักดิ์ สันตวิธานนท์ . การพัฒนาอุปกรณ์ตัวรับรู้ไฟโรอิเล็กทริกโดยใช้พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์
. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
, 2541.

ภูมินทร์ เพิ่มศิริ . เครื่องวัดปริมาณการจราจรบนท้องถนนโดยใช้อุปกรณ์แบบไฟโรอิเล็กทริก.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย , 2543.

สมศักดิ์ กิรติวุฒิเศรษฐ์ . หลักการและการใช้งานเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม . กรุงเทพมหานคร :
สำนักพิมพ์ ส.ท.ท. , 2545 .

ภาษาอังกฤษ

Bauer , S. Pole Polymer for Sensors and Photonic Applications. J.App.Phys. . 80 (November
1996) : 5531-5557.

Delaney, C.F.G. ,and Finch, E.C. Radiation Detectors Physical Principle and Application.
Oxford:Clarendon Press ,1992 .

Dereniak, L.E. ,and Crowc, D.G. Optical Radiation Detectors. New York: John Wiley &
Son,1984 .

Eiso, Y. Pyroelectric Applications . In Wang, T.T., Herbert, J.M. , and Glass, A.M. (eds.),
The Applications of Ferroelectric Polymers. pp. 329-348 . Blackie and Son , 1988 .

Freitag , R. A Sensors Arrays for Human-body Detection on Pyroelectric Polyvinylidene
Fluoride. IEEE Transaction on Electrical Insulation 24 (June 1989) :469-472 .

Hossain, A. Pyroelectric Detectors and Their Application . IEEE Transaction on Industry
Application 27 (September 1991):824-829 .

Hamamatsu Photonics . Characteristics and Use of Infrared Detectors . Technical Information
(July 1993):SD-12 .

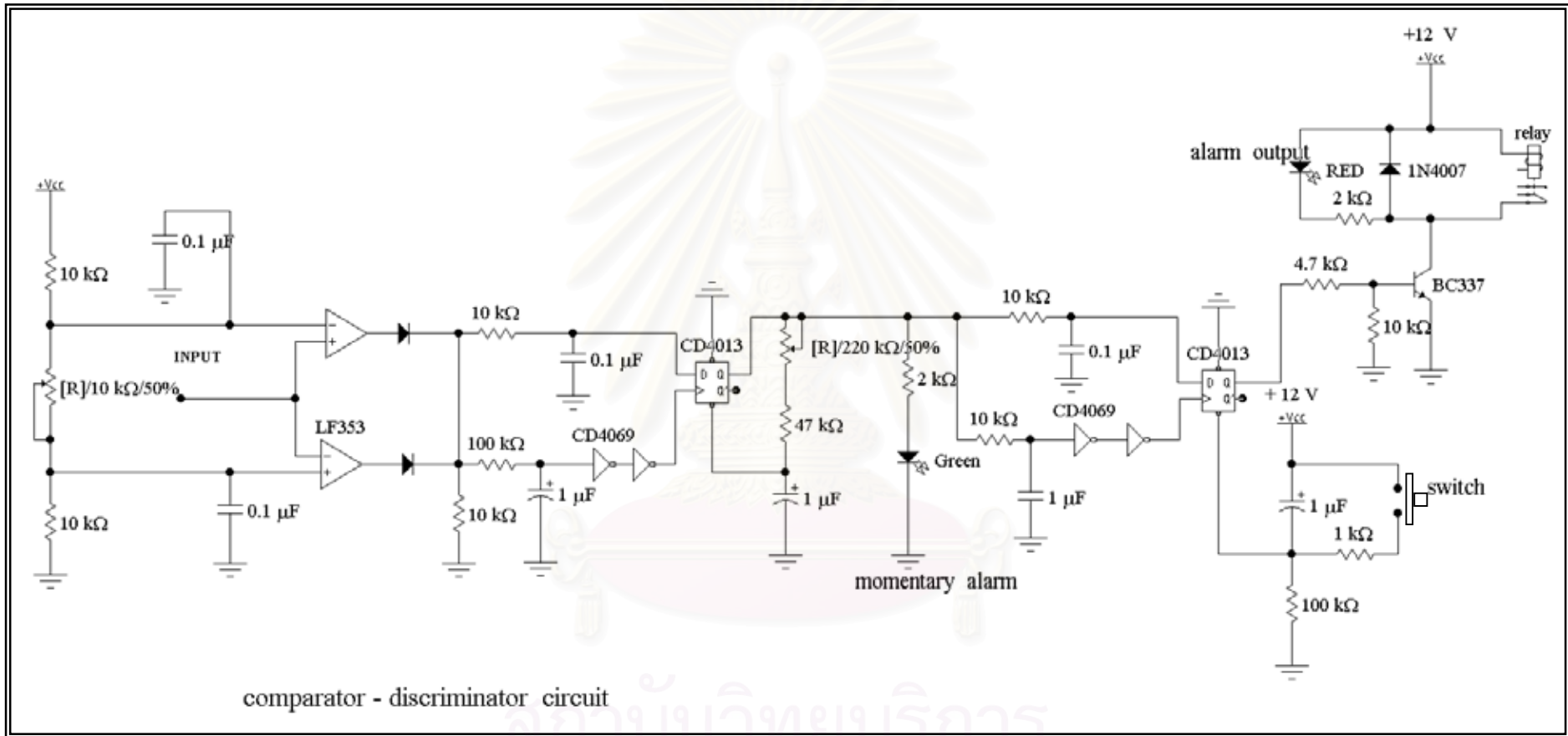
Kepler, R.G. and Anderson, R. Ferroelectric Polymer. Advance in Physics 41 (1992) : 1-57.

- Khandelwal , D.P. A Laboratory Manual of Physics . Kanpur :Vani Educationnal Books, 1985.
- Kittel , C. Introduction to Solid State Physics. 6th ed. New York : John Wiley & Sons,1996 .
- Lines, M.E. and Glass , A.M. Principles and Application of ferroelectric and Related Material. Oxford: Clarendon Press, 1977.
- Lovinger , A. J. Ferroelectric Polymers . Science. 220(June 1983):1115-1121.
- Measurement Specialties. Pyroelectric Response in PVDF .Piezo Film Sensor Technical Manual. Part 7(August 1998):1-3.
- Mooney , W. J. Optoelectronic Device and Principle . London : Prentice – Hall International. ,1991 .
- Mort , J. ,and Pfister, G. Electronic Properties of Polymers. New York : John Wiley & Sons,1982 .
- Moulson, A . J. ,and Herbert, J.M. Electroceramics: Materials Properties Applications. London : Chapman and Hall ,1990 .
- Nalwa, H. S. Ferroelectrics Polymers :Chemistry Physics and Applications. New York : Mercel Dekker ,Inc . 1995 .
- Nye, J. F. Physical Properties of Crystals. London : Oxford University Press,1996 .
- Preston, D.W. , and Dietz, E.R. The Art of Experimental Physics . New York : John Wiley & Son,1991 .
- Reitz , J.R. ,and Milford , F. J. Foundations of Electromagnetic Theory. Massachusetts : Addison-Wesley,1962 .
- Setiadi ,D. A Pyroelectric Polymer Infrared Sensor Array with Charge Amplifier Readout . Sensors and Actuators 76(1999):145-151.
- Takahashi ,Y. Crystal Structure of From II of Poly(vinylidene fluoride) . Macromolecules. 16 (1983): 1588-1592 .
- Wang, T. T. ,Herbert, J.M. ,and Glass, A.M. The applications of Ferroelectric Polymers. Glasgow : Blackie and Son , 1988.

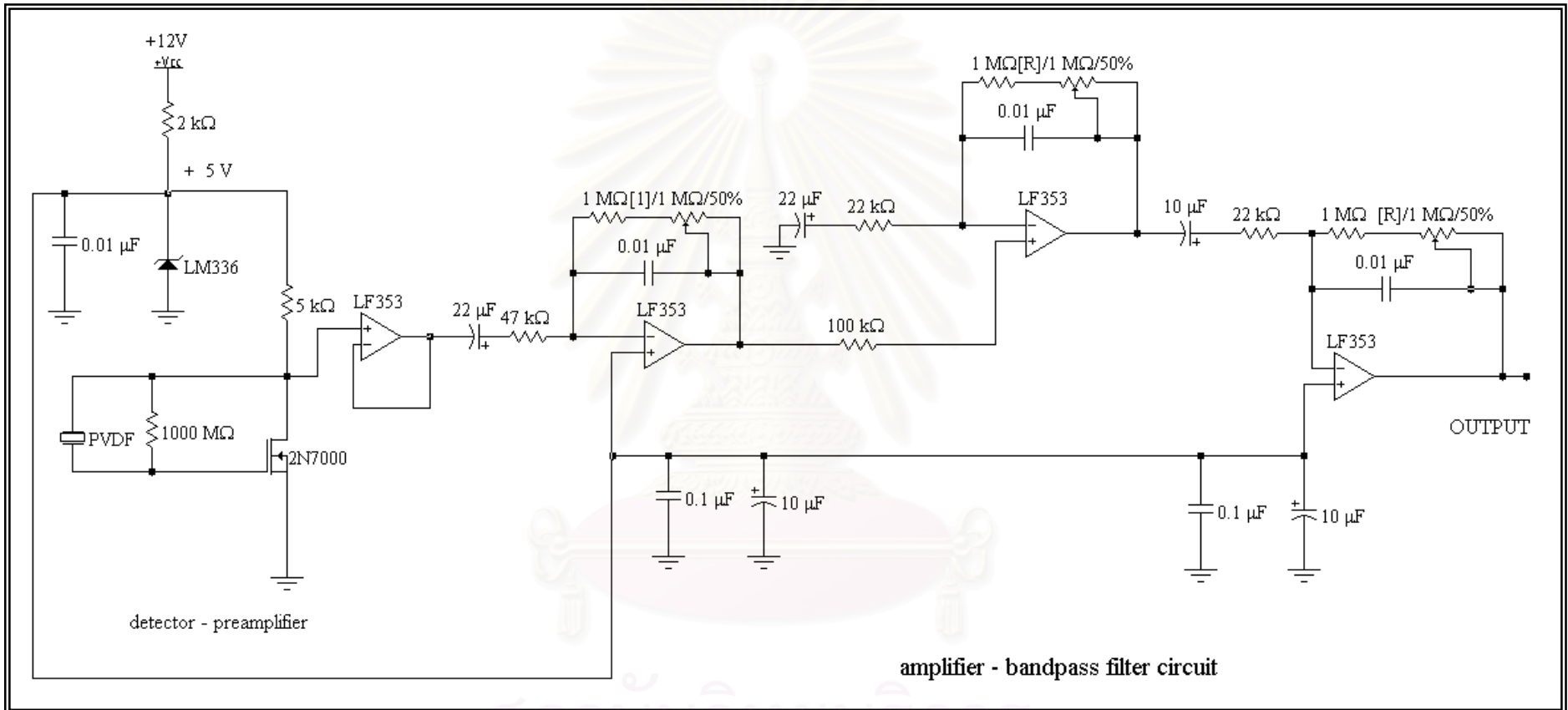


ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

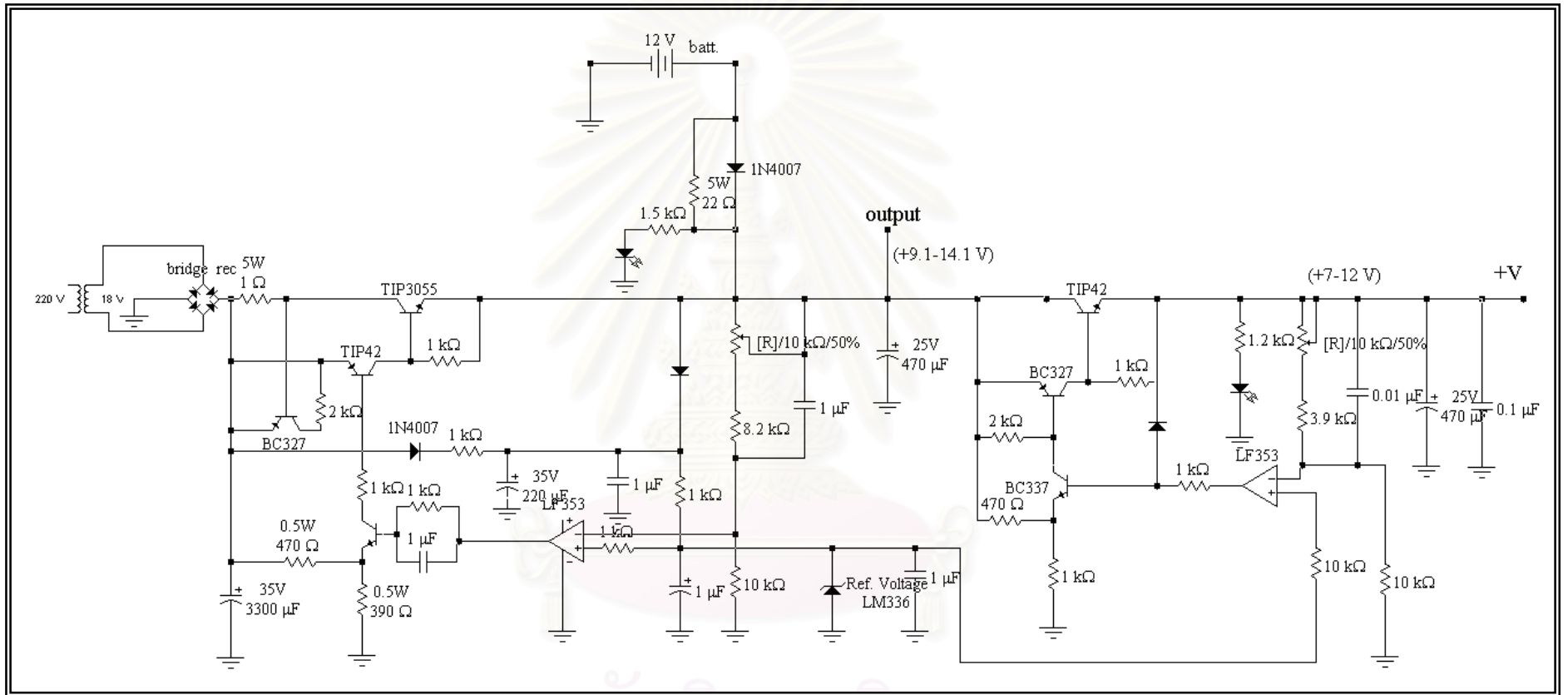


วงจรเปรียบเทียบสัญญาณและระบบเตือนภัย



PVDF- วงจรขยายเบื้องต้น – วงจรขยายและกรองความถี่

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



วงจรแหล่งจ่ายไฟสัญญาณรบกวนต่ำ+12 V (สำหรับเครื่องตรวจผู้บุกรุก)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2N7000

Preferred Device

Small Signal MOSFET 200 mAmps, 60 Volts N-Channel TO-92



ON Semiconductor

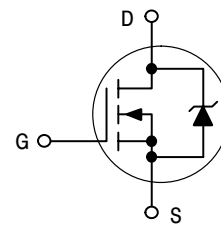
<http://onsemi.com>

200 mAmps
60 Volts
RDS(on) = 5 Ω

MAXIMUM RATINGS

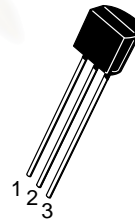
Rating	Symbol	Value	Unit
Drain-Source Voltage	V _{DSS}	60	Vdc
Drain-Gate Voltage (R _{GS} = 1.0 MΩ)	V _{DGR}	60	Vdc
Gate-Source Voltage – Continuous – Non-repetitive (t _p ≤ 50 μs)	V _{GS} V _{GSM}	±20 ±40	Vdc Vpk
Drain Current – Continuous – Pulsed	I _D I _{DM}	200 500	mA _{dc}
Total Power Dissipation @ T _C = 25°C Derate above 25°C	P _D	350 2.8	mW mW/°C
Operating and Storage Temperature Range	T _J , T _{stg}	–55 to +150	°C

N-Channel



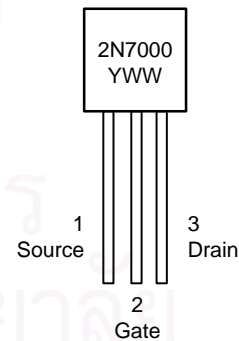
THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction to Ambient	R _{θJA}	357	°C/W
Maximum Lead Temperature for Soldering Purposes, 1/16" from case for 10 seconds	T _L	300	°C



TO-92
CASE 29
Style 22

MARKING DIAGRAM & PIN ASSIGNMENT



Y = Year
WW = Work Week

ORDERING INFORMATION

See detailed ordering and shipping information in the package dimensions section on page 3 of this data sheet.

Preferred devices are recommended choices for future use and best overall value.

2N7000

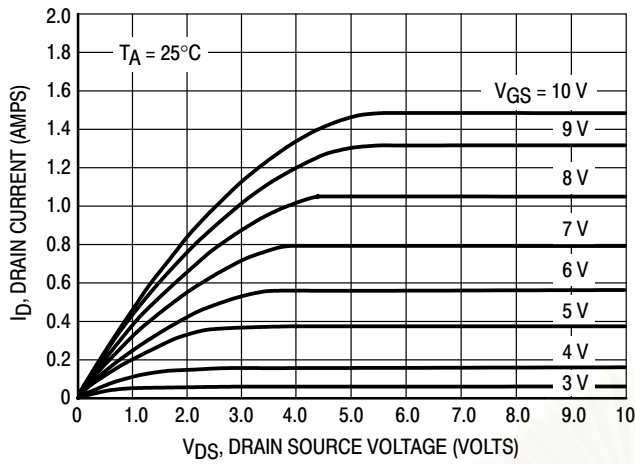


Figure 1. Ohmic Region

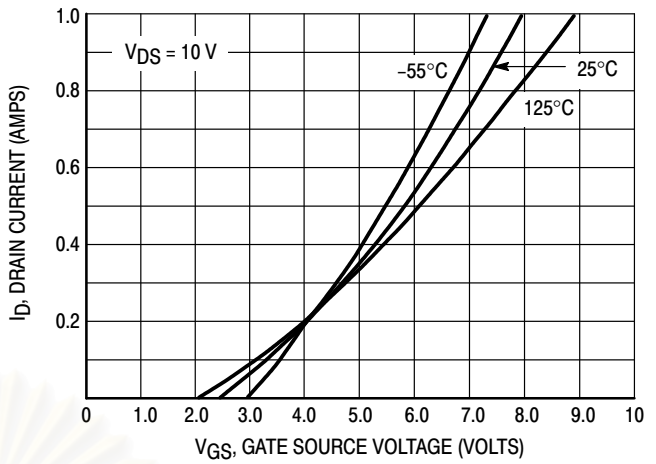


Figure 2. Transfer Characteristics

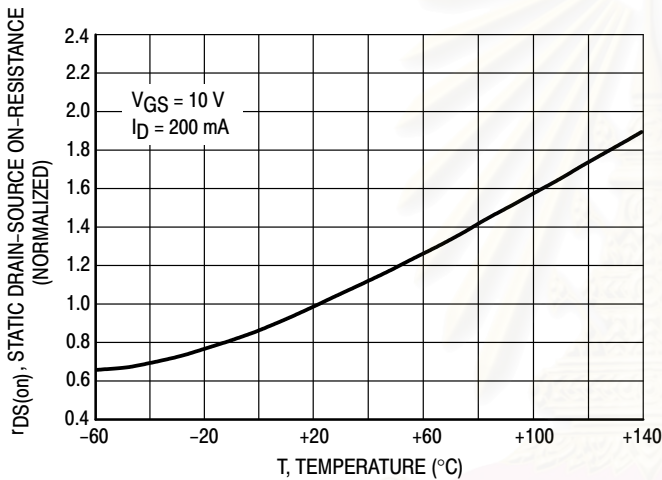


Figure 3. Temperature versus Static Drain-Source On-Resistance

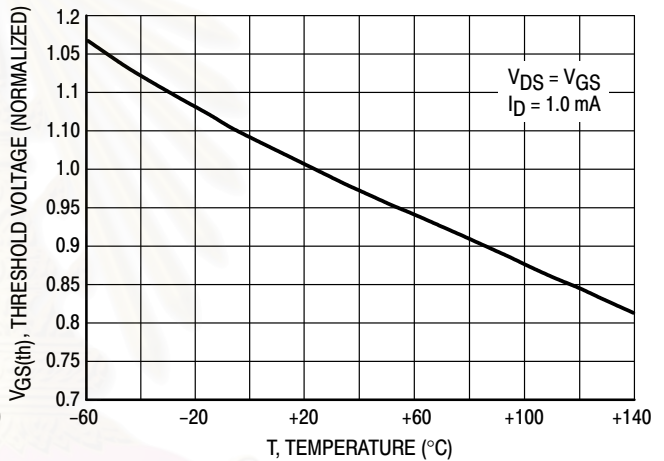


Figure 4. Temperature versus Gate Threshold Voltage

ORDERING INFORMATION

Device	Package	Shipping
2N7000	TO-92	1000 Unit/Box
2N7000RLRA	TO-92	2000 Tape & Reel
2N7000RLRM	TO-92	2000 Ammo Pack
2N7000RLRP	TO-92	2000 Ammo Pack
2N7000ZL1	TO-92	2000 Ammo Pack

LF353 Wide Bandwidth Dual JFET Input Operational Amplifier

General Description

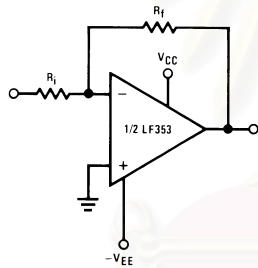
These devices are low cost, high speed, dual JFET input operational amplifiers with an internally trimmed input offset voltage (BI-FET II™ technology). They require low supply current yet maintain a large gain bandwidth product and fast slew rate. In addition, well matched high voltage JFET input devices provide very low input bias and offset currents. The LF353 is pin compatible with the standard LM1558 allowing designers to immediately upgrade the overall performance of existing LM1558 and LM358 designs.

These amplifiers may be used in applications such as high speed integrators, fast D/A converters, sample and hold circuits and many other circuits requiring low input offset voltage, low input bias current, high input impedance, high slew rate and wide bandwidth. The devices also exhibit low noise and offset voltage drift.

Features

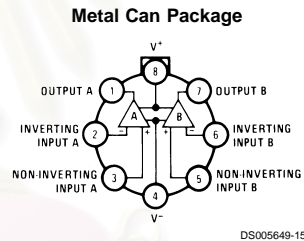
- Internally trimmed offset voltage: 10 mV
- Low input bias current: 50pA
- Low input noise voltage: $25 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
- Low input noise current: $0.01 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$
- Wide gain bandwidth: 4 MHz
- High slew rate: 13 V/μs
- Low supply current: 3.6 mA
- High input impedance: $10^{12}\Omega$
- Low total harmonic distortion $A_V=10$: $<0.02\%$
RL=10k, $V_O=20\text{Vp-p}$, BW=20 Hz-20 kHz
- Low 1/f noise corner: 50 Hz
- Fast settling time to 0.01%: 2 μs

Typical Connection



DS005649-14

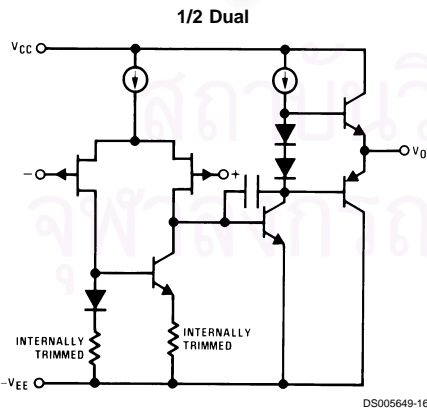
Connection Diagrams



DS005649-15

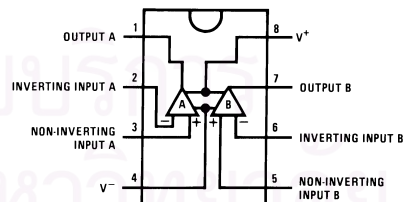
Top View
Order Number LF353H
See NS Package Number H08A

Simplified Schematic



DS005649-16

Dual-In-Line Package



DS005649-17

Top View
Order Number LF353M or LF353N
See NS Package Number M08A or N08E

BI-FET II™ is a trademark of National Semiconductor Corporation.

MC14013B

Dual Type D Flip-Flop

The MC14013B dual type D flip-flop is constructed with MOS P-channel and N-channel enhancement mode devices in a single monolithic structure. Each flip-flop has independent Data, (D), Direct Set, (S), Direct Reset, (R), and Clock (C) inputs and complementary outputs (Q and \bar{Q}). These devices may be used as shift register elements or as type T flip-flops for counter and toggle applications.

- Static Operation
- Diode Protection on All Inputs
- Supply Voltage Range – 3.0 Vdc to 18 Vdc
- Logic Edge-Clocked Flip-Flop Design
Logic state is retained indefinitely with clock level either high or low; information is transferred to the output only on the positive-going edge of the clock pulse
- Capable of Driving Two Low-power TTL Loads or One Low-power Schottky TTL Load Over the Rated Temperature Range
- Pin-for-Pin Replacement for CD4013B

MAXIMUM RATINGS (Voltages Referenced to V_{SS}) (Note 2.)

Symbol	Parameter	Value	Unit
V_{DD}	DC Supply Voltage Range	-0.5 to +18.0	V
V_{in}, V_{out}	Input or Output Voltage Range (DC or Transient)	-0.5 to $V_{DD} + 0.5$	V
I_{in}, I_{out}	Input or Output Current (DC or Transient) per Pin	± 10	mA
P_D	Power Dissipation, per Package (Note 3.)	500	mW
T_A	Ambient Temperature Range	-55 to +125	$^{\circ}\text{C}$
T_{stg}	Storage Temperature Range	-65 to +150	$^{\circ}\text{C}$
T_L	Lead Temperature (8-Second Soldering)	260	$^{\circ}\text{C}$

2. Maximum Ratings are those values beyond which damage to the device may occur.

3. Temperature Derating:
Plastic "P and D/DW" Packages: - 7.0 mW/ $^{\circ}\text{C}$ From 65 $^{\circ}\text{C}$ To 125 $^{\circ}\text{C}$

This device contains protection circuitry to guard against damage due to high static voltages or electric fields. However, precautions must be taken to avoid applications of any voltage higher than maximum rated voltages to this high-impedance circuit. For proper operation, V_{in} and V_{out} should be constrained to the range $V_{SS} \leq (V_{in} \text{ or } V_{out}) \leq V_{DD}$.

Unused inputs must always be tied to an appropriate logic voltage level (e.g., either V_{SS} or V_{DD}). Unused outputs must be left open.



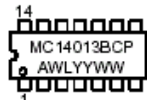
ON Semiconductor

<http://onsemi.com>

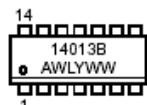


PDIP-14
P SUFFIX
CASE 646

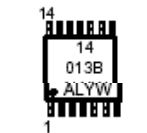
MARKING DIAGRAMS



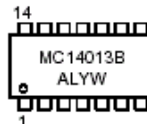
SOIC-14
D SUFFIX
CASE 751A



TSSOP-14
DT SUFFIX
CASE 948G



SOEIAJ-14
F SUFFIX
CASE 965



A = Assembly Location
WL, L = Wafer Lot
YY, Y = Year
WW, W = Work Week

ORDERING INFORMATION

Device	Package	Shipping
MC14013BCP	PDIP-14	2000/Box
MC14013BD	SOIC-14	55/Rail
MC14013BDR2	SOIC-14	2500/Tape & Reel
MC14013BDT	TSSOP-14	96/Rail
MC14013BDTR2	TSSOP-14	2500/Tape & Reel
MC14013BF	SOEIAJ-14	See Note 1.
MC14013BFEL	SOEIAJ-14	See Note 1.

1. For ordering information on the EIAJ version of the SOIC packages, please contact your local ON Semiconductor representative.

CD4069UBM/CD4069UBC Inverter Circuits

General Description

The CD4069UB consists of six inverter circuits and is manufactured using complementary MOS (CMOS) to achieve wide power supply operating range, low power consumption, high noise immunity, and symmetric controlled rise and fall times.

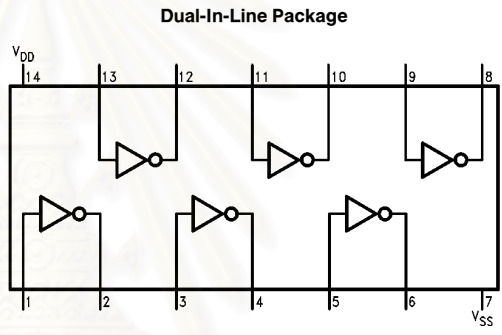
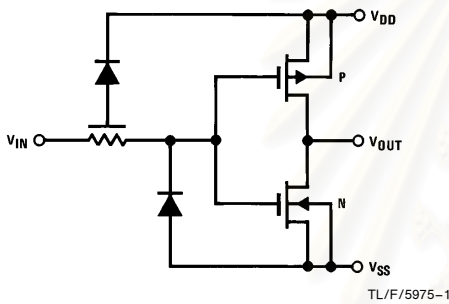
This device is intended for all general purpose inverter applications where the special characteristics of the MM74C901, MM74C903, MM74C907, and CD4049A Hex Inverter/Buffers are not required. In those applications requiring larger noise immunity the MM74C14 or MM74C914 Hex Schmitt Trigger is suggested.

All inputs are protected from damage due to static discharge by diode clamps to V_{DD} and V_{SS} .

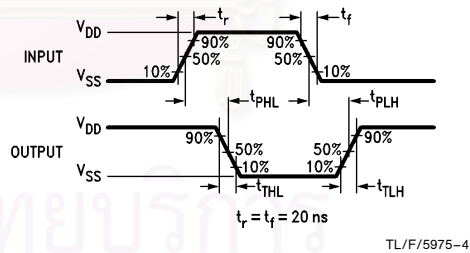
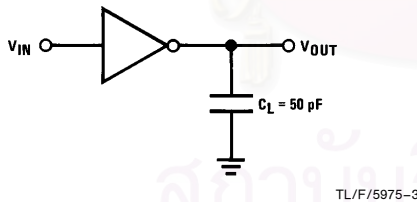
Features

- Wide supply voltage range 3.0V to 15V
- High noise immunity 0.45 V_{DD} typ.
- Low power TTL compatibility Fan out of 2 driving 74L or 1 driving 74LS
- Equivalent to MM54C04/MM74C04

Schematic and Connection Diagram



AC Test Circuits and Switching Time Waveforms



LM136-5.0/LM236-5.0/LM336-5.0 5.0V Reference Diode

General Description

The LM136-5.0/LM236-5.0/LM336-5.0 integrated circuits are precision 5.0V shunt regulator diodes. These monolithic IC voltage references operate as a low temperature coefficient 5.0V zener with 0.6Ω dynamic impedance. A third terminal on the LM136-5.0 allows the reference voltage and temperature coefficient to be trimmed easily.

The LM136-5.0 series is useful as a precision 5.0V low voltage reference for digital voltmeters, power supplies or op amp circuitry. The 5.0V makes it convenient to obtain a stable reference from low voltage supplies. Further, since the LM136-5.0 operates as a shunt regulator, it can be used as either a positive or negative voltage reference.

The LM136-5.0 is rated for operation over -55°C to $+125^{\circ}\text{C}$ while the LM236-5.0 is rated over a -25°C to $+85^{\circ}\text{C}$ temperature range. The LM336-5.0 is rated for operation over a

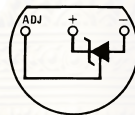
0°C to $+70^{\circ}\text{C}$ temperature range. See the connection diagrams for available packages. For applications requiring 2.5V see LM136-2.5.

Features

- Adjustable 4V to 6V
- Low temperature coefficient
- Wide operating current of 600 μA to 10 mA
- 0.6Ω dynamic impedance
- $\pm 1\%$ initial tolerance available
- Guaranteed temperature stability
- Easily trimmed for minimum temperature drift
- Fast turn-on
- Three lead transistor package

Connection Diagrams

TO-92
Plastic Package

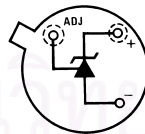


DS005716-4

Bottom View

Order Number LM236AZ-5.0, LM336Z-5.0 or LM336BZ-5.0
See NS Package Number Z03A

TO-46
Metal Can Package



DS005716-5

Bottom View

Order Number LM136H-5.0,
LM136H-5.0/883, LM236H-5.0,
LM136AH-5.0, LM136AH-5.0/883,
or LM236AH-5.0
See NS Package Number H03H

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว อ้อยใจ อ่องห่วย เกิดวันที่ 2 กุมภาพันธ์ 2521 ที่อำเภอบางบัวทอง จังหวัดนนทบุรี เป็นนักศึกษาในทุนโครงการพัฒนาและส่งเสริมผู้มีความสามารถพิเศษทางวิทยาศาสตร์ (พสวท.) ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2540 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ (เกียรตินิยมอันดับ 2) จากมหาวิทยาลัย ศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ ในปีการศึกษา 2542 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2543



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย