

การพัฒนาอุปกรณ์ตัวรับรู้ไฟโรอิเล็กทรอนิกส์
โดยใช้พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์

นายพูนศักดิ์ สันติวิทยานนท์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2541

ISBN 974-331-257-9

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**DEVELOPMENT OF PYROELECTRIC SENSOR
DEVICES USING POLY (VINYLIDENE FLUORIDE)**

Mr.Poonsak Santiwitayanon

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science in Physics

Department of Physics

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 1998

ISBN 974-331-257-9


หัวข้อวิทยานิพนธ์ การพัฒนาอุปกรณ์ตัวรับรู้ไฟโรอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้พอลิไวโนลิดีนฟลูออไรด์
โดย นายพูนศักดิ์ สันติวิทยานนท์
ภาควิชา ฟิสิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.อนันตสิน เตชะกำพุช
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิริณันต์ รัตนธรรมพันธ์

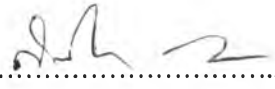
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

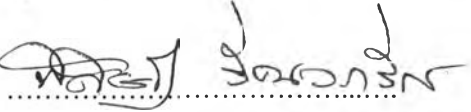

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ศุภวัฒน์ ชุตินวงศ์)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จгорยศ อยุ่ดี)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.อนันตสิน เตชะกำพุช)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิริณันต์ รัตนธรรมพันธ์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิศิษฐ์ รัตนวารักษ์)


..... กรรมการ
(อาจารย์สุวิทย์ พุทธมนต์)

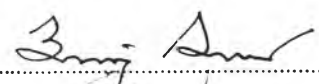
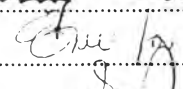

พจนศกดิ์ สันติวิทยานนท์ : การพัฒนาอุปกรณ์ตัวรับรู้ไฟโรอิเล็กทริกโดยใช้พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (DEVELOPMENT OF PYROELECTRIC SENSOR DEVICES USING POLY (VINYLIDENE FLUORIDE)) อ. ที่ปรึกษา : รศ. ดร อนันตสิน เตชะกำพูน, อ. ที่ปรึกษาร่วม : ผศ.กฤษณ์ดี รัตนธรรมพันธ์, 111 หน้า. ISBN 974-331-257-9.

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะเตรียมฟิล์มไฟโรอิเล็กทริกพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) จากแผ่น PVDF ธรรมดา โดยพัฒนาให้เป็นฟิล์มที่มีค่าสัมประสิทธิ์ไฟโรอิเล็กทริก (p_3) สูง และในการเตรียมนี้มีอัตราการสูญเสียของฟิล์มต่ำ จากนั้นนำไปใช้เป็นตัวรับรู้รังสีอินฟราเรด

ในการวิจัยนี้ ได้เตรียมฟิล์ม PVDF โดยวิธีอัดเบ้า ด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ที่อุณหภูมิ 250 °C ความดัน 500 N/cm² พบว่าถ้าหลอม PVDF มวล 3 g เป็นเวลา 5 นาที แล้วอัดอีก 5 นาที จะได้ฟิล์ม PVDF หนา 140-200 μ m การเตรียมฟิล์มไฟโรอิเล็กทริก พบว่าถ้ายัดฟิล์ม 3.5-4 เท่า ในการจัดขั้ว ใช้สนามไฟฟ้า $E_p = 40-50$ MV/m อุณหภูมิ $T_p = 90$ °C จะได้ฟิล์มมีค่า p_3 อยู่ในช่วง $1.36 \times 10^{-5} - 1.44 \times 10^{-5}$ C/m²K สภาวะการเตรียมนี้ทำให้ฟิล์มเกิดการสูญเสียในอัตราที่น้อยมาก พบว่า p_3 จะสูงขึ้น ถ้า E_p และ T_p ที่ใช้สูงขึ้น

อิเล็กโทรดของตัวรับรู้รังสีอินฟราเรดเตรียมโดยทาภาวเงินเจือจาง (silver paste) ลงบนฟิล์มทั้งสองข้าง และทำให้อิเล็กโทรดด้านซึ่งรับรังสีเป็นสีดำ พบว่าเมื่อมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความเข้มประมาณ 3.5 W/m² ตกกระทบฟิล์มซึ่งมีความต้านทาน 200 M Ω ค่อยนานฟิล์ม จะให้ $V_{max} \approx 35$ mV ซึ่งเพียงพอที่จะนำไปกระตุ้นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ให้ทำงานตามต้องการ ได้ใช้ฟิล์มนี้ในการพัฒนาเครื่องตรวจจับผู้บุกรุกเครื่องเตือนไฟไหม้ ซึ่งใช้งานได้ดี

ภาควิชา ฟิสิกส์
สาขาวิชา ฟิสิกส์
ปีการศึกษา 2541

ลายมือชื่อนิสิต 
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม 

C825528: MAJOR PHYSICS

KEY WORD: PVDF / FERROELECTRIC POLYMER / INFRARED SENSOR / PYROELECTRIC
SENSOR


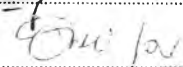

POONSAK SANTIWITAYANON : DEVELOPMENT OF PYROELECTRIC SENSOR
DEVICES USING POLY (VINYLIDENE FLUORIDE). THESIS ADVISOR : ASSO.PROF.
ANUNTASIN TECHAGUMPUCH, Ph.D. THESIS CO-ADVISOR : ASSIST. PROF.
KIRANANT RATANATHAMMAPAN. 111 pp. ISBN 974-331-257-9.

The aim of this research was to prepare pyroelectric PVDF films of high pyroelectric coefficient p_3 from PVDF sheet. The process should have minimum lost of initial PVDF films used. This prepared film can be used as an infrared sensor.

In this research, PVDF films were prepared using compression moulding method. A hot hydraulic press was used at 250°C with applied pressure of 500 N/cm^2 . In order to obtain PVDF film of $140\text{-}200\ \mu\text{m}$ thickness, 3 g of PVDF sheet was melted for 5 minutes and pressed for further 5 minutes. In preparing pyroelectric films, if the films were stretched up to 3.5-4 times and poling electric fields E_p of $40\text{-}50\text{ MV/m}$ at poling temperature T_p of 90°C were used then films with p_3 in the range of $1.36\times 10^{-5}\text{-}1.44\times 10^{-5}\text{ C/m}^2\text{K}$ were obtained. This method of preparation reduces the lost of initial PVDF film to minimum. It was found that high E_p and T_p produced PVDF film of a higher p_3 .

To prepare electrodes of pyroelectric film, dilute silver paste was painted on both sides of the film. One side of this electrode was painted black in order to enhance the radiation absorption. It was found that when an electromagnetic radiation with intensity of $\approx 3.5\text{ W/m}^2$ incidented on the film coupling with $200\text{ M}\Omega$ shunting resister, a maximum voltage signal of $\approx 35\text{ mV}$ was produced. This signal is large enough to be used as electronic trigger. As examples, fire alarm and intruder detector were developed from this film.

ภาควิชา..... ฟิสิกส์
สาขาวิชา..... ฟิสิกส์
ปีการศึกษา..... 2541

ลายมือชื่อนิสิต..... 
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... 
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... 



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้เนื่องจากได้รับคำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ทั้งทางด้านทฤษฎี การวิจัยและการตรวจทานวิทยานิพนธ์จาก รองศาสตราจารย์ ดร.อนันตสิน เตชะกำพูน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤษณ์ดี รัตนธรรมพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัส แซ่ด่าน และ อาจารย์ ดร.ธีระพันธุ์ สันติเทวกุล ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี ท่านทั้งสองให้ความกรุณาช่วยเหลือด้านการเตรียมฟิล์ม PVDF ในภาวะที่ผู้วิจัยมีอุปสรรคก็จะขอคำแนะนำจากท่านทั้งสอง เป็นผลให้ผู้วิจัยมีกำลังใจในการต่อสู้กับอุปสรรคต่าง ๆ ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณท่านทั้งสองเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ อาจารย์สุวิทย์ พุทธรนต์ ที่ช่วยเหลือในการวัดค่าคงที่ไดโพลีทริกของฟิล์ม PVDF อาจารย์มิ่งกล แจ่มแจ้ง ที่ช่วยเหลือทางด้านการทดลองและด้านวงจรอิเล็กทรอนิกส์เป็นอย่างมาก นอกจากนี้อาจารย์ทั้งสองท่านยังช่วยเหลือและแนะนำการใช้คอมพิวเตอร์สำหรับพิมพ์วิทยานิพนธ์

นอกจากนี้ ขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการวิจัยฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ (SPRL) ที่ให้ความกรุณาใช้อิเล็กทรอนิกส์สำหรับวัดสัมประสิทธิ์โพโรอิเล็กทริก และวัดความต่างศักย์ของฟิล์ม รวมทั้งภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี ที่ให้ความกรุณาใช้เครื่องอัดไฮดรอลิก สำหรับการเตรียมฟิล์ม PVDF โดยวิธีอัดเบ้า ตลอดจนผู้ที่ให้ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะต่าง ๆ ที่ไม่ได้กล่าวนามมา ณ. ที่นี้

ขอขอบคุณ ครอบครัวศรีเบญจพลาตกุล สถานที่ที่ผู้วิจัยพักอาศัยอยู่ระหว่างศึกษาคุณประเสริฐ ศรีเบญจพลาตกุล คุณสุวดี รินธนาเลิศ ที่คอยให้กำลังใจ ท้ายสุดขอขอบพระคุณบิดาและมารดาที่สนับสนุนและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยจนประสบความสำเร็จในการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ถ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 ทฤษฎีไฟโรอิเล็กทริก.....	5
2.1 สมการสถานะไฟโรอิเล็กทริก.....	6
2.2 การทำงานของฟิล์มไฟโรอิเล็กทริก.....	11
2.3 การวัดสัมประสิทธิ์ไฟโรอิเล็กทริก.....	14
2.4 สมบัติไฟโรอิเล็กทริกในพอลิเมอร์.....	17
บทที่ 3 ฟิล์มพอลิเมอร์พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์.....	19
3.1 โครงสร้างผลึกของ PVDF.....	19
3.2 การเตรียมฟิล์มไฟโรอิเล็กทริก PVDF.....	25
3.2.1 การยัดฟิล์ม.....	26
3.2.2 การจัดขั้ว.....	28
3.2.3 การเตรียมอิเล็กโทรดของฟิล์ม.....	29
3.3 กระแส TSC.....	30
บทที่ 4 ฟิล์มไฟโรอิเล็กทริกพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์.....	33
4.1 วิธีการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ PVDF.....	33
4.2 การทดสอบฟิล์ม PVDF ที่เตรียมขึ้นโดยใช้การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	36

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 การวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของฟิล์ม PVDF.....	39
4.4 การวัดสัมประสิทธิ์โพโรอิเล็กทริกโดยวิธีประยุกต์.....	43
4.5 สัมประสิทธิ์โพโรอิเล็กทริกของฟิล์มโพโรอิเล็กทริก PVDF.....	50
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง p , E_p และ T_p	59
บทที่ 5 ความต่างศักย์จากฟิล์มโพโรอิเล็กทริก PVDF.....	64
5.1 ความต่างศักย์จากฟิล์มโพโรอิเล็กทริก PVDF (เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทันทีทันใด).....	64
5.2 ความต่างศักย์จากฟิล์มโพโรอิเล็กทริก PVDF (เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เรื่อย ๆ).....	67
บทที่ 6 การพัฒนาอุปกรณ์ตัวรับรู้โพโรอิเล็กทริกจากฟิล์ม PVDF.....	83
6.1 เครื่องตรวจจับฝุ่นกรุก.....	83
6.2 เครื่องเตือนไฟไหม้.....	90
6.3 ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ.....	92
รายการอ้างอิง.....	94
ภาคผนวก	
ก. เทนเซอร์.....	97
ข. สัมประสิทธิ์โพโรอิเล็กทริกปฐมภูมิและทุติยภูมิ.....	98
ค. ข้อมูลของออปแอมป์ AD549.....	99
ประวัติผู้เขียน.....	111

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติพิเศษโซ-ไฟ โรอิเล็กทรอนิกส์ของสารต่าง ๆ.....	2
ตารางที่ 3.1 แสดงข้อมูล โครงสร้างผลึกของ PVDF เฟสต่าง ๆ	24
ตารางที่ 4.1 แสดงความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์ระหว่างอุณหภูมิ 21-40 องศาเซลเซียส.....	46
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดลองของฟิล์ม โดยจัดขั้วที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส สนามไฟฟ้า 28.57 เมกะ โวลต์ต่อเมตร พื้นที่ของอิเล็กโทรด 2.34 ตารางเซนติเมตร (ฟิล์ม 1).....	49
ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดลองของฟิล์ม โดยจัดขั้วที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส สนามไฟฟ้า 33.33 เมกะ โวลต์ต่อเมตร พื้นที่ของอิเล็กโทรด 2.40 ตารางเซนติเมตร (ฟิล์ม 2)	51
ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดลองของฟิล์ม โดยจัดขั้วที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส สนามไฟฟ้า 42.86 เมกะ โวลต์ต่อเมตร พื้นที่ของอิเล็กโทรด 2.23 ตารางเซนติเมตร (ฟิล์ม 3)	52
ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดลองของฟิล์ม โดยจัดขั้วที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส สนามไฟฟ้า 28.57 เมกะ โวลต์ต่อเมตร พื้นที่ของอิเล็กโทรด 2.01 ตารางเซนติเมตร (ฟิล์ม 4)	53
ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดลองของฟิล์ม โดยจัดขั้วที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส สนามไฟฟ้า 38.70 เมกะ โวลต์ต่อเมตร พื้นที่ของอิเล็กโทรด 1.92 ตารางเซนติเมตร (ฟิล์ม 5)	54
ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดลองของฟิล์ม โดยจัดขั้วที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส สนามไฟฟ้า 42.86 เมกะ โวลต์ต่อเมตร พื้นที่ของอิเล็กโทรด 1.94 ตารางเซนติเมตร (ฟิล์ม 6)	55
ตารางที่ 4.8 แสดงผลการทดลองของฟิล์ม โดยจัดขั้วที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส สนามไฟฟ้า 25 เมกะ โวลต์ต่อเมตร พื้นที่ของอิเล็กโทรด 2.0 ตารางเซนติเมตร (ฟิล์ม 7)	56
ตารางที่ 4.9 แสดงผลการทดลองของฟิล์ม โดยจัดขั้วที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส สนามไฟฟ้า 30 เมกะ โวลต์ต่อเมตร พื้นที่ของอิเล็กโทรด 1.98 ตารางเซนติเมตร (ฟิล์ม 8)	57

สารบัญญัตราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.10 แสดงผลการทดลองของฟิล์ม โดยจัดขั้วที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส สนามไฟฟ้า 35 เมกะ โวลต์ต่อเมตร พื้นที่ของอิเล็กโทรด 1.97 ตารางเซนติเมตร (ฟิล์ม 9)	58
ตารางที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง T_p และ $m(T_p)$ จากงานวิจัยที่ผ่านมา.....	59
ตารางที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง p และ E_p เมื่อ $T_p = 80$ องศาเซลเซียส.....	60
ตารางที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง p และ E_p เมื่อ $T_p = 90$ องศาเซลเซียส.....	61
ตารางที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง p และ E_p เมื่อ $T_p = 100$ องศาเซลเซียส.....	62
ตารางที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง T_p และ $m(T_p)$ ในงานวิจัยนี้.....	63
ตารางที่ 5.1 แสดงความต่างศักย์สูงสุด (V_{max}) หน่วยเป็นมิลลิโวลต์ ของฟิล์ม พื้นที่อิเล็กโทรด 3.0 ตารางเซนติเมตร.....	77
ตารางที่ 5.2 แสดงความต่างศักย์สูงสุด (V_{max}) หน่วยเป็นมิลลิโวลต์ ของฟิล์ม พื้นที่อิเล็กโทรด 9.0 ตารางเซนติเมตร.....	77
ตารางที่ 5.3 แสดงความต่างศักย์สูงสุด (V_{max}) หน่วยเป็นมิลลิโวลต์ ของฟิล์มแผ่นใหญ่พื้นที่อิเล็กโทรด 9.0 ตารางเซนติเมตร..... (อิเล็กโทรดด้านหนึ่งทาสีดำ).....	82

สารบัญญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 แสดงวงแหงความล้า (hysteresis loop) ของสารเพรีโรอิเล็กทริก.....	5
รูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ไฟโรอิเล็กทริกปฐมภูมิและทุติยภูมิ.....	10
รูปที่ 2.3 แสดงทิศของเวกเตอร์ทางกลและไฟฟ้าของฟิล์มพอลิเมอร์เมื่อถูกยืดและจัดขั้ว.....	11
รูปที่ 2.4 แสดงฟิล์มไฟโรอิเล็กทริกในสภาพปกติทั่วไป.....	11
รูปที่ 2.5 แสดงฟิล์มไฟโรอิเล็กทริกที่อุณหภูมิ T เมื่ออิเล็กโทรดทั้งสองถูกลัดวงจร.....	12
รูปที่ 2.6 แสดงฟิล์มไฟโรอิเล็กทริกเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนเป็น $T + \Delta T$ และมีความต่างศักย์ V ค่อกับอิเล็กโทรดทั้งสองทำให้ฟิล์มมีสนามไฟฟ้า E	13
รูปที่ 2.7 (ก) แสดงวงจรวัดไฟโรอิเล็กทริก (ข) แสดงวงจรวัดไฟฟ้าเสมือน.....	15
รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างโมเลกุล 4 แบบของ PVDF (ก) เฟสเบตา (ข) เฟสแอลฟา และเดลตา และ (ค) เฟสแกมมา ตามลำดับ โดยวงกลมทึบ วงกลมเล็ก และ วงกลมใหญ่ แทนอะตอมของคาร์บอน ไฮโดรเจน ฟลูออรีน ตามลำดับ.....	20
รูปที่ 3.2 แสดงโครงสร้างผลึกของ PVDF เฟสแอลฟา.....	21
รูปที่ 3.3 แสดงโครงสร้างผลึกของ PVDF เฟสเบตา.....	22
รูปที่ 3.4 แสดงการจัดเรียงตัวโมเลกุลของ PVDF เฟสแกมมา (ลูกศรหมายถึง ทิศของไดโพลในโมเลกุล.....	23
รูปที่ 3.5 แสดงการจัดเรียงตัวโมเลกุลของ PVDF เฟสเดลตา (ลูกศรหมายถึง ทิศของไดโพลในโมเลกุล.....	23
รูปที่ 3.6 แผนภาพแสดงการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเฟสต่าง ๆ ของ PVDF (DMF , DMA , DMSO และ MCB คือไดเมทิลฟอร์มมาไมด์ (dimethylformamide), ไดเมทิลอะซิตาไมด์(dimethylacetamide) , ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (dimethyl sulfoxide) , และ โมนอคลอโรเบนซีน (monochlorobenzene) ตามลำดับ โดยใช้ ไซโคลเฮกซะนอน (cyclohexanone) เป็นตัวทำละลายในการหล่อฟิล์ม.....	25
รูปที่ 3.7 แสดงฟิล์ม PVDF ที่ยัด 3.5-4 เท่า พร้อมเครื่องยัดฟิล์ม.....	27
รูปที่ 3.8 แสดงการจัดขั้วของฟิล์ม PVDF.....	28
รูปที่ 4.1 แสดงเครื่องอัดไฮดรอลิกที่ใช้เตรียมฟิล์มโดยวิธีอัดเป่า.....	35
รูปที่ 4.2 แสดงฟิล์ม PVDF ที่ได้โดยวิธีอัดเป่าจากเครื่องอัดไฮดรอลิก.....	35

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.3 แสดงการอธิบายการเตรียมฟิล์มโดยวิธีอัดเบ้า.....	35
รูปที่ 4.4 แสดงการกวาดเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ (X-ray diffractometer scan) ของฟิล์ม PVDF ที่ไม่ได้ยัด โดย 2θ คือมุมแบรกก์ และ (020) , (110) คือระนาบ (hkl).....	37
รูปที่ 4.5 แสดงการกวาดเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ของฟิล์ม PVDF ที่ยัดแล้ว โดย 2θ คือมุมแบรกก์ และ (110)(200) คือระนาบ (hkl).....	38
รูปที่ 4.6 แสดงค่าความจุไฟฟ้าของฟิล์มไดอิเล็กทริก PVDF ตัวอย่างที่ความถี่ 20-500 เฮิรตซ์.....	42
รูปที่ 4.7 แสดงค่าความจุไฟฟ้าของฟิล์มไพโรอิเล็กทริก PVDF ตัวอย่าง ที่ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 100 กิโลเฮิรตซ์.....	42
รูปที่ 4.8 แสดงฟิล์มไพโรอิเล็กทริก PVDF เมื่อมีรังสีอินฟราเรดตกกระทบฟิล์ม ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลจากอิเล็กโทรดกลางไปอิเล็กโทรดบน.....	44
รูปที่ 4.9 แสดงการทดลองเพื่อวัดสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกโดยวิธีประยุกต์.....	46
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความต้านทานของ เทอร์มิสเตอร์ ระหว่างช่วงอุณหภูมิ 25-37 องศาเซลเซียส.....	47
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้าจากฟิล์ม (ΔQ) กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (ΔT) ของฟิล์ม 1.....	49
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้าจากฟิล์ม (ΔQ) กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (ΔT) ของฟิล์ม 2.....	51
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้าจากฟิล์ม (ΔQ) กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (ΔT) ของฟิล์ม 3.....	52
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้าจากฟิล์ม (ΔQ) กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (ΔT) ของฟิล์ม 4.....	53
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้าจากฟิล์ม (ΔQ) กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (ΔT) ของฟิล์ม 5.....	54
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้าจากฟิล์ม (ΔQ) กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (ΔT) ของฟิล์ม 6.....	55
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้าจากฟิล์ม (ΔQ) กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (ΔT) ของฟิล์ม 7.....	56

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้าจากฟิล์ม (ΔQ)
 กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (ΔT) ของฟิล์ม 8..... 57

รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้าจากฟิล์ม (ΔQ)
 กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (ΔT) ของฟิล์ม 9..... 58

รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง p และ E_p เมื่อ $T_p = 80$ องศาเซลเซียส..... 60

รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง p และ E_p เมื่อ $T_p = 90$ องศาเซลเซียส..... 61

รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง p และ E_p เมื่อ $T_p = 100$ องศาเซลเซียส..... 62

รูปที่ 5.1 (ก) และ (ข) แสดงการใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานภายใน R
 วัดความต่างศักย์เมื่อมีรังสีอินฟราเรดตกกระทบฟิล์มไพโรอิเล็กทริก PVDF..... 64

รูปที่ 5.2 แสดงการวัดความต่างศักย์จากฟิล์มไพโรอิเล็กทริก PVDF ที่มีความต้านทาน
 R ต่อขนาน เมื่อมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบ..... 67

รูปที่ 5.3 แสดงการทดลองวัดความต่างศักย์ระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองของฟิล์มไพโร-
 อิเล็กทริก PVDF เมื่อมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความเข้มต่าง ๆ ตกกระทบฟิล์ม..... 69

รูปที่ 5.4 (ก) และ (ข) แสดงความต่างศักย์จากฟิล์มไพโรอิเล็กทริก PVDF แผ่นเล็ก
 พื้นที่ 3.0 ตารางเซนติเมตร เมื่อไม่มีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากหลอดไฟ
 มาตรฐานตกกระทบฟิล์ม และมีความต้านทาน 200 เมกะ โอห์ม และ 1000 เมกะ โอห์ม
 ต่อขนานกับฟิล์ม ตามลำดับ..... 70

รูปที่ 5.5 (ก) และ (ข) แสดงความต่างศักย์จากฟิล์มไพโรอิเล็กทริก PVDF แผ่นใหญ่
 พื้นที่ 9.0 ตารางเซนติเมตร เมื่อไม่มีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากหลอดไฟ
 มาตรฐานตกกระทบฟิล์ม และมีความต้านทาน 200 เมกะ โอห์ม และ 1000 เมกะ โอห์ม
 ต่อขนานกับฟิล์ม ตามลำดับ..... 71

รูปที่ 5.6 (ก) และ (ข) แสดงการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ของฟิล์ม
 ไพโรอิเล็กทริก PVDF แผ่นเล็กพื้นที่อิเล็กโทรด 3.0 ตารางเซนติเมตร
 ไปด้วยเวลา เมื่อมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากหลอดไฟความเข้ม 8.0 และ
 3.5 วัตต์ต่อตารางเมตร ตกกระทบฟิล์ม โดยมีความต้านทาน 200
 เมกะ โอห์มต่อขนานกับฟิล์ม ตามลำดับ..... 73

สารบัญญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.7 (ก) และ (ข) แสดงการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ของฟิล์ม ไพโรอิเล็กทริก PVDF แผ่นเล็กพื้นที่อิเล็กโทรด 3.0 ตารางเซนติเมตร ไปกับเวลา เมื่อมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากหลอดไฟความเข้ม 8.0 และ 3.5 วัตต์ต่อตารางเมตร ตกกระทบฟิล์ม โดยมีความต้านทาน 1000 เมกะโอห์มต่อขนานกับฟิล์ม ตามลำดับ.....	74
รูปที่ 5.8 (ก) และ (ข) แสดงการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ของฟิล์ม ไพโรอิเล็กทริก PVDF แผ่นใหญ่พื้นที่อิเล็กโทรด 9.0 ตารางเซนติเมตร ไปกับเวลา เมื่อมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากหลอดไฟความเข้ม 8.0 และ 3.5 วัตต์ต่อตารางเมตร ตกกระทบฟิล์ม โดยมีความต้านทาน 200 เมกะโอห์มต่อขนานกับฟิล์ม ตามลำดับ.....	75
รูปที่ 5.9 (ก) และ (ข) แสดงการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ของฟิล์ม ไพโรอิเล็กทริก PVDF แผ่นใหญ่พื้นที่อิเล็กโทรด 9.0 ตารางเซนติเมตร ไปกับเวลา เมื่อมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากหลอดไฟความเข้ม 8.0 และ 3.5 วัตต์ต่อตารางเมตร ตกกระทบฟิล์ม โดยมีความต้านทาน 1000 เมกะโอห์มต่อขนานกับฟิล์ม ตามลำดับ.....	76
รูปที่ 5.10 (ก) และ (ข) แสดงความต่างศักย์ของฟิล์ม ไพโรอิเล็กทริก PVDF แผ่นใหญ่ พื้นที่อิเล็กโทรด 9.0 ตารางเซนติเมตร (อิเล็กโทรดด้านหนึ่งทาสีดำ) เมื่อไม่มีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากหลอดไฟตกกระทบฟิล์ม โดยมีความต้านทาน 200 และ 1000 เมกะโอห์มต่อขนานกับฟิล์ม ตามลำดับ.....	79
รูปที่ 5.11 (ก) และ (ข) แสดงการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ของฟิล์ม ไพโรอิเล็กทริก PVDF แผ่นใหญ่พื้นที่อิเล็กโทรด 9.0 ตารางเซนติเมตร (อิเล็กโทรดด้านหนึ่งทาสีดำ) ไปกับเวลา เมื่อมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจาก หลอดไฟความเข้ม 8.0 และ 3.5 วัตต์ต่อตารางเมตร ตกกระทบฟิล์ม โดยมีความต้านทาน 200 เมกะโอห์มต่อขนานกับฟิล์ม.....	80
รูปที่ 5.12 (ก) และ (ข) แสดงการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ของฟิล์ม ไพโรอิเล็กทริก PVDF แผ่นใหญ่พื้นที่อิเล็กโทรด 9.0 ตารางเซนติเมตร (อิเล็กโทรดด้านหนึ่งทาสีดำ) ไปกับเวลา เมื่อมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจาก หลอดไฟความเข้ม 8.0 และ 3.5 วัตต์ต่อตารางเมตร ตกกระทบฟิล์ม โดยมีความต้านทาน 1000 เมกะโอห์มต่อขนานกับฟิล์ม.....	81

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 6.1 แสดงฟิล์มไพโรอิเล็กทริก PVDF ต่อกับวงจรตามแรงดัน.....	84
รูปที่ 6.2 แสดงวงจรคิฟเฟอร์เรชันเตอร์ เพื่อตรวจจับอัตราการเปลี่ยนแปลง ความต่างศักย์จากฟิล์มไพโรอิเล็กทริก PVDF.....	85
รูปที่ 6.3 แสดงวงจรขยายคิฟเฟอร์เรชัน.....	87
รูปที่ 6.4 แสดงวงจรของหน่วยเตือนภัย.....	88
รูปที่ 6.5 แสดงวงจรสมบรูณ์ของเครื่องตรวจจับผู้บุกรุก.....	89
รูปที่ 6.6 แสดงวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส.....	90
รูปที่ 6.7 แสดงวงจรสมบรูณ์ของเครื่องเตือนไฟไหม้.....	91

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

สัญลักษณ์	ความหมาย
A	พื้นที่อิเล็กทรอนิกส์ของฟิล์ม
b	ความหนาของฟิล์ม
C	ความจุไฟฟ้า , ความร้อนจำเพาะต่อมวล
C_L	ความจุไฟฟ้าของโพล
C_F	ความจุไฟฟ้าของฟิล์ม
D	การขจัดทางไฟฟ้า
d	สัมประสิทธิ์ความเครียดเพียโซอิเล็กทริก
E	สนามไฟฟ้า
E_a	พลังงานกระตุ้น
E_c	สนามโคอิสีฟ
E_p	สนามไฟฟ้าที่ใช้ในการจัดขั้ว
e	สัมประสิทธิ์ความเค้นเพียโซอิเล็กทริก
G	พลังงานอิสระของกิบส์ต่อปริมาตร
i, I	กระแสไฟฟ้า , ความเข้มของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
IR	รังสีอินฟราเรด
J	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า
K	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก
k_B	ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์
L	ระยะจากหลอดไฟถึงฟิล์ม
P	โพลาริเซชัน
P_s	สปอนเดเนียสโพลาริเซชัน
P_r	รีมานนท์โพลาริเซชัน
P_0	โพลาริเซชันเริ่มต้น
PVDF	พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์
p, p_n^x	สัมประสิทธิ์โฟโรอิเล็กทริก
p_n^*	สัมประสิทธิ์โฟโรอิเล็กทริกปรวมภูมิ
Q, q	ประจุไฟฟ้า
R	ความต้านทานไฟฟ้า

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
R_L	ความต้านทานของโหลด
R_F	ความต้านทานของฟิล์ม PVDF
s	สัมประสิทธิ์ความหยุ่น
T	อุณหภูมิหน่วยเซลเซียส , อุณหภูมิสัมบูรณ์
T_C	อุณหภูมิวิกฤติ
T_p	อุณหภูมิที่ใช้ในการจัดจั่ว
t	เวลา
U	พลังงานภายใน
V	ความต่างศักย์
X	ความเค้น
x	ความเครียด

อักษรกรีก

ϵ_0	สภาพยอมของสุญญากาศ
ϵ	สภาพยอมของสาร
χ	สภาพซึมซับได้ไดอิเล็กทริก
σ	สภาพนำไฟฟ้า
ρ	ความหนาแน่น
μ	ไดโพลไฟฟ้า