การศึกษาและการประดิษฐ์ตัวเก็บประจุแบบฟิล์มบางโครงสร้างโพลีเมอร์/$BaTiO_3$

นาย องอาจ ตั้งเมตตาจิตตกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4 8 7 0 5 4 3 8 2 1

STUDY AND FABRICATION OF POLYMER/$BaTiO_3$ THIN FILM CAPACITORS

Mr. Ong-arj Tangmattajittakul

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2006

Copyright of Chulalongkorn University

402268

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาและการประดิษฐ์ตัวเก็บประจุแบบฟิล์มบางโครงสร้างโพลีเมอร์/$BaTiO_3$
โดย	นาย องอาจ ตั้งเมตตาจิตตกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.สมชัย รัตนธรรมพันธ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบ

(ศาสตราจารย์ ดร.ปิยะสาร ประเสริฐธรรม)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.สมชัย รัตนธรรมพันธ์)

..... กรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร)

องอาจ ตั้งเมตตาจิตตกุล : การศึกษาและการประดิษฐ์ตัวเก็บประจุแบบฟิล์มบางโครงสร้างโพลีเมอร์/$BaTiO_3$ (STUDY AND FABRICATION OF POLYMER/$BaTiO_3$ THIN FILM CAPACITORS) อาจารย์ที่ปรึกษา : รศ. ดร.สมชัย รัตนธรรมพันธ์, 69 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอผลการศึกษาการประดิษฐ์ตัวเก็บประจุแบบฟิล์มบางโครงสร้างโพลีเมอร์/$BaTiO_3$ เพื่อพัฒนาให้ได้ตัวเก็บประจุสำหรับการประยุกต์ในวงจรรวมและแผงวงจรทางไฟฟ้า ที่มีราคาถูกและมีประสิทธิภาพสูง โดยได้ทดลองประดิษฐ์ตัวเก็บประจุบนแผ่นฐานกระจกที่มีความหนาประมาณ 0.3 มิลลิเมตร ฟิล์มบางของโพลีเมอร์/$BaTiO_3$ ฝังตัวด้วยวิธีการหยดและเหวี่ยงออกด้วยความเร็วในการหมุน 2000 รอบต่อนาที โดยโครงสร้างของโพลีเมอร์ที่ใช้เพื่อเป็นเมตริกในการยึดอนุภาคของ $BaTiO_3$ ที่ใช้ในการทดลองในวิทยานิพนธ์ประกอบด้วยกัน 3 ชนิดได้แก่ 1) โพลีอะคิลิกแอซิด 2) โพลีอะคิลิกแอซิดโซเดียมซอลท์ 3) โพลีอิไมด์

ในการศึกษาดังกล่าวได้มีการเปลี่ยนตัวแปรในการประดิษฐ์ได้แก่ ปริมาณของ $BaTiO_3$ และขนาดของอนุภาคของ $BaTiO_3$ โดยอนุภาคที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วยกัน 3 ขนาดได้แก่ ขนาด 100 200 และ 400 นาโนเมตร ซึ่งในการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าได้ศึกษาตัวแปรทางไฟฟ้าได้แก่ ความถี่ และ แรงดันที่ใช้ เพื่อหาผลตอบสนองต่อความถี่ของค่าเก็บประจุ และ ผลตอบสนองต่อความถี่ของค่าการสูญเสียในไดอิเล็กทริก

ผลการประดิษฐ์ตัวเก็บประจุแบบฟิล์มบางโครงสร้างโพลีเมอร์/$BaTiO_3$ พบว่าโพลีเมอร์ที่ดีที่สุดซึ่งให้ผลตอบสนองต่อความถี่ของค่าเก็บประจุ และผลตอบสนองต่อความถี่ของค่าการสูญเสียในไดเล็กทริกที่ดีที่สุด คือ โพลีอิมายด์ และ พบว่าอนุภาคที่เหมาะสมในการประดิษฐ์เป็นตัวเก็บประจุแบบฟิล์มบางมากที่สุดคืออนุภาคขนาด 100 นาโนเมตร และปริมาณที่เติมในโพลีเมอร์ที่มีต่อคุณสมบัติตัวเก็บประจุ ดังนี้ กรณี ของ โพลีอะคิลิกแอซิดโซเดียมซอลท์ค่าตัวเก็บประจุมีค่าอยู่ในช่วง 0.39 -6.37 nF/cm^2 สำหรับความเข้มข้น 1.7-3.3 % ต่อปริมาตร กรณีโพลีอะคิลลิกแอซิด ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเก็บประจุและปริมาณ $BaTiO_3$ มีลักษณะคล้ายกับกรณีของเกลือโซเดียมของโพลีอะคิลลิกแอซิด และกรณีของโพลีอิมายด์ค่าตัวเก็บประจุมีค่าอยู่ในช่วง 3.2-15.5 nF/cm^2 สำหรับ $BaTiO_3$ 30-45 % ต่อปริมาตร

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2549

4870543821 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD : THIN FILM CAPACITORS/ $BaTiO_3$/ POLYACRYLIC ACID/ POLYACRYLIC ACID SODIUM SALT/ POLYIMIDE

ONG-ARJ TANGMATTAJITTAKUL : STUDY AND FABRICATION ON POLYMER/$BaTiO_3$ THIN FILM CAPACITORS. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. SOMCHAI RATANATHAMPAN, D. Eng., 69pp.

This thesis reports the invention of a new thin film capacitor by using polymer/$BaTiO_3$for developing a capacitor that can be applied on IC application and print circuit boards. This new model capacitor merits are in low cost and high capability. In this study, the capacitors are fabricated using 0.3 mm glass base . Thin polymer film instrored by dropping and spinning at 2000 rpm. The polymer structure can be used as the matrix for holding $BaTiO_3$ particles. In this experiment, the polymers are Polyacriric acid , Polyacrylic acid sodium salt and Polyimide.

In this study, the factors are $BaTiO_3$ concentration and the $BaTiO_3$ particle size which are 100, 200 , and 400 nanometers. The electrical measuring is examined with the frequencies and applied voltage factor to characterize the frequencies response of capacitors and the dielectric loss.

The results of the most effective are polyimide and the best particle size is 100 nanometres. Concentration added in polymer which affects the property of the capacitor are described as followed; in case of Polyacrylic acid sodium salt the capacitor status is in the range between 0.39-6.37 for 1.7-3.3% volume . For Polyacrylic acid the relation between capacitor and the concentration of $BaTiO_3$ is quite similar to the case of Polyacrylic acid sodium salt. For the polymine the capaciter status is 3.2-15.5 $nF/cm^2$for 30-45 % volume

Department Electrical Engineering Student's signature

Field of study Electrical Engineering Advisor's signature

Academic year 2006

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา รศ. ดร. สมชัยรัตนธรรมพันธ์ ที่คอยสนับสนุนช่วยเหลือให้คำปรึกษาและกำลังใจในเวลาที่ท้อถอยให้สู้กับการทำวิทยานิพนธ์ต่อไป

ขอกราบขอบคุณอาจารย์ที่เป็นคณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์อันได้แก่ ศ.ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว ศ.ดร. ปิยะสาร ประเสริฐธรรม และรศ.ดร. มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆารที่เสียสละเวลาอันมีค่ายิ่งในการสอบวิทยานิพนธ์ และช่วยชี้แนะแนวทางที่ควรจะเป็นและข้อบกพร่องของผู้วิจัยเพื่อแก้ไขให้ดีขึ้น

ขอขอบคุณ คุณบัณฑิตา รัฐวิเศษ คุณศุภโชค ไทยน้อย คุณพรชัย ช่างม่วง คุณพัฒนา พันธุวงศ์ คุณขวัญเรือน ไทยน้อย และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านเทคนิคและงานทางด้านธุรการต่างๆ โดยเฉพาะน้ำใจที่มีให้ผู้วิจัยเมื่อมีปัญหาในการทำวิจัย รวมถึงเรื่องอื่นๆ

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ นิสิตปริญญาเอก และโท ในห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำตลอดจนช่วยแก้ปัญหาที่ประสบในการทำงานและเรื่องต่างๆ ด้วยความเต็มใจ

ขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนในห้องประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาแก่ผู้วิจัยจนสามารถสำเร็จการศึกษาและสำเร็จงานวิจัยชิ้นนี้ลง

ขอขอบคุณห้องวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ และบริษัทเม็กเทค ประเทศไทย ที่ช่วยสนับสนุน วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณเสาวลักษณ์ ผลาพิบูลย์ คุณฉัตรมา สุวรรณรัตน์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ช่วยให้ข้อมูลในงานวิจัยและเป็นกำลังใจในยามที่ท้อแท้

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ คุณอันสูงสุดของ บิดาผู้ล่วงลับ และมารดาผู้คอยส่งเสริม เป็นกำลังใจ ให้แนวทางในการดำเนินชีวิต สร้างนิสัยในการรักการศึกษา ตลอดจนคุณต่างๆอีกนานัปการที่ไม่สามารถบรรยายได้จนจบ ที่ได้ทำให้ลูกที่เป็นผู้วิจัยได้สำเร็จมาจวบจนถึงวันนี้ คุณประโยชน์ต่างๆที่ได้ในงานวิจัย ขอผลนั้นได้บังเกิดแก่บุพการี ตลอดจนผู้มีคุณให้ประสบแต่โชคตลอดทุกภพ ทุกชาติจวบจนถึงแก่พระนิพพานในสากลชาติด้วยเทอญ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญภาพ ..... ญ

บทที่

1 บทนำ 1

2 ทฤษฎี 3

2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของสารไดอิเร็กทริก 3

2.2 การใช้วงจรสมมูลไฟฟ้าที่อธิบายถึงไดอิเล็กทริก 6

2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเร็กทริกกับการโพลาร์ไรซ์ 7

2.4 การพังทลายของไดอิเร็กทริก(Dielectric breakdown) 9

2.5วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric material) 11

3 การออกแบบและการทดลอง 16

3.1 การออกแบบตัวเก็บประจุ 16

3.2 การเตรียมวัสดุและขั้นตอนการประดิษฐ์ 17

3.3 การวัดทดสอบตัวอย่าง 23

3.4 แบบจำลองในการวัดคุณสมบัติตัวเก็บประจุ 25

4 ผลการทดลอง 26

4.1 คุณสมบัติตัวเก็บประจุฟิล์มบางโครงสร้าง PAAS/$BaTiO_3$ 26

4.2 คุณสมบัติตัวเก็บประจุฟิล์มบางโครงสร้าง PAA/$BaTiO_3$ 40

บทที่ หน้า

4.3 คุณสมบัติตัวเก็บประจุฟิล์มบางโครงสร้าง PI/$BaTiO_3$ 43

5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ 56

5.1 ผลการศึกษาการประดิษฐ์ตัวเก็บประจุแบบฟิล์มบางโครงสร้าง โพลีเมอร์/$BaTiO_3$ 56

5.2 ข้อเสนอแนะ 58

รายการอ้างอิง 59

ภาคผนวก 60

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 69

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ตัวอย่างค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์และค่าเก็บประจุ 4
2.2 ตัวอย่างแรงดันพังทลายสำหรับแก้วและเซรามิก 10
2.3 ตัวอย่างวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกและตัวแปรที่สำคัญ 15
3.1 ตัวอย่างหน้าที่ของตัวเก็บประจุในวงจรไฟฟ้า 17
4.1 ตารางสรุปค่าตัวเก็บประจุของตัวเก็บประจุฟิล์มบางโครงสร้าง PAAS/ $BaTiO_3$ โดยเปลี่ยนขนาดของอนุภาค$BaTiO_3$ที่วัดได้ที่ 100 kHz ที่แรงดัน 1 V ในอาทิตย์ที่ 4 35
4.2 ตารางสรุปค่าตัวเก็บประจุของตัวเก็บประจุฟิล์มบางโครงสร้าง PAAS/ $BaTiO_3$ โดยเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นที่วัดได้ที่ 100 kHz ที่แรงดัน 1 V ในอาทิตย์ที่ 4 36
4.3 ตารางสรุปค่าตัวเก็บประจุของตัวเก็บประจุฟิล์มบางโครงสร้าง PI/ $BaTiO_3$ โดยเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นที่วัดได้ที่ 100 kHz ที่แรงดัน 1 V ในอาทิตย์ที่ 4 48
5.1 ค่าทางไฟฟ้าที่ทำการวัดที่ความถี่ 100 Hz 1Vในสัปดาห์ที่1 58

สารบัญภาพ

รูปที่ หน้า

2.1 กราฟระหว่างความสามารถในการโพลาร์ไรซ์กับความถี่ 5

2.2 (ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเร็กทริกและค่าอุณหภูมิของวัสดุเฟอร์โรอิเร็กทริก (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าspontaneous polarization Ps และ ค่าอุณหภูมิของ วัสดุเฟอร์โรอิเร็กทริก 15

3.1 รูปโครงสร้างตัวเก็บประจุ 16

3.2 รูปกราฟของ Zeta potential เทียบกับค่าpHของสารละลายที่มีอนุภาค BaTiO3 โดยมีการเปลี่ยนความเข้มข้น 18

3.3 รูปกราฟพล็อตระหว่างค่า pHก่อนกวนกับความเข้มข้นของBa^{2+}ในหน่วยppm 19

3.4 รูปเครื่อง Evaporator และ รูปจำลองภายใน Bell jar 20

3.5 รูปของโลหะที่ใช้ทำขั้วก่อนและหลังหยดสารละลายเพื่อทดสอบ 21

3.6 รูปเครื่องspin และรูปเวลาต่อความเร็วรอบที่ใช้ 22

3.7 รูปโครงสร้างตัวเก็บประจุแบบฟิล์มบาง 22

3.8 รูปเครื่องวัดLCR meter HP4274 Multi-Frequency LCR meter 23

3.9 รูปขั้ววัดที่ใช้วัดในร่วมกับเครื่องวัดLCRในงานวิจัย 24

3.10 รูปเครื่อง Confocal laser microscope 24

3.11 รูปของวงจรสมมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ 25

4.1 ภาพผิวหน้าผ่าน Confocal microscope ของตัวเก็บประจุฟิล์มบางโครงสร้าPAAS/$BaTiO_3$ ขนาดอนุภาค 100 nm ความเข้มข้น 1.7 % ต่อปริมาตร (ก) ผิวหน้าขั้วโลหะด้านบนของตัวอย่าง (ข) ภาพขยายผิวหน้าขั้วโลหะด้านบน (ค) ภาพภาคตัดขวางของตัวอย่าง 27

4.2 ภาพผิวหน้าผ่าน Confocal microscope ของตัวเก็บประจุฟิล์มบางโครงสร้าPAAS/$BaTiO_3$ ขนาดอนุภาค 200 nm ความเข้มข้น 1.7 % ต่อปริมาตร (ก) ผิวหน้าขั้วโลหะด้านบนของตัวอย่าง (ข) ภาพขยายผิวหน้าขั้วโลหะด้านบน (ค) ภาพภาคตัดขวางของตัวอย่าง 28

4.3 ภาพผิวหน้าผ่าน Confocal microscope ของตัวเก็บประจุฟิล์มบางโครงสร้าPAAS/$BaTiO_3$ ขนาดอนุภาค 400 nm ความเข้มข้น 1.7 % ต่อปริมาตร (ก) ผิวหน้าขั้วโลหะด้านบนของตัวอย่าง (ข) ภาพขยายผิวหน้าขั้วโลหะด้านบน (ค) ภาพภาคตัดขวางของตัวอย่าง 29

4.4 รูป (ก) ค่าตัวเก็บประจุ (ข) ค่าสูญเสียในไดอิเล็กทริกของตัวเก็บประจุฟิล์มบางโครงสร้าง PAAS/ $BaTiO_3$ ที่มี $BaTiO_3$ ขนาด 100 nm ในปริมาณ 1.7 %ต่อปริมาตร.....32

4.5 รูป (ก) ค่าตัวเก็บประจุ (ข) ค่าสูญเสียในไดอิเล็กทริกของตัวเก็บประจุฟิล์มบางโครงสร้าง PAAS/ $BaTiO_3$ ที่มี $BaTiO_3$ ขนาด 200 nm ในปริมาณ 1.7 %ต่อปริมาตร.....33

4.6 รูป (ก) ค่าตัวเก็บประจุ (ข) ค่าสูญเสียในไดอิเล็กทริกของตัวเก็บประจุฟิล์มบางโครงสร้าง PAAS/ $BaTiO_3$ ที่มี $BaTiO_3$ ขนาด 400 nm ในปริมาณ 1.7 %ต่อปริมาตร.....34

4.7 รูป (ก) ค่าตัวเก็บประจุ (ข) ค่าสูญเสียในไดอิเล็กทริกของตัวเก็บประจุฟิล์มบางโครงสร้าง PAAS/ $BaTiO_3$ ที่มี $BaTiO_3$ ขนาด 100 nm ในปริมาณ 3.3 %ต่อปริมาตร.....37

4.8 รูปผิวหน้าผ่านConfocal microscopeของตัวเก็บประจุฟิล์มบางโครงสร้างPAAS/ $BaTiO_3$ขนาดอนุภาค100 nm ความเข้มข้น6.4 % ต่อปริมาตร (ก) รูปผิวหน้าขั้วโลหะด้านบนของตัวอย่าง(ข) รูปขยายผิวหน้าขั้วโลหะด้านบน.....38

4.9 รูปผิวหน้าผ่าน Confocal microscope ของตัวเก็บประจุฟิล์มบางโครงสร้าง PAAS/ $BaTiO_3$ขนาดอนุภาค100 nm ความเข้มข้น6.4 % ต่อปริมาตร(ก) รูปผิวหน้าขั้วโลหะด้านบนของตัวอย่าง(ข) รูปขยายผิวหน้าขั้วโลหะด้านบน.....39

4.10 รูปผิวหน้าผ่าน Confocal microscope ของตัวเก็บประจุฟิล์มบางโครงสร้าง PAA/ $BaTiO_3$ขนาดอนุภาค100 nm ความเข้มข้น 1.7 % ต่อปริมาตร(ก) รูปผิวหน้าขั้วโลหะด้านบนของตัวอย่าง (ข) รูปขยายของผิวหน้าขั้วโลหะด้านบน (ค) รูปภาพภาคตัดขวางของตัวอย่าง.....40

4.11 รูป (ก) ค่าตัวเก็บประจุ (ข) ค่าสูญเสียในไดอิเล็กทริกของตัวเก็บประจุฟิล์มบางโครงสร้าง PAA/ $BaTiO_3$ ที่มี $BaTiO_3$ ขนาด 100 nm ในปริมาณ 1.7 %ต่อปริมาตร.....42

4.12 รูปผิวหน้าผ่าน Confocal laser microscope ของตัวเก็บประจุชนิดฟิล์มบางโครงสร้าง PI/ $BaTiO_3$ขนาดอนุภาค100 nm ความเข้มข้น 30 % ต่อปริมาตร(ก) รูปผิวหน้าขั้วโลหะด้านบนของตัวอย่าง (ข) รูปขยายของผิวหน้าขั้วโลหะด้านบน (ค) รูปภาพภาคตัดขวางของตัวอย่าง.....44

4.13 รูปผิวหน้าผ่าน Confocal laser microscope ของตัวเก็บประจุชนิดฟิล์มบางโครงสร้าง PI/ $BaTiO_3$ขนาดอนุภาค100 nm ความเข้มข้น 35 % ต่อปริมาตร(ก) รูปผิวหน้าขั้วโลหะด้านบนของตัวอย่าง (ข) รูปขยายของผิวหน้าขั้วโลหะด้านบน (ค) รูปภาพภาคตัดขวางของตัวอย่าง.....45

4.14 รูปผิวหน้าผ่าน Confocal laser microscope ของตัวเก็บประจุชนิดฟิล์มบางโครงสร้าง PI/ $BaTiO_3$ขนาดอนุภาค100 nm ความเข้มข้น 40 % ต่อปริมาตร(ก) รูปผิวหน้าขั้วโลหะด้านบนของตัวอย่าง (ข) รูปขยายของผิวหน้าขั้วโลหะด้านบน (ค) รูปภาพภาคตัดขวางของตัวอย่าง.....46

4.15 รูปผิวหน้าผ่าน Confocal laser microscope ของตัวเก็บประจุชนิดฟิล์มบางโครงสร้าง PI/ $BaTiO_3$ขนาดอนุภาค100 nm ความเข้มข้น 45 % ต่อปริมาตร(ก) รูปผิวหน้าขั้วโลหะด้านบน ของตัวอย่าง (ข) รูปขยายของผิวหน้าขั้วโลหะด้านบน (ค) รูปภาพภาคตัดขวางของตัวอย่าง.....47

4.16 รูป (ก) ค่าตัวเก็บประจุ (ข) ค่าสูญเสียในไดอิเล็กทริกของตัวเก็บประจุฟิล์มบาง โครงสร้าง PI/ $BaTiO_3$ ที่มี $BaTiO_3$ ขนาด 100 nm ในปริมาณ 30%ต่อปริมาตร.....49

4.17 รูป (ก) ค่าตัวเก็บประจุ (ข) ค่าสูญเสียในไดอิเล็กทริกของตัวเก็บประจุฟิล์มบาง โครงสร้าง PI/ $BaTiO_3$ ที่มี $BaTiO_3$ ขนาด 100 nm ในปริมาณ 35%ต่อปริมาตร.....50

4.18 รูป (ก) ค่าตัวเก็บประจุ (ข) ค่าสูญเสียในไดอิเล็กทริกของตัวเก็บประจุฟิล์มบาง โครงสร้าง PI/ $BaTiO_3$ ที่มี $BaTiO_3$ ขนาด 100 nm ในปริมาณ 40%ต่อปริมาตร.....51

4.19 รูป (ก) ค่าตัวเก็บประจุ (ข) ค่าสูญเสียในไดอิเล็กทริกของตัวเก็บประจุฟิล์มบาง โครงสร้าง PI/ $BaTiO_3$ ที่มี $BaTiO_3$ ขนาด 100 nm ในปริมาณ 45%ต่อปริมาตร.....52

4.20 รูป (ก) ค่าตัวเก็บประจุ (ข) ค่าสูญเสียในไดอิเล็กทริกของตัวเก็บประจุฟิล์มบาง โครงสร้าง PI/ $BaTiO_3$ ที่มี $BaTiO_3$ ขนาด 100 nm ในปริมาณ 30%ต่อปริมาตร ที่100 mV.....53

4.20 รูป (ก) ค่าตัวเก็บประจุ (ข) ค่าสูญเสียในไดอิเล็กทริกของตัวเก็บประจุฟิล์มบาง โครงสร้าง PI/ $BaTiO_3$ ที่มี $BaTiO_3$ ขนาด 100 nm ในปริมาณ 30%ต่อปริมาตร ที่10 mV.....54