



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

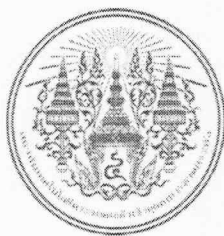
ผลของขนาดเกรนต่อฟิล์มเฟอร์โรอิเล็กทริกโดยใช้ทฤษฎีตัวกลางยังผล

Effect of Grain Size on Ferroelectric Films using
Effective Medium Theory

ดร.จตุพร ทองศรี

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2555
วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

ผลของขนาดเกรนต่อฟิล์มเฟอร์โรอิเล็กทริกโดยใช้ทฤษฎีตัวกลางยังผล

Effect of Grain Size on Ferroelectric Films using
Effective Medium Theory

ดร.จตุพร ทองศรี

12๗24944

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2555
วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทคัดย่อ

โดยอาศัยทฤษฎีตัวกลางยังผล ค่าความซาบซึมได้ของสนามไฟฟ้า $\epsilon_e(T)$ ของฟิล์มเฟอร์โรอิเล็กทริกที่มีลักษณะเกรนทรงกระบอกในสองมิติจะถูกตรวจสอบในเทอมของรัศมีแกน (a) และความหนา (t) ของชั้นฟิล์มที่ไม่ใช่เฟอร์โรอิเล็กทริก พบว่า ค่า $\epsilon_e(T)$ จะเพิ่มขึ้นตามค่าของรัศมีแกน และลดลงเมื่อค่าความหนาเพิ่มขึ้น ในงานวิจัยนี้ เราจะได้สมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\epsilon_e(T)$, a และ t ซึ่งมีประโยชน์สำหรับการเตรียมฟิล์มเฟอร์โรอิเล็กทริกให้มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ

Abstract

Based on effective medium theory, the temperature dependence of effective dielectric permittivity, $\epsilon_e(T)$, on core radius (a) and thickness (t) of non-ferroelectric dead layer (DL) on the surface of inhomogeneous grains of ferroelectric film made up of cylindrical ferroelectric grains was theoretically investigated. It was found that $\epsilon_e(T)$ increases with increasing core radius and decreases with increasing DL thickness. In this work, an equation expressing the relationship among ϵ_e , a and t was derived. This equation is very useful for the preparation of a ferroelectric film to desired properties.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินวิจัยจากวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สำหรับสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆ การใช้เครื่องมือ เครื่องคอมพิวเตอร์ และการประสานงานได้รับเอื้อเฟื้อเป็นอย่างดีจากเจ้าหน้าที่ ประจำวิทยาลัยฯ ในรายงานฉบับนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ดร.จตุพร ทองศรี

ผู้วิจัย

ธันวาคม 2556



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อไทย ก

บทคัดย่ออังกฤษ ก

กิตติกรรมประกาศ ข

สารบัญ ค

สารบัญรูปภาพ จ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 2

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย 2

1.5 คำสำคัญของการวิจัย 2

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 3

2.2 ทบทวนวรรณกรรม 5

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 แบบจำลองเกรนของสารเฟอร์โรอิเล็กทริก 6

3.2 ค่าสภาพซึมซาบของสนามไฟฟ้ายังผล $\epsilon_e(T)$ 6

บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปราย 8

บทที่ 5 สรุปผล 11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6 สรุปผลการผลิตงานวิจัย

6.1 สรุปรายชื่อและรายละเอียดผลผลิตงานวิจัยที่ผลิตได้.....	12
และที่อยู่ระหว่างดำเนินการทั้งหมด	
เอกสารอ้างอิง.....	13
ภาคผนวก	
ประวัตินักวิจัย.....	14



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูป 2.1 อะตอมที่มีการโพราไรซ์	3
รูป 3.1 แบบจำลองเกรนสารเฟอร์โรอิเล็กทริก	6
รูป 4.1 temperature dependence ของสาร $Ba_{0.65}Sr_{0.35}TiO_3$ ที่ได้จากงานวิจัยของ Vendik8 และคณะ [5]	
รูป 4.2 temperature dependence ยังผล $\epsilon_e(T)$ เมื่อกำหนดให้ $t=3$ nm สำหรับค่า a ต่างๆ	9
รูป 4.3 temperature dependence ยังผล $\epsilon_e(T)$ เมื่อกำหนดให้ $a=15$ nm สำหรับค่า t ต่างๆ	10



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สารเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric Material) เช่น PZT (Lead Zirconate Titanate) และ SBT (Strontium Bismuth Tantalate) ได้รับความสนใจกันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน เนื่องจากมันมีค่าความขบขี้มได้ของสนามไฟฟ้าสูง (high permittivity) และสมบัติฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ดังนั้นจึงถูกนำมาประยุกต์ผลิตเป็นแรม (RAM) แบบ Non-Volatile Memory หรือเรียกว่า FeRAM ซึ่งแรมชนิดนี้สามารถเก็บรักษาข้อมูลได้ถึงแม้ว่าไม่มีไฟเลี้ยง ประหยัดไฟ และยังมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าแรมชนิดอื่นอีกด้วย ในกระบวนการผลิต FeRAM นั้น สารเฟอร์โรอิเล็กทริกดังกล่าวจะถูกเตรียมขึ้นให้มีลักษณะเป็นฟิล์มบาง (Thin Films) ขนาดเล็กมาก มีความหนาในระดับนาโนเมตร เพื่อใช้ทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุ (Capacitor) ใน FeRAM โดยค่า permittivity ของฟิล์มบางที่เตรียมได้นั้นขึ้นอยู่กับหลายๆปัจจัย เช่นวิธีการเตรียม อุณหภูมิ ชนิด รูปร่าง สัดส่วนโดยปริมาตรของสารที่ใช้เตรียม และมันยังขึ้นกับความหนาของฟิล์มที่เตรียมได้อีกด้วย จากการค้นคว้าพบว่า เมื่อขนาดของฟิล์มที่เตรียมได้จริงในห้องปฏิบัติการมีขนาดบางมากจนถึงระดับน้อยกว่า 10 นาโนเมตร ค่า permittivity กลับลดลง สวนทางกับเป้าหมายที่ต้องการให้ฟิล์มมีขนาดเล็กแต่ค่า permittivity สูง ทำให้ไม่เหมาะที่จะนำมาพัฒนาเป็น FeRAM สาเหตุที่ทำให้ค่า permittivity ลดลง เป็นเพราะเนื้อสาร (Grain) บางส่วนเกิด Dead Layer (DL) ขึ้น ซึ่ง DL ที่เกิดขึ้นนี้จะมีสมบัติเป็นไดอิเล็กทริก มันจะเกิดขึ้นรอบๆเกรนที่ยังคงมีสมบัติเป็นเฟอร์โรไดอิเล็กทริกอยู่ โดยสมบัติทางไฟฟ้าของ Dead Layer ที่เกิดขึ้นนี้ จะขึ้นอยู่กับรูปร่างและขนาด (Grain Size) ของเนื้อสารด้วย เพื่อเข้าใจและแก้ปัญหาดังกล่าวที่เกิดขึ้น ได้มีงานวิจัยก่อนหน้านี้หลายชิ้นได้ศึกษาปัญหาดังกล่าว พร้อมทั้งอธิบาย และทำนายผลของ Dead Layer ต่อ permittivity ของเฟอร์โรอิเล็กทริกฟิล์มด้วย แต่งานดังกล่าวใช้เพียงทฤษฎีพื้นฐานในการศึกษาเท่านั้น ทำให้ผลการศึกษาที่ได้ยังไม่ครอบคลุม และอาจนำไปประยุกต์ใช้จริงในการเตรียมฟิล์มได้ไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาผลของขนาดและรูปร่างของเกรนต่อโครงสร้างระดับนาโนของฟิล์มเฟอร์โรอิเล็กทริกเชิงทฤษฎีโดยอาศัยทฤษฎีตัวกลางยังผล (Effective Medium Theory) ซึ่งเป็นทฤษฎีที่ได้รับการยอมรับกันอย่างแพร่หลาย ว่าสามารถใช้ในการสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยจะศึกษาว่าเมื่อขนาดของเกรนลดลงจนกระทั่งเกิด Dead Layer ขึ้น ความหนาของ Dead Layer จะมีผลต่อค่า effective permittivity อย่างไร รวมทั้งศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างรูปร่างของเกรน effective permittivity เพื่อนำมาเป็นองค์ความรู้ประกอบการเตรียมฟิล์มบางเพื่อให้ฟิล์มที่เตรียมได้สมบูรณ์เกิดประโยชน์สูงสุดตรงตามความต้องการต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- เพื่อศึกษาผลของขนาด และรูปร่างของเกรนต่อค่า effective permittivity ของฟิล์มเฟอร์โรอิเล็กทริก
- เพื่อจะได้รับความรู้ทางทฤษฎี ที่จะนำมาประยุกต์ใช้จริงในการเตรียมฟิล์มเฟอร์โรอิเล็กทริก
- เพื่อพัฒนาผู้วิจัยให้มีฐานความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับฟิสิกส์ของสารเฟอร์โรอิเล็กทริกดียิ่งขึ้น

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ทำการวิจัยเชิงทฤษฎีจนได้องค์ความรู้ดังต่อไปนี้

- แบบจำลองทางทฤษฎีของเกรนโดยอาศัยทฤษฎีตัวกลางยังผล
- ทราบความสัมพันธ์ของปริมาณต่างๆเช่นรูปร่าง ขนาดของเกรน และความหนาของ Dead Layer ต่อค่า effective permittivity ของฟิล์มเฟอร์โรอิเล็กทริก
- วิเคราะห์ผลที่ได้เพื่อหาปริมาณที่เหมาะสม ที่จะนำไปประยุกต์ในการเตรียมฟิล์มให้มีคุณสมบัติตรงตามต้องการ

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ใช้ทฤษฎีตัวกลางยังผลจำลองรูปร่างและลักษณะเกรนของฟิล์ม และแก้สมการลาปลาซเพื่อคำนวณหาศักย์ทดลองในบริเวณต่างๆของฟิล์ม
2. แก้สมการปัญหาเงื่อนไขค่าขอบ เพื่อคำนวณหาค่าคงที่ต่างๆที่เกี่ยวข้อง เพื่อที่จะนำไปสู่ค่าสนามไฟฟ้าภายในบริเวณต่างๆของฟิล์ม
3. ใช้วิธีการเฉลี่ยค่าพลังงานคำนวณค่า ϵ_e ของฟิล์มโดยใช้การเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์
4. วิเคราะห์ อภิปราย สรุปผลการคำนวณ โดยเปรียบเทียบกับกรเตรียมฟิล์มจริงในห้องปฏิบัติการ
5. สรุปและเขียนรายงานโครงการ เพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ

1.5 คำสำคัญของการวิจัย

- ทฤษฎีตัวกลางยังผล (Effective Medium Theory)
- ฟิล์มเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric Film)
- ค่าซึมซาบของสนามไฟฟ้า (Electric Permittivity)

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- เพิ่มเติมองค์ความรู้ด้านรูปร่าง และขนาดของเกรนต่อสมบัติระดับนาโนของฟิล์มเฟอร์โรอิเล็กทริกใกล้เคียงกับฟิล์มที่เตรียมได้จริงมากยิ่งขึ้น
- พัฒนางานวิจัยด้านนาโนเทคโนโลยีให้กับประเทศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 โพลาริเซชันและไดโพลโมเมนต์เหนี่ยวนำ (Polarization and Induced Dipole Moments)

เมื่ออะตอมที่มีสภาพเป็นการทางไฟฟ้าถูกนำไปวางไว้ในสนามไฟฟ้า E อิทธิพลของสนามไฟฟ้าจะทำให้กลุ่มหมอกอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบ (negatively electron cloud) และนิวเคลียสซึ่งมีประจุบวก (positive nucleus) แยกออกจากกัน โดยจะเกิดสมดุลงักต่อเมื่อแรงที่ทำให้กลุ่มหมอกและนิวเคลียสแยกออกจากกันนั้นมีขนาดเท่ากับแรงที่กลุ่มหมอกอิเล็กตรอน และนิวเคลียสดึงดูดซึ่งกันและกัน ดังแสดงในรูป 2.1 ซึ่งสภาพดังกล่าวอะตอมถูกโพลาริซ์ และเหตุการณ์ดังกล่าวจะทำให้เกิดไดโพลเหนี่ยวนำ (induced dipole) ซึ่งมีทิศเดียวกับสนามไฟฟ้า ดังสมการ

$$p = \alpha E \quad (2.1)$$

โดย p คือ การกระจัดทางไฟฟ้า (electric displacement)

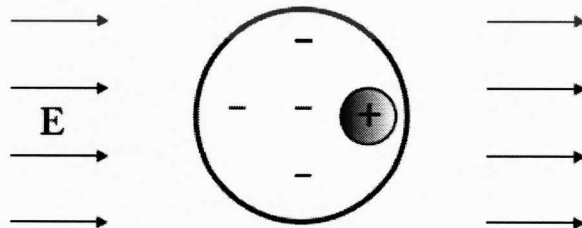
E คือ สนามไฟฟ้า (electric field)

α คือ ค่าโพลาริเซชันของอะตอม (atomic polarizability)

นอกจากนั้นแล้วยังจะได้อีกว่า ไดโพลโมเมนต์ต่อปริมาตร ก็คือค่าโพลาริเซชัน (P) นั่นเอง

$$P = p/V \quad (2.2)$$

เมื่อ V คือปริมาตรที่พิจารณา



รูปที่ 2.1 อะตอมที่มีการโพลาริซ์

2.1.2 สารไดอิเล็กทริก (Dielectric Media)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารเฟอร์โรอิเล็กทริก คือสารไดอิเล็กทริกจำพวกหนึ่งนั่นเอง ดังนั้นสมการทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับสารไดอิเล็กทริก สามารถนำมาใช้ได้กับสารเฟอร์โรอิเล็กทริก

ในสารไดอิเล็กทริก ความสัมพันธ์ระหว่าง การกระจัดทางไฟฟ้า (D) และโพลาริเซชัน (P) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$D = \epsilon_0 E + P \quad (2.3)$$

เมื่อ ϵ_0 คือสภาพซึมซาบได้ของอากาศ (permittivity of free space)

โดยทั่วไปในสารไดอิเล็กทริก การกระจัดทางไฟฟ้า จะขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้าที่ได้รับ ในกรณีที่สนามไฟฟ้ามีค่าไม่สูงมากนัก ความสัมพันธ์ระหว่างโพลาริเซชัน และสนามไฟฟ้าจะสามารถเขียนได้ดังนี้

$$P = \epsilon_0 \chi' E \quad (2.4)$$

เมื่อ χ' คือ ค่า electric susceptibility

แทนค่าสมการที่ (2.4) ลงในสมการ (2.3) จะได้

$$\begin{aligned} D &= (1 + \chi') \epsilon_0 E \\ &= \epsilon E \end{aligned} \quad (2.6)$$

โดยที่ $\epsilon \equiv (1 + \chi')$ ถูกเรียกว่าค่าซึมซาบได้ของสารไดอิเล็กทริก (permittivity of material) ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าสำหรับสารไดอิเล็กทริกที่มีสมบัติเชิงเส้น (linear dielectric) ค่าการกระจัดทางไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับสนามไฟฟ้านั่นเอง

2.1.3 สมการพื้นฐานทางไฟฟ้าสถิตย์ (Basic Equation in Electrostatics)

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงสมการพื้นฐานที่จำเป็นในงานวิจัยนี้

- สมการลาปลาซ (Laplace's Equation)

สมการลาปลาซใช้สำหรับนิยามศักย์ไฟฟ้าในสารไดอิเล็กทริก ในพิกัดทรงกระบอก สมการลาปลาซคือ

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (2.7)$$

- เงื่อนไขค่าขอบ (Boundary conditions)

เงื่อนไขค่าขอบ ใช้สำหรับการแก้สมการหาค่าคงที่ (Unknown variable) ที่ไม่ทราบค่าจากสมการศักย์ไฟฟ้าในตัวเนื้อสาร และค่าสนามไฟฟ้าบริเวณต่างๆ เงื่อนไขค่าขอบมีสองเงื่อนไข ได้แก่

แนวสัมผัส (Tangential component)

สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสของตัวกลางที่ 1 และ 2 มีค่าต่อเนื่อง นั่นคือ

$$E_{1t} = E_{2t} \quad (2.8)$$

แนวตั้งฉาก (Normal component)

การกระจัดทางไฟฟ้าในแนวสัมผัสของตัวกลางที่ 1 และ 2 มีค่าต่อเนื่อง ได้แก่

$$D_{1n} = D_{2n} \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ทบทวนวรรณกรรม

$(\text{Ba,Sr})\text{TiO}_3$ (BST) เป็นฟิล์มเฟอร์โรอิเล็กทริกชนิดหนึ่ง ใช้เป็นส่วนประกอบสำคัญสำหรับผลิต Dynamic random access memory (RAM) โดยทั่วไปแล้วค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) ของฟิล์มเฟอร์โรอิเล็กทริกจะขึ้นอยู่กับความหนาของมัน เนื่องจากการผลิต RAM ต้องการฟิล์มที่มีความบางมากจากการปลูกฟิล์มจริงพบว่า เมื่อความหนาของฟิล์มลดลงจนถึงระดับ 10 นาโนเมตรค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกลับลดลงซึ่งไม่เป็นที่ต้องการ การลดลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกนี้เรียกว่าปรากฏการณ์ “ผลของขนาดเกรน” (effect of grain size) ดังนั้นการศึกษาเชิงทฤษฎีของปรากฏการณ์นี้จะมีประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ใช้สำหรับเตรียมฟิล์มเฟอร์โรอิเล็กทริก ให้มีคุณสมบัติตามต้องการ หลีกเลี่ยงปรากฏการณ์ดังกล่าวได้ เพื่อที่จะอธิบายปรากฏการณ์นี้ Lee และ Hwang [1] ได้เสนอสมมติฐานเรื่อง dead layer ขึ้น ซึ่งต่อมาได้รับการยืนยันจากการศึกษาฟิล์มบาง BST ของ Chen และคณะ [2] โดยอาศัยแบบจำลองของตัวเก็บประจุแบบขนาน (series capacitor model) ว่า เมื่อเตรียมฟิล์มให้บางมากแล้ว เกรนของฟิล์มที่ปลูกขึ้นจะเปลี่ยนเป็นมีสองชั้น ชั้นในจะมีสมบัติเป็นสารเฟอร์โรอิเล็กทริก และถูกล้อมรอบด้วยชั้นนอกที่เป็นสารที่ไม่ใช่เฟอร์โรอิเล็กทริก (non-ferroelectric) ซึ่งทำให้ค่าไดอิเล็กทริกลดลงเป็นอย่างมาก นับเป็นการยืนยันปรากฏการณ์ดังกล่าวได้เป็นอย่างดี

โดยอาศัยวิธีการเฉลี่ยสนามไฟฟ้า (average field method) Vendik [3, 4] และคณะได้ทำการศึกษาเชิงทฤษฎีของสภาพขาคิมได้ของสนามไฟฟ้าต่ออุณหภูมิและขนาดความหนาของเกรนที่เปลี่ยนไป โดยเกรนของฟิล์มเฟอร์โรอิเล็กทริกที่ค้นคว้ามักมีลักษณะเป็นวงรีในสองมิติ และเป็นทรงกลมในสามมิติ ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวสอดคล้องเป็นอย่างดีกับงานวิจัยที่พวกเขาเคยได้ศึกษาไว้ก่อนหน้านี้ [5]

ทฤษฎีตัวกลางยังผลถูกใช้เป็นครั้งแรกโดย Hashin [6] ในการศึกษาคุณสมบัติยังผลของสารที่มีลักษณะเป็นคอมโพสิตทรงกลมไม่เชิงเส้นสองเฟส (effective properties of spherical two-phase composite materials) ก่อนหน้านี้ไม่นาน เราได้ใช้ทฤษฎีตัวกลาง (effective medium theory) ยังผลศึกษาการตอบสนองทางไฟฟ้าของไดอิเล็กทริกคอมโพสิตทรงกลมไม่เชิงเส้นอย่างแรง [7] ซึ่งผลการคำนวณได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองของนักวิจัยท่านอื่น พบว่าสอดคล้องกันเป็นอย่างดี เป็นการยืนยันความน่าเชื่อถือของทฤษฎีตัวกลางยังผลได้เป็นอย่างดี

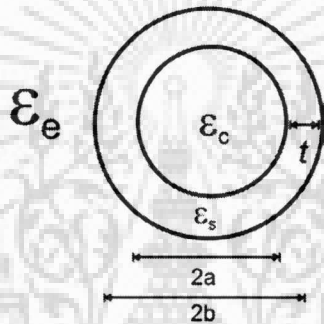
ในงานวิจัยนี้ ทฤษฎีตัวกลางยังผล จะถูกใช้จำลองทางทฤษฎี เพื่อศึกษาผลของขนาดเกรนต่อสมบัติของฟิล์มเฟอร์โรอิเล็กทริกที่มีเกรนลักษณะเป็นทรงกระบอกในสองมิติ นอกจากนี้ยังจะศึกษาผลของการเปลี่ยนขนาดเกรนที่มีต่อสภาพขาคิมขาคิมยังผลที่ขึ้นกับอุณหภูมิ (temperature dependence of effective permittivity) อีกด้วย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 แบบจำลองเกรนของสารเฟอร์โรอิเล็กทริก

โดยอาศัยทฤษฎีตัวกลางยังผล เกรนของฟิล์มเฟอร์โรอิเล็กทริกที่เราพิจารณาเมื่อเกิดปรากฏการณ์ grain size effect อาจพิจารณาได้ว่าประกอบไปด้วยเกรนที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกในสองมิติ ด้านในมีรัศมี a มีสภาพซึมซาบไฟฟ้าเป็น ϵ_c ถูกล้อมรอบด้วยสารที่เป็น non-ferroelectric ซึ่งมีแกนกลางร่วมกันรัศมี b หรืออาจกล่าวได้ว่า ล้อมรอบด้วยความหนา $t = b - a$ นั่นเอง โดยเกรนที่เราพิจารณาถูกล้อมรอบด้วยสารเฟอร์โรอิเล็กทริกซึ่งมีลักษณะเนื้อเดียว (homogeneous medium) ดังแสดงในรูป 3.1



รูป 3.1 แบบจำลองเกรนสารเฟอร์โรอิเล็กทริก

เพื่อที่จะคำนวณหาค่า ϵ_e ศักย์ไฟฟ้า (electric potential, ϕ) ภายในแบบจำลองเกรนในรูป 3.1 ก็คือผลเฉลยของสมการลาปลาซในพิกัดทรงกระบอก นั่นคือผลเฉลยของสมการ (2.7) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\phi_c(r, \theta) = A \cos \theta, \quad 0 \leq r \leq a \quad (3.1)$$

$$\phi_s(r, \theta) = (Br + \frac{C}{r}) \cos \theta, \quad a \leq r \leq b \quad (3.2)$$

$$\phi_e(r, \theta) = (-r + \frac{D}{r}) \cos \theta, \quad b \leq r < \infty \quad (3.3)$$

โดยที่ตัวห้อย c , s , และ e หมายถึง แกน, เปลือก และ ค่ายังผลของสารตามลำดับ

3.2 ค่าสภาพซึมซาบของสนามไฟฟ้ายังผล (effective permittivity, ϵ_e)

ค่าคงที่ A , B , และ C สามารถหาได้โดยใช้เงื่อนไขค่าขอบในแนวสัมผัส และแนวตั้งฉากของเกรน ดังแสดงในสมการ (2.8) และ (2.9) จากการแก้สมการเพื่อหาค่าคงที่ดังกล่าว จะได้ว่าค่า A คือ

$$A = \frac{-4b^2 \epsilon_s \epsilon_e E_0}{v_c (\epsilon_c - \epsilon_s) (\epsilon_s - \epsilon_e) + (\epsilon_c + \epsilon_s) (\epsilon_s + \epsilon_e)} \quad (3.4)$$

เมื่อ E_0 คือสนามไฟฟ้าที่ให้ และ $v_c = a^2/b^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า ϵ_e ของสารเฟอร์โรอิเล็กทริกที่มีปริมาตร V ซึ่งนิยามโดย Hashin [6] จะมีค่าเป็น

$$\epsilon_e \langle E \rangle = v_c \epsilon_c \langle E_c \rangle + v_s \epsilon_s \langle E_s \rangle, \quad (3.5)$$

เมื่อ $\langle E \rangle = (1/V) \int_V |E| dV$. v_c และ v_s คือค่าอัตราส่วนโดยปริมาตรของแกน และเปลือก ตามลำดับต่อปริมาตรสารทั้งหมดโดย $v_s = 1 - v_c$.

Hashin [6] ยังได้หาค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยต่อปริมาตรภายในสาร (volume average of electric field) ซึ่งมีค่าสม่ำเสมอตลอดทั้งเนื้อสารซึ่งมีค่า $\langle E \rangle = E_0$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$v_c \langle E_c \rangle + v_s \langle E_s \rangle = E_0 \quad (3.6)$$

จากสมการที่ (3.5) และ (3.6) จะได้ว่า

$$\epsilon_e E_0 = \epsilon_s E_0 + v_c (\epsilon_c - \epsilon_s) \langle E_c \rangle. \quad (3.7)$$

จากการหาค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยต่อปริมาตรภายในของสารภายในแกน พบว่า $\langle E_c \rangle = -A$ แทนค่าสมการ (3.4)

ลงใน (3.7) แล้วทำการจัดรูปใหม่จะได้ว่า

$$\epsilon_e = \epsilon_s \left[1 + \frac{v_c}{\frac{\epsilon_s - \epsilon_c}{2} + v_s} \right]. \quad (3.8)$$

สมการที่ (3.8) นี้เป็นที่คุ้นเคยในการศึกษาสภาพซึมซาบยังผลของสารไดอิเล็กทริกคอมโพสิตทรงกระบอกเชิงเส้น (effective linear coefficients of two-phase cylindrical composite materials) Hashin [6] หากเราจัดรูปสมการนี้ใหม่จะได้ว่า

$$\epsilon_e = \epsilon_s \left[\frac{\epsilon_c (b^2 + a^2) + \epsilon_s (b^2 - a^2)}{\epsilon_c (b^2 - a^2) + \epsilon_s (b^2 + a^2)} \right]. \quad (3.9)$$

แทนค่า $b = a + t$ ในสมการ (3.9) โดยที่ละเว้นเทอมกำลังสองโดยประมาณว่า $b^2 \cong a^2 + 2at$ ค่าสภาพซึมซาบยังผล ϵ_e ของสารเฟอร์โรอิเล็กทริกสามารถเขียนได้ในเทอมของ ค่ารัศมีแกน (a) และความหนาของชั้นฟิล์ม (t) ที่เป็น non-ferroelectric dead layer ได้ดังนี้

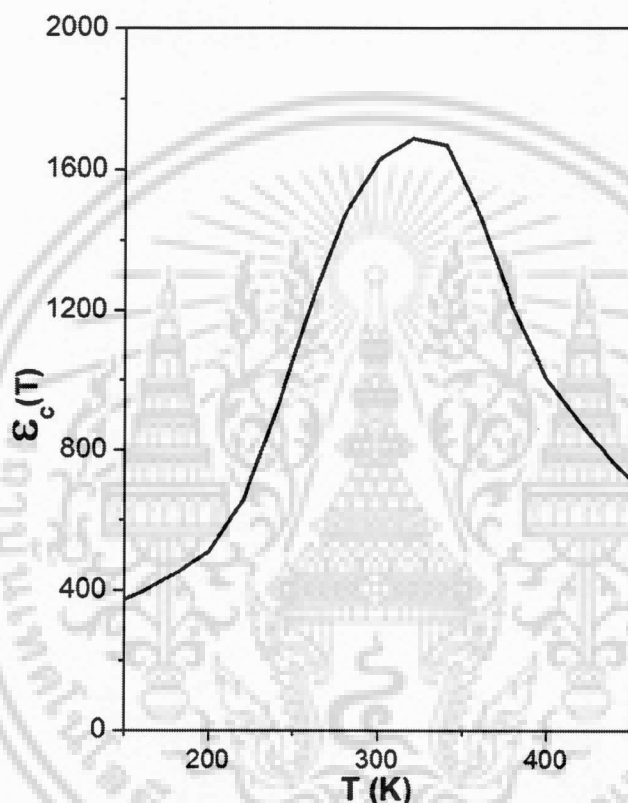
$$\epsilon_e = \epsilon_c \left(1 + \frac{t}{a} + \frac{\epsilon_s t}{\epsilon_c a} \right) / \left(1 + \frac{t}{a} + \frac{\epsilon_c t}{\epsilon_s a} \right). \quad (3.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปราย

ในงานวิจัยนี้ เราได้ใช้ค่า ϵ_c ที่ได้จาก Vendik และคณะ [5] ซึ่งรายงานค่า temperature dependence ของสาร $\text{Ba}_{0.65}\text{Sr}_{0.35}\text{TiO}_3$ (BST) ซึ่งมีค่า structural quality factor เป็น $\xi_s = 0.9$ โดยใช้ phenomenological model เป็นพื้นฐาน ซึ่งค่า ϵ_c แสดงดังรูป 4.1



รูป 4.1 temperature dependence ของสาร $\text{Ba}_{0.65}\text{Sr}_{0.35}\text{TiO}_3$ ที่ได้จากงานวิจัยของ Vendik และคณะ [5]

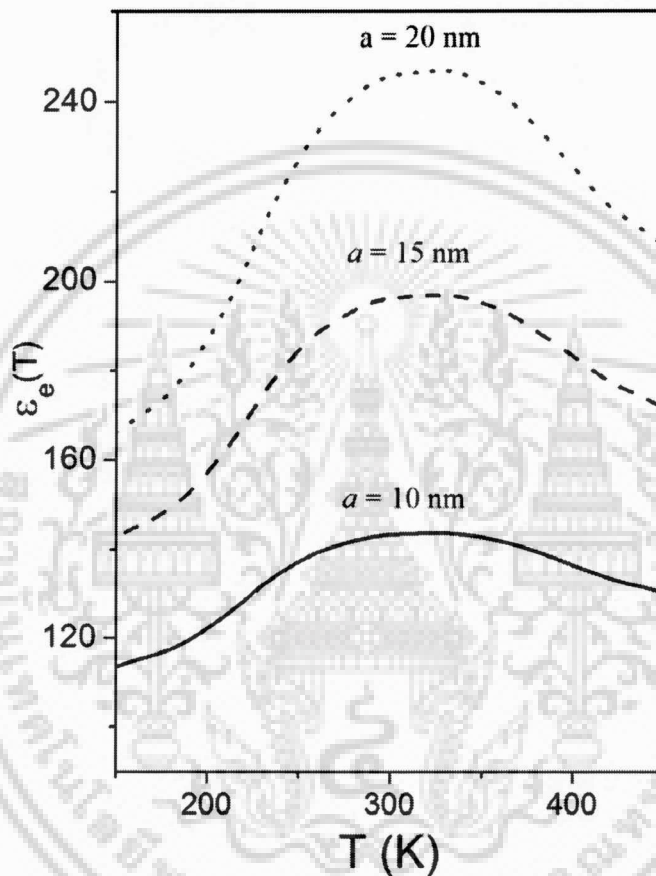
Chen และคณะ [2] รายงานอีกว่าเปลือกของเกรนจะแสดงคุณสมบัติของ non-ferroelectric เมื่อความหนา มีค่า $t=3$ นาโนเมตร และค่า ϵ_s มีค่า 40 ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิด้วย

จากที่กล่าวมาทั้งหมด เราใช้คุณสมบัติของแกนตามที่ Vendik และคณะ [5] ได้รายงานไว้ในรูปที่ 4.1 และค่า $\epsilon_s = 40$ จากการรายงานของ Chen และคณะ [2] เราสามารถหาค่า $\epsilon_e(T)$ สำหรับฟิล์มบาง เพอร์โรอิเล็กทริกได้ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3

รูปที่ 4.2 แสดงค่า ค่า $\epsilon_e(T)$ สำหรับค่า $t=3$ นาโนเมตร ซึ่งจะได้ว่า $\epsilon_e(T)$ มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่า a ที่เพิ่มขึ้น ส่วนรูป 4.3 พบว่า เมื่อกำหนดค่า ค่า $a=15$ นาโนเมตร ซึ่งจะได้ว่า $\epsilon_e(T)$ มีค่าลดลงเมื่อค่า t เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการเปรียบเทียบผลของ ϵ_c จากรูป 4.1 กับรูปที่ 4.2 และ 4.3 เราจะพบว่า เมื่อมี dead layer ชั้นที่เกรนของฟิล์มจะทำให้ค่า $\epsilon_e(T)$ ลดลงอย่างแท้จริงตามที่ Lee และ Hwang [1] ได้กล่าวอ้างไว้ ซึ่งผลทำนองนี้ยังเกิดขึ้นในการทดลองของ Berg และคณะ [8] ในการศึกษาโครงสร้างระดับนาโนของฟิล์ม BTO ซึ่งปลูกลงบนฟิล์ม multilayer metal electrode โดยใช้การกระตุ้นด้วยเลเซอร์ ซึ่งควบคุมอัตราการปลูกฟิล์มโดยการเปลี่ยนอุณหภูมิ

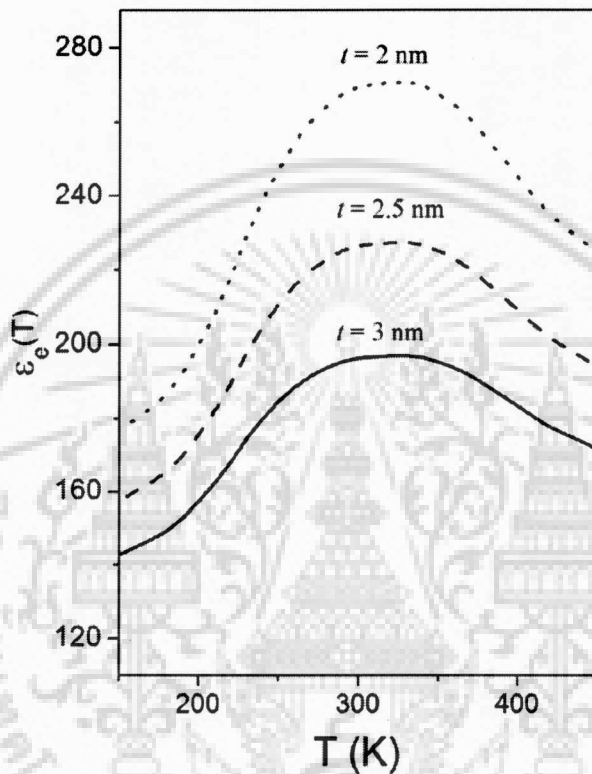


รูป 4.2 temperature dependence ยังผล $\epsilon_e(T)$ เมื่อกำหนดให้ $t=3$ nm สำหรับค่า a ต่างๆ

นอกจากการยืนยันผลการคำนวณของเราโดยเทียบกับการทดลองดังกล่าวข้างต้นแล้ว เรายังได้ทำการคำนวณ $\epsilon_e(T)$ สำหรับกรณีฟิล์มที่มีเกรนเป็นทรงกลม (spherical grain) โดยใช้ทฤษฎีตัวกลางยังผล (EMT) ผลการคำนวณที่ได้สอดคล้องกับที่ Vendik และคณะ [3] ที่ใช้การคำนวณโดยอาศัยวิธีการเฉลี่ยค่าสนามไฟฟ้า (average field method) แต่ผลการคำนวณดังกล่าวของเราไม่ได้รายงานในเอกสารฉบับนี้ แต่เป็นอีกสิ่งที่ยืนยันความถูกต้องการทฤษฎีตัวกลางยังผล

ประโยชน์ของงานวิจัยนี้มีหลายด้าน เช่นใช้ในการทำนาย $\epsilon_e(T)$ สำหรับฟิล์มที่ต้องการปลูก เนื่องจาก DRAM ต้องการฟิล์มที่มีค่า $\epsilon_e(T)$ สูง จากรูปที่ 4.2 และ 4.3 จะเห็นได้ว่า ต้องปลูกฟิล์มที่อุณหภูมิในช่วง 300- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

350 เคลวินจะได้ฟิล์มที่มีคุณสมบัติดังที่กล่าวมา นอกจากนั้นยังมีประโยชน์ในการกำหนดเงื่อนไขในการปลูกฟิล์ม BST ให้มีค่า $\epsilon_e(T)$ ตรงตามความต้องการได้อีกด้วย เช่นในรูป 4.3 เราต้องการฟิล์มที่มี $\epsilon_e(T) \approx 220$ และเราพบว่าเกรนมี $a=15$ nm $\epsilon_s = 40$ เราต้องปลูกฟิล์มให้มี $t=2.5$ ที่อุณหภูมิประมาณ 300 เคลวินเป็นต้น



รูป 4.3 temperature dependence ยังผล $\epsilon_e(T)$ เมื่อกำหนดให้ $a=15$ nm สำหรับค่า t ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ เราได้ใช้ทฤษฎีตัวกลางยังผลจำลองเกรนของฟิล์มบางเฟอร์โรอิเล็กทริกที่มีเกรนมีลักษณะเป็นทรงกระบอกในสองมิติ ค่าสภาพซึมซาบยังผลที่ขึ้นกับอุณหภูมิ ($\epsilon_e(T)$) จะถูกคำนวณในเทอมของขนาดเกรน (d) และความหนาของชั้นฟิล์ม (t) ผลการคำนวณดังกล่าวพบว่าเมื่อกำหนด $t=3$ นาโนเมตร ค่า $\epsilon_e(T)$ จะเพิ่มตามค่า a ที่เพิ่มขึ้น ในทางตรงข้าม เมื่อกำหนดให้ $a=15$ nm การเพิ่มขึ้นของค่า t จะทำให้ $\epsilon_e(T)$ มีค่าลดลง ผลของงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เตรียมฟิล์ม BST ให้มีสมบัติตรงความต้องการได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการผลิตงานวิจัย

ผลงานวิจัยนี้ได้มีการนำเสนอใน 2 รูปแบบคือ

1. นำเสนอในรูปแบบโปสเตอร์สำหรับการประชุมวิชาการของสมาคมฟิสิกส์ไทยประจำปี 2556 (Siam Physics Congress 2013) ในระหว่างวันที่ 21-23 ที่จังหวัดเชียงใหม่ โดยมีมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา และสมาคมฟิสิกส์ไทยเป็นเจ้าภาพ และได้ตีพิมพ์ในวารสารการประชุม คือ
J. Thongsri, Effect of Grain Size on Ferroelectric Films using Effective Medim Theory, Proc. Con. Siam Physics Congress, (2013) 240-242.
2. ส่งตีพิมพ์ในวารสารวิจัยระดับนานาชาติที่ชื่อว่า “Chiang Mai University Journal of Natural Science (CMU J. Nat. Sci.)” ซึ่งอยู่ในฐานข้อมูล Scopus ขณะนี้ได้รับการยอมรับ และบรรณาธิการวารสารฉบับนี้ได้ให้ผู้เขียนแก้ไขเรียบร้อยแล้ว และอยู่ในขั้นตอนของการทบทวนขั้นสุดท้าย คาดว่าจะได้รับการตีพิมพ์ในช่วงเดือน มกราคม – มีนาคม 2557 เมื่อตีพิมพ์แล้วจะแจ้งพร้อมหลักฐานเพื่อยืนยันการตีพิมพ์ต่อไป

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนทุนวิจัย 75,000 บาท และได้มีข้อกำหนดว่า ต้องตีพิมพ์ผลงานในวารสารระดับชาติ 1 ครั้ง ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ถูกนำเสนอไปแล้วทั้งในรูปแบบ รายงานการประชุม (proceeding) และในรูปแบบของวารสารวิจัยระดับนานาชาติซึ่งอยู่ในฐานของข้อมูล scopus (Journal) ซึ่งถือได้ว่า เกินกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ในการขอทุนวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Lee, B. T., and C. S. Hwang. 2000. Influences of interfacial intrinsic low-dielectric layers on the dielectric properties of sputter (Ba,Sr)TiO₃ thin films. Appl. Phys. Lett. 77: 124-126.
- [2] Chen, B., H. Yang, L. Zhao, J. Miao, B. Xu, X. G. Qiu, and B. R. Zhao. 2004. Thickness and dielectric constant of dead layer in Pt/(Ba_{0.7}Sr_{0.3})TiO₃/YBa₂Cu₃O_{7-x} capacitor. Appl. Phys. Lett. 84: 583-585.
- [3] Vendik, O.G., N. Yu. Medvedeva, and S. P. Zubko. 2007. Size effect in nanostructured ferroelectric films, Tech. Phys. Lett. 33: 231-234.
- [4] Vendik, O.G., N. Yu. Medvedeva, and S. P. Zubko. 2008. Effective permittivity of a nanostructured film consisting of elliptic ferroelectric grains. Tech. Phys. Lett. 34: 323-326.
- [5] Vendik, O. G. and S. P. Zubko. 1997. Modeling the dielectric response of incipient ferroelectrics, J. Appl. Phys., 82: 4475-4483.
- [6] Hashin, Z. 1968. Assessment of the self-consistent scheme approximation: conductivity of particulate composites, J. Comp. Mat. 2: 284-300.
- [7] Thongsee, J. and M. Natenapit. 2007. Effective nonlinear coefficients of strongly nonlinear dielectric composites. J. Appl. Phys., 101: 024103-1-4.
- [8] Berge, J., A. Vorobiev, and S. Gevorgian. 2007. The effect of growth temperature on the nanostructure and dielectric response of BaTiO₃ ferroelectric films. Thin Solid Films. 515: 6302-6308.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล ดร.จตุพร ทองศรี

ตำแหน่งปัจจุบัน

อาจารย์ และนักวิจัยประจำวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วิทยาศาสตรบัณฑิต	ฟิสิกส์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	2544
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต	ฟิสิกส์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2548
วิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต	ฟิสิกส์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2553

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา)

- Finite Element Method in Physics an Engineering
- Computational Fluid Dynamics

ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
2538-2552	ทุนพัฒนาและส่งเสริมผู้มีความสามารถพิเศษทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (พสวท)	สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.)
2549-2550	ทุนสนับสนุนงานวิจัย	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2551-2553	ทุนกาญจนาภิเษกสมโภช 90 ปี ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2546-2553	ทุนผู้ช่วยสอน (Teacher Assistant)	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2555	ทุนวิจัยร่วมกับภาคอุตสาหกรรมทางด้านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์	บริษัทซีเกทเทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2555	ทุนวิจัยเงินรายได้	วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการ ข้อมูล
2556	ทุนวิจัยร่วมกับภาคอุตสาหกรรมทางด้านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์	บริษัทซีเกทเทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด
2557	ทุนนักวิจัยหน้าใหม่	สจล.
2557	ทุนวิจัยเงินรายได้	วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการ ข้อมูล

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

1. J. Thongsee and M. Natenapit, Effective Nonlinear Coefficient of Strongly Nonlinear Dielectric Composites, J. Appl. Phys. **101**, 024103 (2007).
2. M. Natenapit and J. Thongsri, Shape Effect on the Strongly Nonlinear Response of Elliptical Composites, Eur. Phys. J. Appl. Phys. **46**, 20701 (2009).
3. J. Thongsri and M. Natenapit, Shape Effect on Weakly Nonlinear Elliptical Composites, Composites: Part B **43** 1252 (2012).

การเสนอผลงานวิชาการ

ระดับนานาชาติ

1. J. Thongsee and M. Natenapit, Effective Response of Nonlinear Elliptical Dielectric Composites, The Fourth Mathematics and Physical Sciences Graduate Congress, National University of Singapore, Singapore (17-19 December 2008): PB 01.
2. J. Thongsri and M. Natenapit, Effective Nonlinear Coefficients of Weakly Nonlinear Elliptical Dielectric Composites, The Fifth Mathematics and Physical Sciences Graduate Congress, Bangkok, Thailand (7-9 December 2009): PM 517.
3. J. Thongsri, Effective Nonlinear Susceptibility of Weakly Nonlinear Elliptical Composite, The First Asian Plus Three Graduate Congress, Chiangmai, Thailand (1-2 Mar 2012) ST-P 027.
4. J. Thongsri, Effect of Grain Size on Ferroelectric Films using Effective Medium Theory, Proc. Conf. Siam Physics Congress, (2013) 240-242.
5. J. Thongsri, Comparison of k - ϵ Turbulence Models for Predicting Airflow in 3.5-inch Dual Platter Hard Disk Drive, Int. Conf. Engineering, Applied Science, and Technology, (2013) 1-5.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับชาติ

1. J. Thongsee and M. Natenapit, "Bounds of Effective Nonlinear Coefficient of Strongly Nonlinear Spherical Dielectric Composites by Decoupling Technique," 4th National Symposium on Graduate Research, Lotus Hotel Pang Suan Kaew, Chiangmai (10-11 August 2004): O-ST-166.
2. J. Thongsee and M. Natenapit, Effective Nonlinear Coefficient of Strongly Nonlinear Spherical Dielectric Composites, 30th Congression Science and Technology of Thailand, Bangkok, Thailand (19-21 October 2004): D 008.
3. J. Thongsee and M. Natenapit, Effective Medium Theory of Strongly Nonlinear Spherical Dielectric Composites, The First Mathematics and Physical Sciences Graduate Congress, Bangkok, Thailand (6-8 December 2005): PB 04.
4. J. Thongsee and M. Natenapit, Effective Nonlinear Coefficients of Strongly Nonlinear Cylindrical Dielectric Composites by Decoupling Technique, Siam Physics Congress 2008, Khao Yai, Nakorn Ratchasima, Thailand (20-22 March 2008): PB 14.
5. J. Thongsri and M. Natenapit, Effective Nonlinear Response of Weakly Nonlinear Elliptical Dielectric Composites, Siam Physics Congress 2009, Cha-am, Petchaburi, Thailand (19-21 March 2009): CT-07.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้