การวัดค่าคงที่ฉนวนของผลึกเหลวนีมาติกบางชนิดที่ความถี่ต่าง ๆ ในสนามแม่เหล็ก

นาย ณสรรค์ ผลโภค

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

แผนกวิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2521

000756

I 15553881

MEASUREMENT OF DIELECTRIC CONSTANT OF SOME NEMATIC LIQUID CRYSTALS AT VARIOUS FREQUENCIES IN MAGNETIC FIELD

Mr. Nason Phonphok

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science

Department of Physics

Graduate School

Chulalongkorn University

1978

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวัดค่าคงที่ฉนวนของผลึกเหลวนีมาติกบางชนิดที่ความถี่ต่างๆ ในสนามแม่เหล็ก
โดย	นาย ณสรรค์ ผลโภค
แผนกวิชา	ฟิสิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.อนันตสิน เตชะกำพุช

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุประดิษฐ์ บุนนาค)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิจิตร เส็งหะพันธุ์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรพินท์ เผ่าวิบูล)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ไพฑูรย์ พีรานนท์)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.อนันตสิน เตชะกำพุช)

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวัดค่าคงที่ฉนวนของผลึก เหลวนีมาติกบางชนิดที่ความถี่ต่าง ๆ ในสนามแม่เหล็ก
ชื่อนิสิต	นาย ณสรรค์ ผลโภค
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร. อนันตสิน เตชะกำพุช
แผนกวิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2521

หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

ในการวิจัยได้วัดค่าคงที่ฉนวนของผลึก เหลวแบบนีมาติก ๒ ชนิด คือ เอ็มบีบีเอ และ อีบีบีเอ ที่อุณหภูมิห้อง และ 45°C ตามลำดับในช่วงความถี่ 8.5-11.5 MHz โดยได้ทำการวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ผิวของผลึก เหลว พบว่าค่าคงที่ฉนวน (κ_o) และไดอิเลคตริกลอส ($\tan \delta_o$) ของเอ็มบีบีเอ เท่ากับ 3.065 ± 0.051 และ 0.082 ± 0.011 ซึ่งค่าเหล่านี้เกือบไม่เปลี่ยนแปลงไปกับความถี่ของช่วงที่ทดลองในขอบเขตความคลาดเคลื่อนของการทดลอง สำหรับอีบีบีเอ มีค่า κ_o และ $\tan \delta_o$ เท่ากับ 2.622 ± 0.019 และ 0.095 ± 0.005

ในกรณีข้างบนไม่ได้ใส่ผลึก เหลวไว้ในสนามแม่เหล็ก ดังนั้นการเรียงตัวของโมเลกุลจึงเป็นไปตามธรรมชาติของมันเอง เมื่อใส่ผลึก เหลวไว้ในสนามแม่เหล็ก เพื่อให้โมเลกุลเรียงตัวกัน ปรากฏว่า ค่าคงที่ฉนวน ($\kappa_\perp$) และไดอิเลคตริกลอส ($\tan \delta_\perp$) ในทิศทางที่ตั้งฉากกับแกนของโมเลกุลของ เอ็มบีบีเอ เท่ากับ 3.035 ± 0.021 และ 0.088 ± 0.005 และในทิศทางที่ขนานกับแกนของโมเลกุล เอ็มบีบีเอ มี $\kappa_\parallel$ และ $\tan \delta_\parallel$ เท่ากับ 3.406 ± 0.036 และ 0.039 ± 0.002 สำหรับ อีบีบีเอ ก็มี $\kappa_\perp$ และ $\tan \delta_\perp$ เท่ากับ 2.556 ± 0.022 และ 0.107 ± 0.004 ส่วนค่า $\kappa_\parallel$ และ $\tan \delta_\parallel$ ของอีบีบีเอ เท่ากับ 2.989 ± 0.014 และ 0.028 ± 0.063 ตามลำดับ

ในกรณีทั้งสองเห็นได้ว่า $\kappa_{\parallel}$ มีค่ามากกว่า $\kappa_{\perp}$ และถึงแม้ว่าโมเลกุลของผลึกเหลวจะแสดงคุณสมบัติว่ามีไดโพลถาวรในช่วงความถี่ต่ำ แต่ในช่วงความถี่ไมโครเวฟที่ใช้ไม่ปรากฏคุณสมบัตินี้ให้เห็นเลย จากการที่ $\kappa_{\parallel}$ มากกว่า $\kappa_{\perp}$ นี้ทำให้สรุปได้ว่า ภายในโมเลกุลของผลึกเหลวมีโพลาไรเซชัน โดยสนามไฟฟ้าในแนวที่ขนานกับแกนโมเลกุลได้ดีกว่าในแนวตั้งฉาก และการที่ค่าคงที่ฉนวนในทิศทางทั้งสองต่างกันก็แสดงถึงอสมลักษณ์ ซึ่งก็เป็นคุณสมบัติของผลึกเหลว

Thesis Title	Measurement of Dielectric Constant of some Nematic Liquid Crystals at Various Frequencies in Magnetic Field.
Name	Mr. Nason Phonphok
Thesis Advisor	Dr. Anuntasin Tachagumpuch
Department	Physic
Academic Year	1978

ABSTRACT

The dielectric constants of two nematic liquid crystals, MBBA and EBBA, were measured at room temperature and 45°C respectively in the frequency range 8.5-11.5 GHz. The reflection coefficient of the microwave signal at the surface of liquid crystal was determined. The dielectric constant (κ_o) and the dielectric loss (tan δ_o) of MBBA were found to be 3.065 $\pm$ 0.051 and 0.082 $\pm$ 0.011, and there were no appreciable changes in these value at the attempted frequency range within the experimental error. The corresponding values of κ_o and tan δ_o of EBBA were 2.622 $\pm$ 0.019 and 0.095 $\pm$ 0.005.

In contrast to the above procedure where the liquid crystals were not subjected to any magnetic field, and hence the natural orientation of their molecules, a magnetic field of 3,000 gauss was applied in order to realign these molecules, the dielectric constant ($\kappa_\perp$) and dielectric loss (tan $\delta_\perp$) of MBBA in the direction perpendicular to the molecular axis were measused to be 3.035 $\pm$ 0.021 and 0.088 $\pm$ 0.005. Where as in the direction parallel to the molecular axis, $\kappa_{\parallel}$ and tan $\delta_{\parallel}$ for MBBA were 3.406 $\pm$ 0.036 and 0.039 $\pm$ 0.002. Similar procedure was applied to

the EBBA molecules yielded the values of $\kappa_{\perp}$ and tan $\delta_{\perp}$ as 2.556 $\pm$ 0.022 and 0.107 $\pm$ 0.004. For EBBA, $\kappa_{\parallel}$ and tan $\delta_{\parallel}$ were 2.989 $\pm$ 0.014 and 0.028 $\pm$ 0.603 respectively.

In these two cases, the values of $\kappa_{\parallel}$ were substantially larger than those of $\kappa_{\perp}$. Although a molecule of the liquid crystal exhibits permanent dipole property at low frequency region, at the applied microwave frequency the dipole property of the molecule as a whole becomes unobservalbe. As the orientation of the molecules were fixed under the subjected magnetic field, and also $\kappa_{\parallel}$ is larger than $\kappa_{\perp}$ a conclusion was drawn that the molecule of nematic liquid crystal can be polarized internally by electric field parallel wise to the long axis better than perpendicular wise. The difference in the values of the dielectric constants was concluded as due to the anisotropic character of liquid crystal.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ด้วยความอนุเคราะห์จากอาจารย์ ดร.อนันตสิน เตชะกำพุช ซึ่งให้คำปรึกษาและให้ความช่วยเหลือทุกด้านเป็นอย่างดียิ่ง และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิจิตร เส็งทะพันธ์ ที่ได้ช่วยแนะนำเทคนิคต่างๆที่ใช้ในการทดลอง ในระหว่างดำเนินการวิจัยได้มีเครื่องมือบางอย่างชำรุด ก็ได้รับความกรุณาจากโรงเรียนนายเรืออากาศ โดยเรืออากาศเอก รื่องศักดิ์ แก้วหาญ ที่ได้ให้ยืมเครื่องตรวจคลื่นสถิตย์มาใช้ทำการทดลองต่อไป นอกจากนี้ในขณะศึกษาทฤษฎี จำเป็นต้องอ่านวารสารภาษาเยอรมันก็ได้รับความกรุณาจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรพินท์ เผ่าวิบูล แผนกเคมี มหาวิทยาลัยมหิดล ได้ช่วยแปลให้ จึงขอขอบคุณท่านทั้งสี่เป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ และขอบคุณ คุณรังสรรค์ เฉลิมศรี นิสิตปริญญาโทแผนกฟิสิกส์ รุ่นปี 2519 ที่ได้ช่วยแนะนำการเขียนโปรแกรมให้เครื่องคอมพิวเตอร์ นอกจากนี้ยังได้รับความช่วยเหลือจากกองเครื่องมือและอุปกรณ์ ได้ให้ยืมออสซิลโลสโคป และให้ความสดวกในการใช้เครื่องมือ จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
รายการตารางประกอบ	ญ
รายการรูปประกอบ	ฐ
บทที่ 1 บทนำและทฤษฎีไดอิเลคตริก	1
1.1 บทนำ	1
1.2 การจำแนกผลึกเหลว	2
1.3 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสารฉนวน	3
1.4 การเขียนกราฟแบบโคล์-โคล์	8
1.5 ผลการทดลองที่ทำมาแล้วเกี่ยวกับการหาค่าคงที่ฉนวนของผลึกเหลว	13
บทที่ 2 ทฤษฎีเกี่ยวกับไมโครเวฟ	17
2.1 สมการของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่น	17
2.2 การสะท้อนของคลื่นจากผิวของสารไดอิเลคตริกที่อุดกลืนสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	22
2.3 การคำนวณค่าคงที่ฉนวน	28
บทที่ 3 การทดลอง	31
3.1 อุปกรณ์การทดลอง	31
3.1.1 เวฟมิเตอร์	31
3.1.2 แอทเทนูเอเตอร์	32
3.1.3 พลันเจอร์	32
3.1.4 เครื่องตรวจคลื่นสถิตย์	33

หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

หน้า

3.1.5 แมจิกที..... 34
3.1.6 ท่อสั้น..... 34
3.1.7 วงจรควบคุมอุณหภูมิ..... 35
ก. วงจรเรคติไฟเออร์และฟิลเตอร์..... 36
ข. วงจรเรกูเลเตอร์..... 36
ค. วงจรคอมมอนอีมิตเตอร์..... 36
ง. วงจรออสซิเลเตอร์และเอ้าพุททรานฟอร์เมอร์..... 37
จ. ไตรแอคและโหลด..... 38
3.2 การวัดค่าคงที่ฉนวน..... 38
3.2.1 การวัดความหนาของผลึกเหลว..... 38
3.2.2 การวัดค่าคงที่ฉนวนด้วยเครื่องตรวจคลื่นสถิตย์..... 41
3.2.3 การวัดค่าคงที่ฉนวนด้วยแมจิกที..... 43
3.3 การนำข้อมูลที่ได้ไปหาค่า β_2', β_2''..... 45
3.3.1 ข้อมูลที่ได้จากเครื่องตรวจคลื่นสถิตย์..... 45
3.3.2 ข้อมูลจากแมจิกที..... 46
3.4 การเขียนโปรแกรมให้เครื่องคอมพิวเตอร์..... 47
บทที่ 4 ผลการทดลอง..... 61
4.1 ผลจากการวัดด้วยเครื่องตรวจคลื่นสถิตย์..... 61
4.2 ผลการวัดด้วยแมจิกที..... 75
4.2.1 ผลการวัดผลึกเหลวแบบ MBBA ภายนอกสนามแม่เหล็ก..... 76
4.2.2 ผลการวัดผลึกเหลวแบบ MBBA เมื่อสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก..... 81
4.2.3 ผลการวัดผลึกเหลวแบบ MBBA เมื่อสนามไฟฟ้าขนานกับสนามแม่เหล็ก..... 86
4.2.4 ผลการวัดผลึกเหลวแบบ EBBA ภายนอกสนามแม่เหล็ก..... 92

4.2.5 ผลการวัดผลึกเหลวแบบ EBBA เมื่อสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก..... 96

4.2.6 ผลการวัดผลึกเหลวแบบ EBBA เมื่อสนามไฟฟ้าขนานกับสนามแม่เหล็ก..... 100

บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์..... 106

5.1 การสร้างท่อสั้น..... 106

5.2 การควบคุมอุณหภูมิ..... 106

5.3 ความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง..... 106

5.3.1 การวัดความหนาของผลึกเหลว..... 106

5.3.2 ความถี่ที่ใช้ในการทดลอง..... 107

5.3.3 ความแม่นยำของออสซิลโลสโคป..... 107

5.3.4 การจัดวางเครื่องมือ..... 107

5.4 การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง..... 107

เอกสารอ้างอิง..... 112

ประวัติผู้เขียน..... 114

รายการตารางประกอบ

ตารางที่ หน้า

3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและน้ำหนักของผลึกเหลว MBBA..... 39

4.1 ข้อมูลที่ได้จากการวัด MBBA ภายนอกสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 8.5 GHz..... 61

4.2 ข้อมูลที่ได้จากการวัด MBBA ภายนอกสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 9.0 GHz..... 62

4.3 ข้อมูลที่ได้จากการวัด MBBA ภายนอกสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 9.5 GHz..... 63

4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง β_2' , β_2'' ของผลึกเหลว MBBA ที่ความถี่ 9.0 GHz โดยใช้ tan θ 64

4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง β_2' , β_2'' ของผลึกเหลว MBBA ที่ความถี่ 9.0 GHz โดยใช้ tan θ 65

4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง d และ ρ เมื่อเปลี่ยนค่า β_2' , β_2'' 68

4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง β_2' , β_2'' ของผลึกเหลว MBBA ที่ความถี่ 8.5 GHz โดยใช้ tan θ 70

4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง β_2' และ β_2'' ของผลึกเหลว MBBA ที่ความถี่ 8.5 GHz โดยใช้ ρ 71

4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง β_2' และ β_2'' ของผลึกเหลว MBBA ที่ความถี่ 9.5 GHz โดยใช้ tan θ 72

4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง β_2' และ β_2'' ของผลึกเหลว MBBA ที่ความถี่ 9.5 GHz โดยใช้ ρ..... 73

4.11 ผลการวัดค่าคงที่ฉนวนของผลึกเหลว MBBA ที่ความถี่ต่าง ๆ โดยใช้เครื่องตรวจคลื่นสถิตย์..... 75

ตารางที่ หน้า

4.12 ข้อมูลการวัด MBBA ภายนอกสนามแม่เหล็กด้วยแมจิกที ที่ความถี่ต่าง ๆ..... 77

4.13 ค่า β_2' , β_2'' ของคลื่นไมโครเวฟใน MBBA ภายนอกสนามแม่เหล็กที่ความถี่ต่าง ๆ..... 78

4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง β_2' , β_2'' และ SD ของ MBBA ภายนอกสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 11.5 GH_z..... 78

4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง ρ และ d ของ MBBA ภายนอกสนามแม่เหล็กที่ความถี่ต่าง ๆ..... 79

4.16 ค่าคงที่ฉนวนและไดอิเลคตริกลอสของ MBBA ภายนอกสนามแม่เหล็กที่ความถี่ต่าง ๆ..... 81

4.17 ข้อมูลการวัด MBBA เมื่อสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กด้วยแมจิกที..... 82

4.18 ค่า β_2' , β_2'' ของคลื่นไมโครเวฟใน MBBA เมื่อสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กที่ความถี่ต่าง ๆ..... 84

4.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง d และ ρ ของ MBBA เมื่อสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กที่ความถี่ต่าง ๆ..... 84

4.20 ค่าคงที่ฉนวนและไดอิเลคตริกลอสของ MBBA เมื่อสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กที่ความถี่ต่าง ๆ..... 85

4.21 ข้อมูลการวัด MBBA เมื่อสนามไฟฟ้าขนานกับสนามแม่เหล็กด้วยแมจิกทีที่ความถี่ต่าง ๆ..... 86

4.22 ค่า β_2' , β_2'' ของคลื่นไมโครเวฟใน MBBA เมื่อสนามไฟฟ้าขนานกับสนามแม่เหล็กที่ความถี่ต่าง ๆ..... 87

4.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง d กับ ρ ของ MBBA เมื่อสนามไฟฟ้าขนานกับสนามแม่เหล็กที่ความถี่ต่าง ๆ..... 87

ตารางที่ หน้า

4.24 ค่าคงที่ฉนวนและไดอิเลคตริกลอสของ MBBA เมื่อสนามไฟฟ้าขนานกับสนามแม่เหล็กที่ความถี่ต่าง ๆ..... 89

4.25 ข้อมูลการวัด MBBA ภายนอกสนามแม่เหล็กด้วยแมจิกทีที่ความถี่ต่าง ๆ..... 92

4.26 ค่า β_2' , β_2'' ของคลื่นไมโครเวฟใน EBBA ภายนอกสนามแม่เหล็กที่ความถี่ต่าง ๆ..... 93

4.27 ความสัมพันธ์ระหว่าง ρ และ d ของ EBBA ภายนอกสนามแม่เหล็กที่ความถี่ต่าง ๆ..... 93

4.28 ค่าคงที่ฉนวนและไดอิเลคตริกลอสของ EBBA ภายนอกสนามแม่เหล็กที่ความถี่ต่าง ๆ..... 95

4.29 ข้อมูลการวัด EBBA เมื่อสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กด้วยแมจิกทีที่ความถี่ต่าง ๆ..... 96

4.30 ค่า β_2' , β_2'' ของคลื่นไมโครเวฟใน EBBA เมื่อสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กที่ความถี่ต่าง ๆ..... 97

4.31 ความสัมพันธ์ระหว่าง d และ ρ ของ EBBA เมื่อสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กที่ความถี่ต่าง ๆ..... 97

4.32 ค่าคงที่ฉนวนและไดอิเลคตริกลอสของ EBBA เมื่อสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กที่ความถี่ต่าง ๆ..... 99

4.33 ข้อมูลการวัด EBBA เมื่อสนามไฟฟ้าขนานกับสนามแม่เหล็กด้วยแมจิกทีที่ความถี่ต่าง ๆ..... 100

4.34 ค่า β_2' , β_2'' ของไมโครเวฟใน EBBA เมื่อสนามไฟฟ้าขนานกับสนามแม่เหล็กที่ความถี่ต่าง ๆ..... 101

4.35 ความสัมพันธ์ระหว่าง d และ ρ ของ EBBA เมื่อสนามไฟฟ้าขนานกับสนามแม่เหล็กที่ความถี่ต่าง ๆ..... 101

4.36 ค่าคงที่ฉนวนของ EBBA เมื่อสนามไฟฟ้าขนานกับสนามแม่เหล็กที่ความถี่ต่าง ๆ.....

รายการรูปประกอบ

รูปที่		หน้า
1.1	การเรียงตัวของโมเลกุลของผลึกเหลว ก.แบบสเมคติก ข.แบบนีมาติก	2
1.2	การเรียงตัวของผลึกเหลวแบบคอเลสเตอร์ลิก	3
1.3	กราฟระหว่าง ε' และ ε'' ตามสมการของเดอร์บาย	9
1.4	กราฟระหว่าง ε' และ ε'' แบบโคล์-โคล์	11
1.5	กราฟระหว่างค่าคงที่ฉนวนกับอุณหภูมิ ก.ของผลึกเหลว para-Azoxzvanisoleและของผลึกเหลว para-Azoxyphenetole	13
1.6	ค่าไดอิเลกตริกลอส ก.ของ para-Azyoxyanisole และ ข. para-Azoxyphenetole	14
1.7	การหมุนรอบตัวเองของโมเลกุลของผลึกเหลว ก.รอบแกนยาว ข.รอบแกนสั้น	15
1.8	กราฟระหว่างค่าคงที่ฉนวนเมื่อสนามไฟฟ้าขนานกับแกนยาวของโมเลกุล ที่ความถี่ 0.1-1.0 MHz ที่อุณหภูมิ 22.75°c	15
2.1	ท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยม	19
2.2	การสะท้อนของไมโครเวฟที่ผิวของสารไดอิเลกตริกที่ดูดกลืนสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	22
2.3	แสดงตำแหน่งต่างๆที่มีความเข้มสนามไฟฟ้ามากที่สุด	27
3.1	เวฟมิเตอร์	31
3.2	แอทเทนูเอเตอร์	32
3.3	พลันเจอร์	33
3.4	เครื่องตรวจคลื่นสถิตย์	33
3.5	แมจิกที	34

รูปที่		หน้า
3.6	ท่อสั้น	35
3.7	วงจรควบคุมอุณหภูมิ	35
3.8	วงจรเรคติไฟเออร์และฟิลเตอร์	36
3.9	วงจรเรคกูเลเตอร์	36
3.10	วงจรคอมมอนอีมิตเตอร์	36
3.11	วงจรออสซิเลเตอร์และเอ้าพุททรานฟอร์เมอร์	37
3.12	ไตรแอคและโหลด	38
3.13	ก.ความลึกของท่อสั้นเปล่า ข.ความลึกจากปากท่อถึงผิวผลึกเหลว	39
3.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและความหนาของผลึกเหลว	40
3.15	การวัดค่าคงที่ฉนวนด้วยเครื่องตรวจคลื่นสถิตย์	41
3.16	แสดงตำแหน่งต่าง ๆ ที่ความเข้มสนามไฟฟ้ามากที่สุดในห่อนำคลื่น การจัดเครื่องมือเมื่อวัดโดยใช้แมจิกที	42
4.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง β_2' , β_2'' โดยใช้สมการของ tan θ และ ρ ที่ความถี่ 9.0 GHz	67
4.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง d และ ρ เมื่อ β_2' , β_2'' เปลี่ยนไป	69
4.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง β_2' , β_2'' โดยใช้สมการของ tan θ และ ρ ที่ความถี่ 8.5 GHz และ 9.5 GHz	74
4.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง d และ ρ ของ MBBA ภายนอกสนามแม่เหล็กที่ 8.5 GHz เมื่อ $\beta_2' = 2.8387\ cm^{-1}$ $\beta_2'' = 0.1529\ cm^{-1}$ เทียบกับผลการทดลอง	80
4.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง d และ ρ ของ MBBA เมื่อสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กที่ 8.5 GHz เมื่อ $\beta_2' = 2.7977\ cm^{-1}$, $\beta_2'' = 0.1621\ cm^{-1}$ เทียบกับผลการทดลอง	83

รูปที่ หน้า

4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง d และ ρ ของ MBBA เมื่อ สนามไฟฟ้าขนานกับสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 8.5 GH_z เมื่อ $\beta_2' = 3.0655\ cm^{-1}$, $\beta_2'' = 0.0708\ cm^{-1}$ เทียบกับผลการทดลอง..... 88

4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ฉนวนของ MBBA กับความถี่ต่าง ๆ..... 90

4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าไดอิเลคตริกลอสของ MBBA กับความถี่ต่าง ๆ 91

4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง d และ ρ ของ EBBA ภายนอกสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 8.5 GH_z เมื่อ $\beta_2' = 2.562\ cm^{-1}$ $\beta_2'' = 2.567\ cm^{-1}$ เทียบกับผลการทดลอง..... 94

4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง d และ ρ ของ EBBA เมื่อ สนามไฟฟ้าตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 8.5 GH_z โดย $\beta_2' = 2.5180\ cm^{-1}$, $\beta_2'' = 0.1781\ cm^{-1}$ เทียบกับผลการทดลอง.....

4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง d และ ของ EBBA เมื่อ สนามไฟฟ้าขนานกับสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 8.5 GH_z เมื่อ $\beta_2' = 2.7418\ cm^{-1}$, $\beta_2'' = 0.0441\ cm^{-1}$ เทียบกับผลการทดลอง..... 102

4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ฉนวนของ EBBA กับความถี่ต่าง ๆ..... 103

4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างไดอิเลคตริกลอส EBBA กับความถี่ต่าง ๆ 104

รูปที่ หน้า

5.1 แสดงแรงดึงผิวของผลึกเหลวในท่อน้ำคลื่น..... 107

5.2 โครงสร้างโมเลกุลของ..... 109

5.3 การเรียงตัวของโมเลกุลภายนอกและภายในสนามแม่เหล็ก..... 110