

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องวัดความหนาของฟิล์มบาง



เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... **62307**

วัน,เดือน,ปี - 8 ส.ค. 2549

b. 116 20122
i.

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา พ.ศ. 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thin Film Thickness Monitor



A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of

Bachelor of Science

Department of Applied Physics

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Academic Year 2005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง เครื่องวัดความหนาของฟิล์มบาง

นักศึกษา นายสุรชาติ เมืองอ่ำ
นายอภิชาติ ศรีสุวรรณศักดิ์

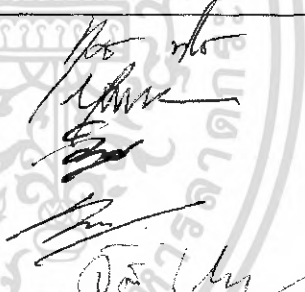
ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์

สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษา อ.เบญจพล ตันอู๋

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รศ.ดร.จิติ หนูแก้ว

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ อ.ทศยาภรณ์ ทิววงศ์	
กรรมการ อ.กวางปัญญา สุวรรณสุโข	
กรรมการ อ.วิฑูรย์ ยินดีสุข	
กรรมการที่ปรึกษา อ.เบญจพล ตันอู๋	
กรรมการที่ปรึกษาร่วม รศ.ดร.จิติ หนูแก้ว	



(รองศาสตราจารย์ วิชาญ เตชิตีระ)

หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษ เรื่อง เครื่องวัดความหนาฟิล์มบาง

นักศึกษา นาย สุรชาติ เมืองอ่ำ
นาย อภิชาติ ศรีสุวรรณศักดิ์

ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สาขา ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา 2548
อาจารย์ที่ปรึกษา อ.เบญจพล คັນธุ์
อาจารย์ปรึกษาร่วม รศ.ดร.จิตติ หนูแก้ว

บทคัดย่อ

เครื่องวัดความหนาของฟิล์มบางนี้จะใช้วัดฟิล์มบางที่ปลูกด้วยวิธีการระเหยสารในระบบสุญญากาศ โดยสารที่ถูกระเหยจะไปเกาะอยู่บนฐานรองและคริสตอลที่วางอยู่ในระบบเกิดเป็นชั้นฟิล์มบางขึ้น อาศัยสมบัติการสั่นของคริสตอล เมื่อมีสารใดๆ มาเกาะที่เนื้อคริสตอลจะทำให้ความถี่ของการสั่นมีค่าเปลี่ยนไป และความถี่ที่เปลี่ยนไปนี้สามารถนำมาคำนวณเพื่อหาความหนาของชั้นฟิล์มบางได้

ทำให้สามารถวัดความหนาของชั้นฟิล์มบางได้ขณะที่กำลังปลูกสารอยู่ ส่งผลให้สามารถควบคุมความหนาของฟิล์มบางที่กำลังปลูกได้ตามต้องการ ซึ่งความละเอียดของเครื่องวัดความหนาของฟิล์มบางนั้นอยู่ที่ 1 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title Thin film thickness monitor

Name Mr.Surachart Muangaum
Mr.Apichart Srisuwunsakda

Department Applied Physics **Faculty of Science**

Program Applied Physics

Academic Year 2005

Special Project Advisor Mr.Benchapol Tunhoo

Special Project co-advisor Associate Professor Dr.Jiti Nukeaw.

ABSTRACT

Thin film thickness monitor used to measure thin film that growth by evaporate substance in vacuum system method in this method substance evaporated to stick on substrate and crystal, which place in growth film system, will from thin film layer. So property of crystal that constant period of oscillate so thickness of thin film can calculate by know frequency of crystal.

The thickness of thin film that uses crystal to measure thickness can measure in situ. Resolution of thin film thickness monitor is 1 nanometer.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีเนื่องจากความช่วยเหลือของหลายฝ่าย คอยให้คำปรึกษา ช่วยเหลือ ตลอดจนกำลังใจและคำแนะนำต่างๆซึ่งเป็นผลทำให้คณะผู้จัดทำมีความประทับใจ และอยากจะขอขอบพระคุณบุคคลต่างๆดังนี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์เบญจพล ต้นธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาและ รศ.ดร.จิตติ หนูแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ซึ่งเสียสละเวลาอันมีค่ากับโครงการพิเศษนี้ กรุณาให้คำแนะนำ ซึ่งแจ้งข้อบกพร่อง ดูแลเอาใจใส่ ตรวจสอบแก้ไขจนโครงการนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ อาจารย์หุติยาภรณ์ ทิววงศ์, อาจารย์กมลปัญญา สุวรรณสุขุโข และ อาจารย์วิฑูรย์ ยินดีสุข อาจารย์คณะกรรมการที่กรุณาตรวจสอบข้อบกพร่อง ซึ่งแจ้งแนวทางที่ถูกต้องในโครงการพิเศษฉบับนี้

ขอขอบพระคุณคณะอาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ทุกท่านที่กรุณาให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการ ตลอดจนความช่วยเหลือทางด้านต่างๆ

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกและแนะนำการใช้เครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ปฏิบัติในโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณ เรืออากาศเอกคอน คล้ายทับทิม และห้องปฏิบัติการวิจัยควอนตัมและสารกึ่งตัวนำทางแสง ที่กรุณาอนุเคราะห์เครื่องมือปลูกฟิล์มบาง

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่คอยช่วยเหลือ เป็นกำลังใจ จนงานสำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ช่วยดูแลเอาใจใส่และคอยเป็นกำลังใจที่ดีที่สุดในยามเหน็ดเหนื่อยและท้อแท้

นอกจากนี้ขอขอบพระคุณอีกหลายท่านที่ไม่ได้กล่าวถึงไว้ ณ ที่นี้ ที่มีส่วนช่วยเหลือให้โครงการนี้ไปถึงจุดหมายได้อย่างสมบูรณ์

นายสุรชาติ เมืองอ่ำ

นายอภิชาติ ศรีสุวรรณศักดิ์ดา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูปภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	3
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	5
2.1 คิวทซ์คริสตอล	5
2.2 คิวทซ์คริสตอลไมโครบาลานท์	17
2.3 หลักการทำงานของเครื่องวัดความหนาของฟิล์มบาง	21
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	23
3.1 ขั้นตอนการออกแบบระบบฮาร์ดแวร์	23
3.2 การทดสอบการทำงานของฮาร์ดแวร์	32
3.3 ขั้นตอนการออกแบบซอฟต์แวร์	33
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	36
4.1 วิธีการทดลอง	36
4.2 ผลการทดลอง	40
4.3 อภิปรายผลการทดลอง	44
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	45
5.1 สรุปผลการทดลอง	45
5.2 ข้อเสนอแนะ	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เอกสารอ้างอิง	หน้า
	47
ภาคผนวก	48



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แสดงขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	3
ตารางที่ 3.1 Multiplexed Input Function	31
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองครั้งที่ 1	40
ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองครั้งที่ 2	41
ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองครั้งที่ 3	42
ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองครั้งที่ 4	43



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 แผนผังแสดงระบบเครื่องวัดความหนาของฟิล์มบาง	1
รูปที่ 2.1 แสดงความถี่ที่เปลี่ยนไปเป็นหนึ่งในส่วนต่อปี	7
รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะของความถี่เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของ AT-Cut ที่ตัดที่มุมต่างๆ	7
รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะการตัดในมุมต่างๆ	8
รูปที่ 2.4 แสดงรูปแบบของการสั่นในแบบต่างๆ	9
รูปที่ 2.5 แสดงการตอบสนองของความถี่เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของการตัดแบบต่างๆ	9
รูปที่ 2.6 แสดงการตัดผลึกควอตซ์เป็นเวเฟอร์ในมุมต่างๆ	10
รูปที่ 2.7 แสดงวงจรสมมูลทั่วไปของคริสตอล	11
รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะของความถี่เมื่อต่อตัวเก็บประจุในแบบอนุกรมและขนาน	13
รูปที่ 2.9 แสดงการต่อ C_L ขนานกับคริสตอลที่พิจารณาเป็นวงจรสมมูล	13
รูปที่ 2.10 แสดงการต่อตัวเก็บประจุค่าต่างๆ ที่มีผลต่อ Sensitivity	15
รูปที่ 2.11 แสดงวงจรที่ใช้ทดสอบคริสตอลตามมาตรฐาน DIN 45105	17
รูปที่ 2.12 แสดงรูประบบควอตซ์คริสตอลไมโครบาลานซ์	18
รูปที่ 2.13 แสดงภาพภาคตัดขวางของควอตซ์คริสตอลที่ใช้ตรวจจับมวล	19
รูปที่ 2.14 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความถี่เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป	20
รูปที่ 2.15 แสดงความหนาที่วัดได้จากควอตซ์คริสตอลเทียบกับความหนาที่เกิดขึ้นจริง	21
รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรม (Block Diagram) การทำงานของเครื่องวัดความหนาของฟิล์มบาง	23
รูปที่ 3.2 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ AT89C51ED2	25
รูปที่ 3.3 วงจรนับความถี่ (Frequency Counter)	26
รูปที่ 3.4 Flowchart การรับค่า BCD และการสแกนหลักของวงจรมับความถี่	28
รูปที่ 3.5 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AT89C51ED2	30
รูปที่ 3.6 บอร์ดวงจรมับความถี่ (Frequency Counter)	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.7 แสดง โปรแกรม Flip Loader	32
รูปที่ 3.8 การแสดงผลทาง 7-Segment ของวงจรมัลติไมเตอร์	33
รูปที่ 3.9 Flowchart การทำงานของ โปรแกรม	34
รูปที่ 4.1 แสดงเครื่องวัดความหนาของฟิล์มบาง	37
รูปที่ 4.2 แสดงระบบที่ใช้ในการทดสอบ	37
รูปที่ 4.3 แสดงเครื่องวัดความหนาของฟิล์มบางกับระบบปลูกฟิล์ม	38



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

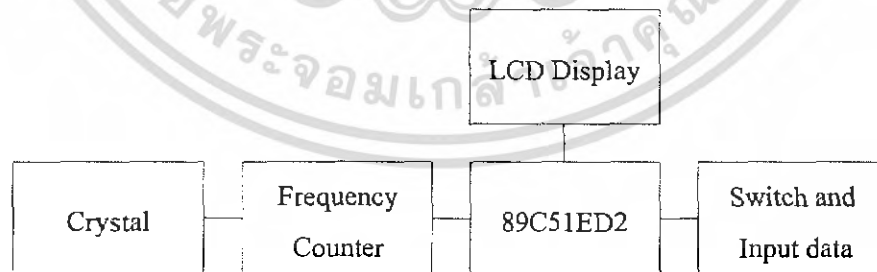
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

ในปัจจุบันฟิล์มบางได้เข้ามามีบทบาทในวงการอิเล็กทรอนิกส์เป็นอย่างมาก สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำหลายชนิดใช้วิธีการปลูกฟิล์มบางหลายชั้นขึ้นเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็กและรวมไปถึงการนำเทคนิคการปลูกฟิล์มบางมาประยุกต์ใช้ในการสร้างชิ้นงานต่างๆ ขึ้นมา ซึ่งหนึ่งในตัวแปรสำคัญของการปลูกฟิล์มบางก็คือ ความหนาของชั้นฟิล์ม เพราะฉะนั้นการควบคุมความหนาของชั้นฟิล์มบางจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในการปลูกฟิล์มบาง

เนื่องจากมีความจำเป็นต้องทราบว่าฟิล์มบางที่ปลูกนั้นมีความหนาเท่าไร จึงได้คิดประดิษฐ์เครื่องวัดความหนาของฟิล์มบางขึ้น ซึ่งฟิล์มบางที่จะวัดนั้นเป็นฟิล์มบางที่ปลูกด้วยวิธีการระเหยสารในระบบสุญญากาศ โดยในการปลูกฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสารนั้น สารที่ถูกระเหยจะไปเกาะอยู่บนฐานรองเกิดเป็นชั้นฟิล์มบางขึ้น ด้วยเหตุนี้ เราจึงอาศัยสมบัติของคริสตอล (Crystal) ที่ต้นเป็นคาบที่คงที่แน่นอนเข้ามาใช้ในการวัดความหนาของฟิล์มบาง เพราะเมื่อมีสารใดๆ มาเกาะที่เนื้อคริสตอลจะทำให้ความถี่ของการสั่นมีค่าเปลี่ยนไป และความถี่ที่เปลี่ยนไปนี้สามารถนำมาเปรียบเทียบเพื่อหาเป็นความหนาของชั้นฟิล์มบางได้ และที่สำคัญการใช้คริสตอลในการวัด ทำให้เราสามารถวัดความหนาของชั้นฟิล์มบางได้ขณะที่กำลังปลูกอยู่ เพื่อควบคุมความหนาของชั้นฟิล์มให้ได้ตามที่ต้องการ



รูปที่ 1.1 แผนผังแสดงระบบเครื่องวัดความหนาของฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์

1. สามารถนำเอาคุณสมบัติเฉพาะตัวของคริสตอล มาประยุกต์ใช้ในการวัดความหนาของฟิล์มบาง และสร้างออกมาเป็นเครื่องมือที่ใช้งานได้จริง
2. นำความรู้ในด้านไมโครคอนโทรลเลอร์มาประมวลผลการวัดความหนาของฟิล์มบาง และแสดงผลออกมาได้อย่างแม่นยำ
3. เพื่อศึกษาและทดลองวิธีการปลูกฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารในระบบสุญญากาศ ตลอดจนศึกษาการกระจายความหนาของฟิล์มบาง

1.3 ขอบเขตการศึกษา

ขอบเขตการศึกษาของโครงการนี้สามารถแบ่งออกเป็นส่วนๆ ได้ ดังนี้

1. ส่วนทฤษฎี จะเป็นการศึกษาวิธีการปลูกฟิล์มบางด้วยการระเหยสาร ซึ่งสิ่งที่เราต้องศึกษา ได้แก่ การกระจายความหนาของฟิล์มบางตามสมมติฐานของจูดระเหย ซึ่งมีตัวแปรที่ต้องศึกษา ได้แก่ Evaporation rate, Free evaporation and Effusion, Directionality of Evaporation molecules, การกระจายความหนาของมวลในระยะต่างๆ, Small - area source และทฤษฎีที่สำคัญอีกตัวหนึ่ง ก็คือ การศึกษาสมบัติเฉพาะตัวของคริสตอล และตัวแปรใดๆ ก็ตามที่ทำให้คริสตอลมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ของการสั่น ซึ่งในแต่ละส่วนของทฤษฎีนี้ก็จะทำให้เห็นถึงความสำคัญของตัวแปรแต่ละตัวที่มีผลต่อการปลูกฟิล์มบาง และวัดความหนาของฟิล์มบาง

2. ส่วนของเทคนิคการวัด เราใช้คริสตอลเป็นตัวตรวจหาความหนาของชั้นฟิล์มบาง โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงความถี่การสั่นของคริสตอลเมื่อมีสารใดๆ มาเกาะที่เนื้อคริสตอล ซึ่งในการประมวลผลเราจะใช้ 89CS1ED2 ทำหน้าที่คำนวณค่าความหนาของฟิล์มบางจากความถี่การสั่นของคริสตอลที่เปลี่ยนไป โดยซอฟต์แวร์ที่เราจะใช้ในการเขียนโปรแกรมนั้นจะเป็นภาษาซีที่คอมไพเลอร์ด้วย Keil เนื่องจากภาษาซีนั้น เป็นภาษาที่มีโครงสร้างเขียนเข้าใจง่าย และมีการทำงานที่รวดเร็ว

3. ส่วนของผลและการสรุป จะเป็นส่วนที่รวบรวมผลการทดลองและข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการสร้างเครื่องวัดความหนาของฟิล์มบาง เพื่อนำมาสรุปผลกับ โครงการพิเศษชิ้นนี้

1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	2548						
	ม.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ค.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
1.ศึกษาทฤษฎีและหลักการ							
2.ศึกษาแนวโน้มและความเป็นไปได้ในการทดลอง							
3.ทำการทดลอง							
4.ศึกษาและวิเคราะห์ผลการทดลอง							
5.สรุปผลและสิ่งที่ได้จากการทดลอง							
6.จัดทำเอกสารประกอบโครงการ							

ตารางที่ 1.1 แสดงขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ผลที่คาดว่าจะได้รับคือ เครื่องวัดความหนาของฟิล์มบางที่อุปกรณ์ต่างๆ ที่ประกอบเป็นตัวเครื่องขึ้นมา นั้น มีราคาไม่สูงมากนักแต่มีความแม่นยำในการวัด คุณแลร์รักษาได้โดยง่ายด้วยกะโหล่และอุปกรณ์ต่างๆ สามารถหาซื้อได้ในประเทศไทย เมื่อเทียบกับเครื่องของต่างประเทศที่มีราคาสูงมาก และเป็นการยากที่จะซ่อมแซมเองหากเครื่องเกิดไม่ทำงานหรืออะไหล่บางชิ้นอาจต้องสั่งจากต่างประเทศทำให้เสียเวลารอคอย

สามารถนำความรู้ที่เรียนมา รู้จัก ปรับปรุง แก้ไข ประยุกต์ใช้ในการทำงาน การแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างทำงาน และนำประสบการณ์ที่ได้ในการทำโครงการพิเศษนี้ไปประยุกต์ใช้ในชีวิตการทำงานจริงๆ ค่อยไปในภายภาคหน้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องใน โครงงานพิเศษนี้ประกอบด้วย ควอทซ์คริสตอล, ควอทซ์คริสตอลไม่โครบาลานท์ และหลักการทำงานของเครื่องวัดความหนาของฟิล์มบาง

2.1 ควอทซ์คริสตอล

มีสูตรทางเคมีเป็น SiO_2 ประกอบไปด้วยธาตุ 2 ชนิด คือ ซิลิกอนและออกซิเจน เป็นผลึกแบบออร์โทโรอมบิก พบมากในหินและทราย มีอยู่มากมายในธรรมชาติ แต่ในการนำมาใช้ต้องทำให้บริสุทธิ์โดยผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์เสียก่อน ทำให้ผลิตได้น้อย

การที่ผลิตได้จำกัดและควอทซ์ธรรมชาติมีราคาแพง เป็นผลให้เกิดการพัฒนาอุตสาหกรรมการสังเคราะห์ควอทซ์ การสังเคราะห์ควอทซ์จะทำใน Vertical autoclaves ซึ่ง autoclaves ทำงานโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มากถึง 400 องศาเซลเซียส ที่ความดันมากกว่า 1000 บรรยากาศ เม็ดผลึกจะถูกใส่เข้ามาทางแชนเบอร์ด้านบนของ autoclave และควอทซ์ธรรมชาติ จะถูกใส่เข้ามาทางแชนเบอร์ด้านล่าง จากนั้นสารละลายอัลคาไลน์จะถูกนำมาใช้เมื่อความร้อนเพิ่มความดันในแชนเบอร์ ตัวทำความร้อนของ autoclave จะทำความร้อนที่อุณหภูมิที่ด้านบนของแชนเบอร์และอุณหภูมิสูงที่ด้านล่างของแชนเบอร์ ดังนั้นจึงเกิดเป็นเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ ซึ่งจะทำการแปลงสารละลายอัลคาไลน์ ซึ่งจะไปละลายควอทซ์ธรรมชาติที่ตอนล่างของแชนเบอร์ และไปติดบนเม็ดผลึกที่ด้านบน อัลฟาคริสตอลผลิตได้โดยกระบวนการนี้สามารถจะมีมวลหลายร้อยกรัม ซึ่งสามารถปลูกโดยใช้เวลา 2-3 สัปดาห์ ถ้าอุณหภูมิสูงถึง 573 องศาเซลเซียส จะเกิดการเปลี่ยนเฟส ซึ่งจะทำให้ควอทซ์เปลี่ยนรูปจากอัลฟาเป็นเบต้า ทำให้สูญเสียสมบัติความเป็นเปียโซอิเล็กทริก

ควอทซ์คริสตอลเป็นอุปกรณ์ที่จะขาดไม่ได้สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สมัยใหม่ ซึ่งใช้ในการให้กำเนิดความถี่ เพื่อที่จะใช้ในการจัดการและควบคุมระบบการสื่อสารทุกชนิด ใช้มากในนาฬิกา, คอมพิวเตอร์ และไมโครโปรเซสเซอร์ ควอทซ์คริสตอล จะทำให้เกิดปรากฏการณ์เปียโซอิเล็กทริกซิตี ซึ่งถูกค้นพบโดยพี่น้องตระกูลคูรีในฝรั่งเศส เมื่อปี 1880

2.1.1 การทำงานของควอทซ์

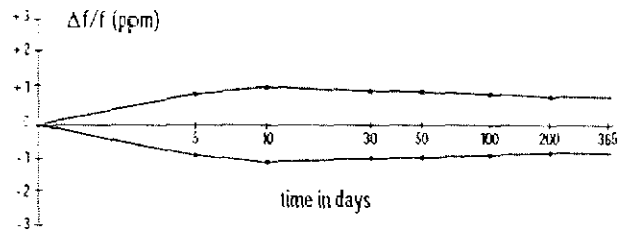
เปียโซอิเล็กทริกซิติ์ เกี่ยวข้องกับทั้งไฟฟ้าและกลศาสตร์ คำว่า เปียโซอิเล็กทริกซิติ์ มาจากภาษากรีก ซึ่งมีความหมายว่า ความดันและไฟฟ้า ซึ่งแน่นอนว่าวัสดุที่เป็นเปียโซอิเล็กทริกจะมีการตอบสนองต่อความเครียดเชิงกล โดยการผลิตประจุไฟฟ้า ในเปียโซอิเล็กทริกความเค้นในระดับปานกลางหรือการกระจัดจะมีความเป็นเชิงเส้นทั้งความเครียดและสนาม ในทางตรงกันข้ามความเค้นเชิงกลเกิดในคริสตอลเนื่องจากโพลาริซชันสนามไฟฟ้า นี่เป็นหลักการง่ายๆ ในการอธิบายการสั่นของคริสตอล

2.1.2 ควอทซ์เรโซแนนซ์

ควอทซ์เรโซแนนซ์ประกอบด้วยชิ้นส่วนของวัสดุเปียโซอิเล็กทริกที่มีความแม่นยำในมิติและการจัดเรียงตัวที่มีความสัมพันธ์กับแกนของโครงผลึกคริสตอล ในเวเฟอร์จะมีขั้วไฟฟ้าค้ำนำหนึ่งหรือสองคู่ซึ่งสร้างโดยกระบวนการระเหยสารในสุญญากาศ เมื่อสนามไฟฟ้าถูกให้ระหว่างขั้วไฟฟ้าก็จะเกิดเปียโซอิเล็กทริกขึ้นในเวเฟอร์ ทำให้เกิดการสั่นเชิงกล มีวัสดุหลายชนิดที่แตกต่างกันที่ถูกนำมาทดลองเป็นตัวให้ความถี่เรโซแนนซ์ แต่ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาควอทซ์เป็นวัสดุที่น่าพึงพอใจในระดับหนึ่ง ซึ่งให้ค่าเน็คความถี่ที่แม่นยำเมื่อเทียบกับตัวกำเนิดความถี่ตัวอื่น เช่น วงจร LC , ตัวให้ความถี่เรโซแนนซ์เชิงกลเซรามิก และวัสดุผลึกเดี่ยว ควอทซ์ได้รวมเอาสมบัติต่างๆ ที่เป็นข้อดี ได้แก่ มีความเสถียรสูงมากและมีคาบที่แน่นอน การสูญเสียแบบอะคูสติกหรือการสูญเสียภายในของควอทซ์มีค่าน้อยมากเป็นผลให้ควอทซ์มีความถี่เรโซแนนซ์ที่มี Q - factor สูง ควอทซ์บริสุทธิ์จะมีค่า Q เท่ากับ 10^3 ที่ 1 MHz ซึ่งปกติ Q - factor ของตัวให้ความถี่เรโซแนนซ์ชนิดอื่นจะมีค่าอยู่ในช่วงหนึ่งหมื่นถึงหลายแสน ซึ่งจะเห็นได้ว่าควอทซ์นั้นมีค่า Q - factor ดีกว่าวงจร LC มาก และคุณสมบัติสำคัญอย่างที่สอง คือ ความถี่จะไม่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

2.1.3 ความเสถียรของควอทซ์

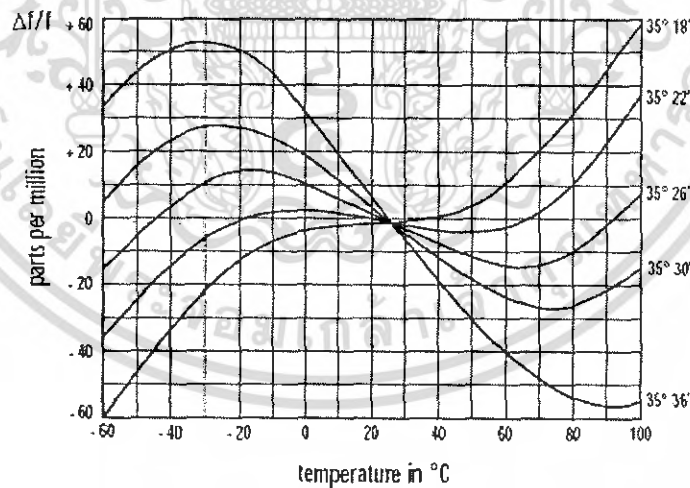
ตัวให้ความถี่เรโซแนนซ์จะมีความสัมพันธ์กับความเสถียรขององค์ประกอบเชิงกล ควอทซ์มีความเสถียรทั้งในระยะสั้นและระยะยาว ซึ่งแสดงให้เห็นจากความถี่ที่เปลี่ยนไปเป็นหนึ่งในส่วนต่อปี ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งพบได้ในอุปกรณ์ต่างๆ ไปที่วางจำหน่ายอยู่ ส่วนคริสตอลที่มีความแม่นยำมากๆ จะถูกผลิตภายใต้เงื่อนไขการควบคุมอย่างเข้มงวด ซึ่งจะมีความเสถียรในระดับนาฬิกาอะตอม



รูปที่ 2.1 แสดงความถี่ที่เปลี่ยนไปเป็นหนึ่งในส่วนต่อปี

2.1.4 ความสำคัญของควอทซ์

ลักษณะของ AT-Cut ส่วนใหญ่จะถูกใช้ในตัวให้ความถี่เรโซแนนซ์ เพราะมันมีสัมประสิทธิ์ความถี่อุณหภูมิที่อธิบายโดยฟังก์ชันลูกบาศก์ของอุณหภูมิ ซึ่งสามารถควบคุมให้แม่นยำได้โดยการเปลี่ยนมุมการตัดน้อยๆ พฤติกรรมของลูกบาศก์ชนิดนี้จะแตกต่างกับคริสตอลที่ตัดแบบอื่นๆ ซึ่งจะให้ลักษณะของกราฟพาราโบลา ทำให้ AT - Cut เหมาะสมกับอุปกรณ์ที่ต้องการความถี่ที่เสถียรโดยไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ ลักษณะสำคัญอย่างอื่น ได้แก่ อายุ และปริมาณ Q - factor



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะของความถี่เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของ AT-Cut ที่ตัดที่มุมต่างๆ

2.1.5 รูปแบบของ การสั้น,การตัด และช่วงความถี่

แม้ว่าจะมีการตัดคริสตอลได้หลายแบบ แต่สำหรับที่ความถี่สูง (1 MHz ขึ้นไป) มักจะตัดเป็นแบบ AT-cut ซึ่ง AT-cut นั้นจะตัดคริสตอลออกเป็นชิ้นบางๆ และนำโลหะมาประกบเข้าที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้โดยไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผิวของคริสตอลทั้งสองด้านด้วยกระบวนการเมทัลไลต์ซึ่ง ความถี่เรโซแนนซ์ของคริสตอลจะเป็นอัตราส่วนกลับกับความหนาของคริสตอลที่อยู่ระหว่างโลหะทั้งสองด้าน เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าคคร่อมคริสตอล ก็จะทำให้ AT คริสตอลเกิดการเคลื่อนไหวเป็นแรงเค้นตามความหนาทำให้เกิดการสั่นของคริสตอลได้ ซึ่ง AT - Cut ส่วนใหญ่จะถูกผลิตในช่วงความถี่เหล่านี้

1 MHz – 32 MHz ที่ความถี่มูลฐาน

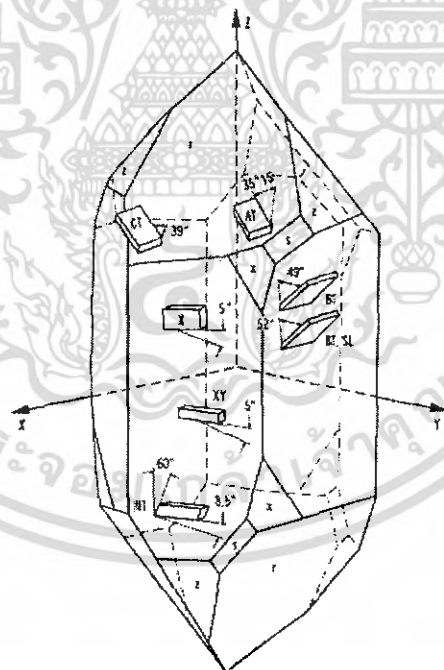
30 MHz – 250 MHz ที่ overtone

ที่ความถี่ต่ำกว่า 1 MHz ตัวให้กำเนิดความถี่เรโซแนนซ์จัดเป็นแบบความเค้นตามความหนาซึ่งมันจะมีควมยากและจะไม่ใช้กันโดยทั่วไป

ก. ต่ำกว่า 100 KHz flexural, length extensional mode

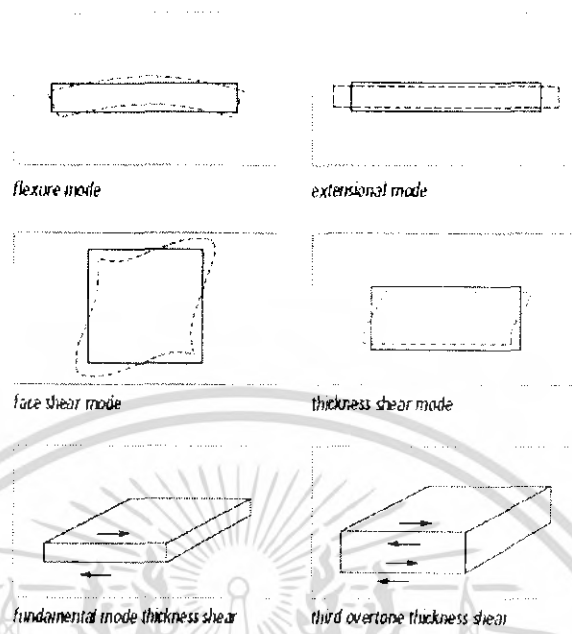
ข. 100 KHz face shear, CT; DT; SL cuts

สำหรับแต่ละรูปแบบการสั่นจะมีมุมการตัดที่เหมาะสม ซึ่งจะเป็นตัวควบคุมการเปลี่ยนแปลงความถี่ในช่วงอุณหภูมิต่างๆ

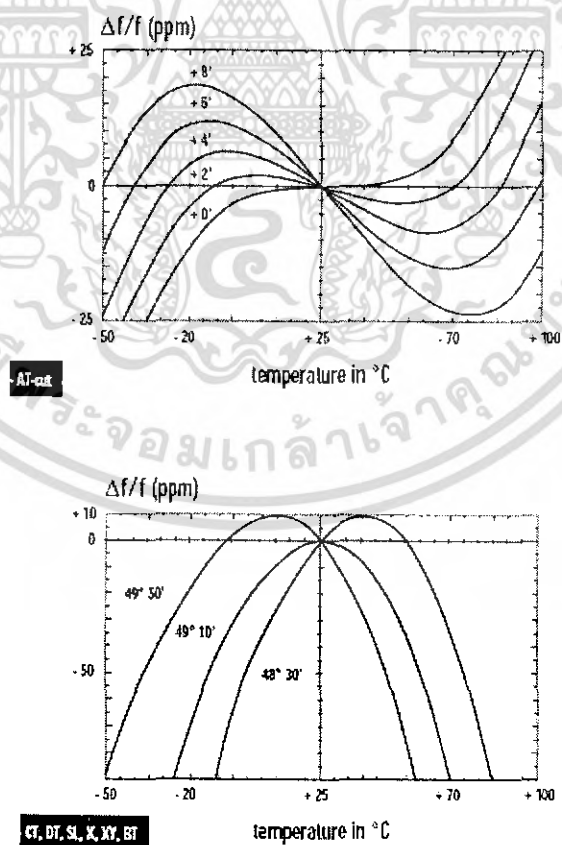


รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะการตัดในมุมต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดงรูปแบบของการสั่นในแบบต่างๆ

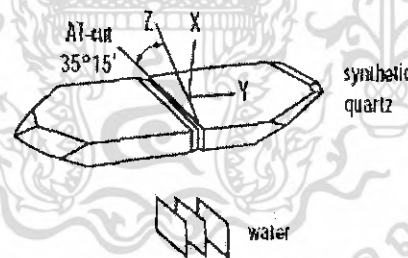


รูปที่ 2.5 แสดงการตอบสนองของความถี่เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของการตัดแบบต่างๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.6 กระบวนการผลิตควอทซ์คริสตอล

1. ตัดเวเฟอร์
2. ขัดเวเฟอร์
3. ทำความสะอาด
4. ตรวจสอบการจัดเรียงตัวของเวเฟอร์ โดยวิธี x-ray
5. ทำเวเฟอร์ให้เป็นแผ่นกลม
6. ทำความสะอาดและทำการกัดลายวงจรบนเวเฟอร์
7. ทำขั้วไฟฟ้า
8. แปะชั้นเวเฟอร์ลงบนฐานรอง และเชื่อมขา
9. ทำการปรับความถี่ครั้งสุดท้าย
10. บรรจุลงในแพ็คเกจ

ในกระบวนการทำความสะอาดชิ้นส่วนต่างๆ จะต้องมีการออกแบบและผลิตคริสตอลอย่างระมัดระวัง ความเครียดน้อยๆ ที่เกิดกับตัวให้กำเนิดความถี่เรโซแนนซ์ อันเนื่องมาจากการเจือปนของแก๊สในโครงเงินในบรรยากาศที่เข้ามาอยู่ในแพ็คเกจ จะมีผลสำคัญต่อความเสถียรของควอทซ์คริสตอลที่มีคุณภาพสูง

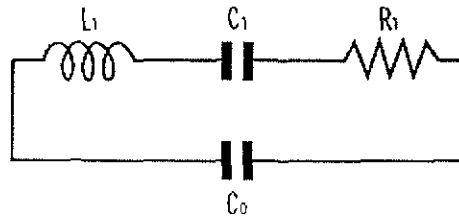


รูปที่ 2.6 แสดงการตัดผลึกควอทซ์เป็นเวเฟอร์ในมุมต่างๆ

2.1.7 วงจรสมมูล

วงจรสมมูลของคริสตอลจะมีขดลวดเหนี่ยวนำ (L_1), ตัวเก็บประจุ (C_1), ตัวต้านทาน (R_1) ต่ออนุกรมกันอยู่และมีตัวเก็บประจุ (C_0) อีกตัวต่อขนานกับอนุกรมในข้างต้นทั้งสามตัว ซึ่งอนุกรมแต่ละตัวมีความหมายเป็นพฤติกรรมทางไฟฟ้า คือ ขดลวดเหนี่ยวนำ (L_1) และตัวเก็บประจุ (C_1) เป็นตัวแทนของการตอบสนองต่อความถี่ของคริสตอล ตัวเก็บประจุ (C_0) เป็นตัวแทนของค่าความจุประจุระหว่างผิวโลหะทั้งสองด้าน และตัวต้านทาน (R_1) เป็นตัวแทนของค่าความต้านทานในคริสตอล ซึ่งอนุกรมแต่ละตัวจะสามารถกำหนดความถี่ในการสั่นของคริสตอลชิ้นนั้นๆ ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นประโยชน์ในการนำ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แสดงวงจรสมมูลทั่วไปของคริสตอล

การวิเคราะห์อย่างละเอียดของวงจรสมมูลในเรื่องความถี่จะมีเพียง 2 แบบ คือ ความถี่เรโซแนนซ์แบบขนาน และความถี่เรโซแนนซ์แบบอนุกรม

Series resonant frequency $f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}}$ ----- (2.1)

Parallel resonant frequency $f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{C_0 C_1}{C_0 + C_1} L_1}}$ ----- (2.2)

Quality factor $Q = \frac{1}{2\pi f_s R_1 C_1}$ ----- (2.3)

A very important factor in practice is ratio $r = \frac{C_0}{C_1}$ ----- (2.4)

อัตราส่วนเหล่านี้มีผลในการหาความไวของความถี่คริสตอลในการเปลี่ยนตัวแปรของวงจรภายนอก ขึ้นอยู่กับมิติและรูปร่างของคริสตอล blank ค่า R ประมาณเท่ากับ 200 สำหรับแบบพื้นฐานของ AT - คริสตอลที่มากกว่า 10 MHz และ 250 – 280 สำหรับความถี่ต่ำ ซึ่งคริสตอล blank ในบางส่วนหรือทั้งหมด อัตราส่วนของคริสตอลที่เพิ่มขึ้นอย่างมากจะมีความสัมพันธ์เป็นรากที่สองของลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$r_n = rn^2 \quad \text{----- (2.5)}$$

$$C_1 = \frac{C_0}{rn^2} \quad \text{----- (2.6)}$$

ความไวของพูลกิ้ง จะมีค่ามากที่สุดสำหรับการสันแบบความถี่สูง

2.1.8 การต่อตัวเก็บประจุโหลด C_L

ในวงจรกำเนิดความถี่จริงๆ มักจะใส่ C_L อนุกรมหรือขนานกับคริสตอล การใส่ C_L เข้าไป จะทำให้เกิดการเลื่อนความถี่ในการทำงานของคริสตอลจะได้ว่า

เมื่อ C_L ต่อขนานกับคริสตอล f_c จะไม่มีผล แต่ f_s จะลดลงเข้าสู่ค่า f_L

เมื่อ C_L ต่ออนุกรมกับคริสตอล f_s จะไม่มีผล แต่ f_c จะมีค่าเพิ่มขึ้นเข้าใกล้ f_L R_L มากกว่า R_1 หา f_L ได้จาก

$$f_L = f_r + f_r \frac{C_1}{2(C_0 + C_L)} \quad \text{----- (2.7)}$$

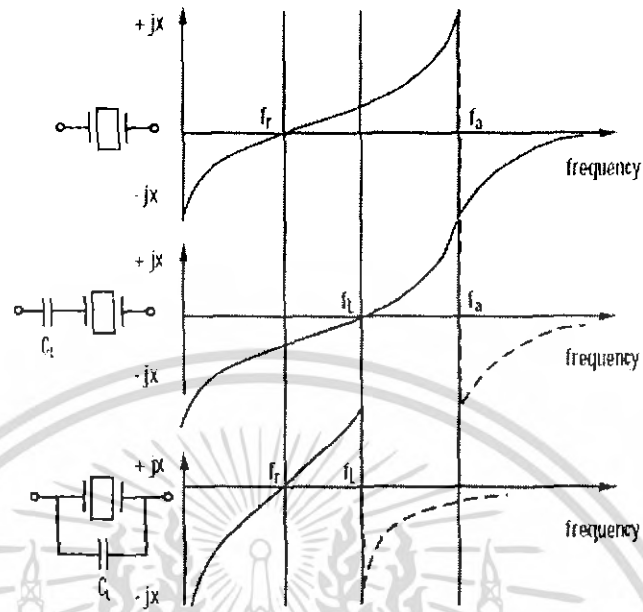
$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{f_L - f_r}{f_r} = \frac{C_1}{2(C_0 + C_L)} \quad \text{----- (2.8)}$$

$$R_L = R_1 \left(1 + \frac{C_0}{C_L}\right)^2 \quad \text{----- (2.9)}$$

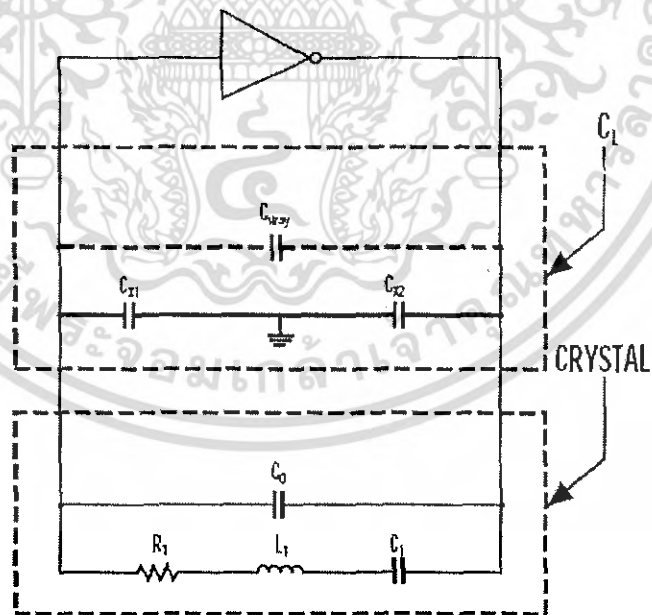
โดยปกติ C_L จะต่อแบบขนานกับคริสตอลดังรูปที่ 2.9 ผลรวมความจุประจุภายนอกทั้งหมด เรียกว่าค่าความจุโหลด ในการผลิตคริสตอลต้องรู้ค่า C_L เพื่อจะได้ปรับค่าความถี่ได้จะหา C_L ได้จาก

$$C_L = \frac{C_{x1}C_{x2}}{C_{x1} + C_{x2}} + C_{stray} \quad \text{----- (2.10)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะของความถี่เมื่อต่อตัวเก็บประจุในแบบอนุกรมและขนาน



รูปที่ 2.9 แสดงการต่อ C_L ขนานกับคริสตอลที่พิจารณาเป็นวงจรสมมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.9 ความไวการพูลลิ่ง (Pulling sensitivity)

ความไวของความถี่ทำงานกับการเปลี่ยนแปลงน้อยๆ ของ C_L พิจารณาได้จาก

$$S = \frac{d\left(\frac{\Delta f}{f_r}\right)}{dC_L} = -\frac{C_L}{2(C_0 + C_L)^2} \quad \text{----- (2.11)}$$

สมการนี้แสดงให้เห็นการแปรผันตรงของ S กับ C_L สำหรับคริสตอลความถี่สูงในแบบพื้นฐาน S สามารถสูงกว่า -20 ppm/pF โดยเฉพาะอย่างยิ่ง C_L น้อยๆ สำหรับ ที่ Overtone ลำดับสูง ความไวจะน้อยกว่าแบบพื้นฐาน เพราะ C_L มีค่าต่ำ

ระยะการพูลลิ่งระหว่าง C_L สองค่าหาได้โดย

$$D_{L1/L2} = \frac{f_{L1} - f_{L2}}{f} = \frac{C_L(C_{L2} - C_{L1})}{2(C_0 + C_{L1})(C_0 + C_{L2})} \quad \text{----- (2.12)}$$

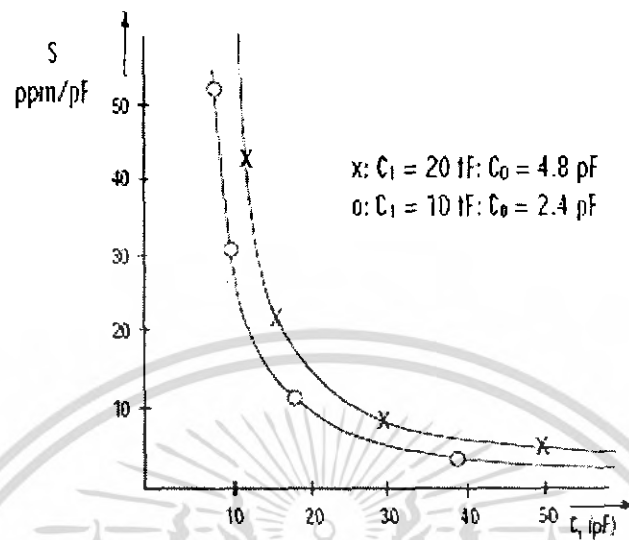
2.1.10 ไดรฟ์เลเวล (Drive level)

เมื่อสั่งซื้อคริสตอลลูกค้าควรจะต้องชี้เฉพาะการทำงาน ไดรฟ์เลเวล ที่ต้องการ ในขั้นตอนการผลิตคริสตอลสามารถจะกำหนด ไดรฟ์เลเวล และกำจัดปัญหาการเริ่มต้นด้วยไดรฟ์เลเวลระดับต่ำที่สุด วงจรโดยทั่วไปนั้นควรมีไดรฟ์เลเวลที่ค่าสูงสุด 100 MHz การกระจายกำลังประมาณได้โดย

$$P = I^2 R_L \quad R_L = R_1 \left(1 + \frac{C_0}{C_L}\right)^2 \quad \text{----- (2.13)}$$

$$P = \frac{U^2}{R_1 \left(1 + \frac{C_0}{C_L}\right)^2} \quad \text{----- (2.14)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 แสดงการต่อตัวเก็บประจุค่าต่างๆ ที่มีผลต่อ Sensitivity

2.1.11 อายุของคริสตอล

อายุอธิบายได้ว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงความถี่ในช่วงคาบเวลา การทดสอบอายุให้เป็นไปตามมาตรฐาน DIN 45103 อัตราอายุปกติของคริสตอลที่วางขายกันอยู่เป็น

$$\frac{\Delta f}{f} \leq \pm 5 \text{ ppm/year} \quad \text{----- (2.15)}$$

2.1.12 การตอบสนองความถี่ที่เลื่อนไป

เป็นความถี่เรโซแนนซ์อื่นๆ ที่มีค่าใกล้เคียงกับความถี่ทำงาน ความแตกต่างระหว่างสองความถี่นี้ปกติจะมีค่าน้อย สำหรับบางอุปกรณ์บางครั้งจำเป็นที่จะต้องลดผลของการตอบสนองความถี่ที่ผิดไป ด้วยการคำนวณด้วยค่า C_1 ดังนั้นจะได้ว่า

$$a_{NW} = 20 \log \frac{R_{NW}}{R_1} \quad \text{----- (2.16)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.13 วิธีการวัด

- **Active Method** ตัวแปรของควอทซ์คริสตอลมี f_r , R_1 , C_1 , L_1 , f สามารถวัดได้โดยกระบวนการแอคทีฟ ซึ่งเร็วและถูก เพราะว่าจำกัดความแม่นยำไว้ที่ยอมให้คลาดเคลื่อนได้ ± 10 ppm

$$C_1 = \frac{2(f_L - f_r)}{f_r} (C_0 + C_L) \quad \text{----- (2.17)}$$

$$L_1 = \frac{1}{4\pi^2 f_r^2 C_1} \quad \text{----- (2.18)}$$

$$R_L = R_1 \left(1 + \frac{C_0}{C_L} \right)^2 \quad \text{----- (2.19)}$$

- **Passive Method** กระบวนการนี้เป็นไปตามมาตรฐาน DIN 45105 ด้วยการลัดวงจรของ โลหะ blank หรือตัวต้านทานที่ไม่ได้นำกระแสใน ไฟ - เน็ดเวิร์ก เฟสที่วัดได้จะถูกปรับให้เป็น 0 ระหว่าง U_2 และ U_1 U_2 จะถูกนำไปใช้หาค่าไคฟิเลเวล คริสตอลสามารถนำมาใส่ได้ในไฟ - เน็ดเวิร์ก จากนั้นความถี่จะถูกปรับให้มีเฟสเป็นศูนย์ ความถี่นี้ก็คือความถี่เรโซแนนซ์ R_1 จะสามารถหาได้จากสูตรข้างล่าง U_{2K} คือ ความต่างศักย์ขณะลัดวงจร U_2 เป็นความต่างศักย์ของคริสตอล U_1 เป็นความต่างศักย์อ้างอิง

$$P_C = R_1 \times U_2^2 \times 4.79 \times 10^{-2} \quad \text{----- (2.20)}$$

$$R_1 = 25 \times \left[K \frac{U_{2K}}{U_{1K}} - 1 \right] \quad \text{----- (2.21)}$$

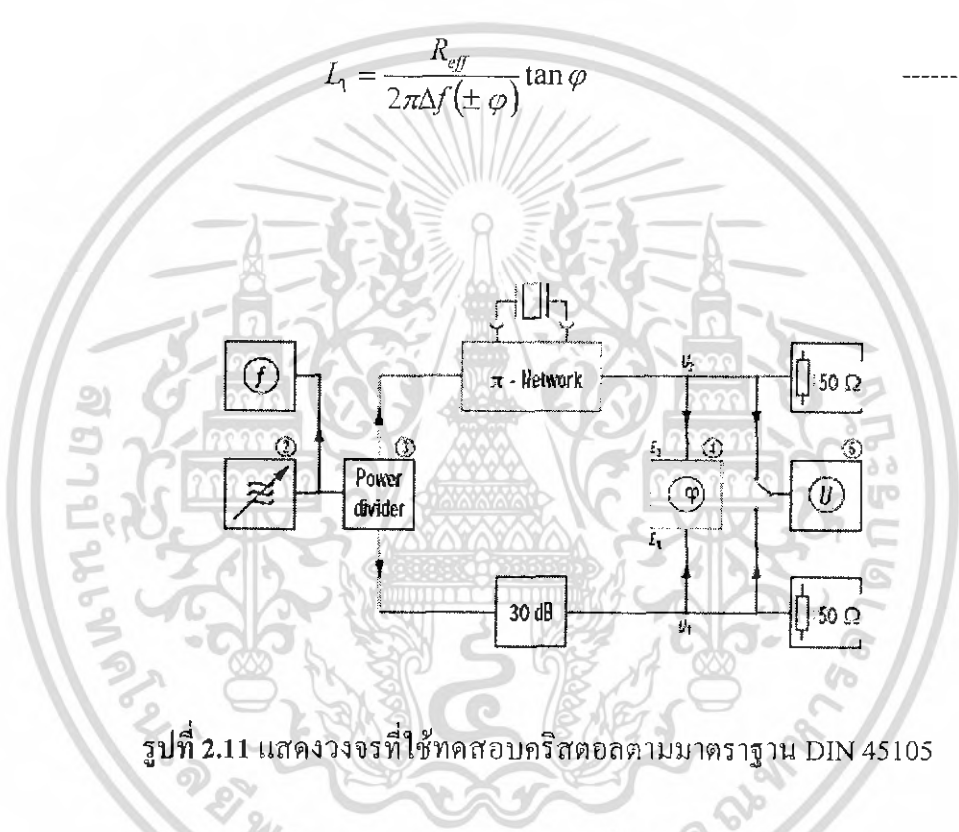
$$K = \frac{U_{2K}}{U_{1K}} \approx 1 \quad \text{----- (2.22)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_1 = \frac{\Delta f(\pm \varphi)}{2\pi f_r^2 R_{eff} \tan \varphi} \quad \text{----- (2.23)}$$

$$R_{eff} = R_1 + 25 \quad \text{----- (2.24)}$$

$$L_1 = \frac{R_{eff}}{2\pi \Delta f(\pm \varphi)} \tan \varphi \quad \text{----- (2.25)}$$



รูปที่ 2.11 แสดงวงจรที่ใช้ทดสอบคริสตอลตามมาตรฐาน DIN 45105

2.2 ควอทซ์คริสตอลไมโครบาลานซ์ (Quartz crystal microbalance: QCM)

ในปี 1880 ปีแอร์และมารี คูรี ได้แสดงให้เห็นว่า ผลึกของเกลือ Rochelle สามารถให้กระแสไฟฟ้าได้เมื่อได้รับแรงในทิศทางที่สอดคล้องกับ โครงผลึก และต่อมายังแสดงให้เห็นอีกว่ามีปรากฏการณ์ที่ตรงกันข้ามกับปรากฏการณ์ข้างต้น นั่นคือ ผลึกของเกลือ Rochelle เกิดความเครียดเมื่อได้รับกระแสไฟฟ้า ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้คือ ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กตริก

เพียโซอิเล็กตริกไม่ค่อยได้รับความสนใจนักในตอนต้น จนกระทั่งปี 1917 เมื่อมีการค้นพบว่า ควอทซ์คริสตอลสามารถใช้เป็นทรานสดิวเซอร์ และสามารถรับคลื่นอุลตราโซนิคในน้ำได้ ในปี 1919 อุปกรณ์หลายๆ ชนิดในทุกวันนี้ได้อาศัยหลักของเพียโซอิเล็กตริกชนิดหนึ่งของผลึกเกลือ Rochelle อย่างเช่น เครื่องขยายเสียง, ไมโครโฟน และซาว์พิคอัพ และในปี 1921 ได้มีการอธิบายการควบคุมการสั่นของควอทซ์คริสตอลได้เป็นครั้งแรก ควอทซ์คริสตอลตัวแรกที่สามารถควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ใช้เห็นประโยชน์ประการใด กรุณาแจ้งสำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง เพื่อปรับปรุงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

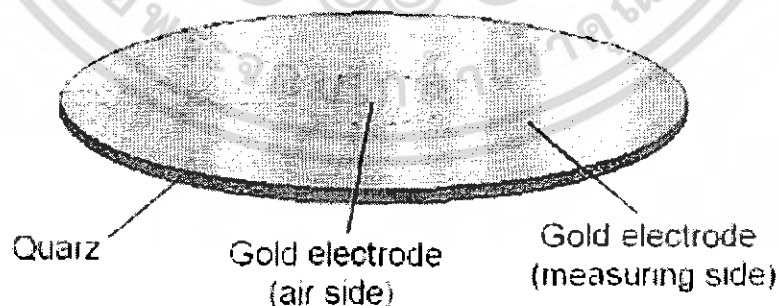
การสั่นได้เป็นแบบ X-Cut คริสตอล ซึ่งจะมีความไวต่ออุณหภูมิเป็นอย่างมาก ดังนั้น ในทุกวันนี้ X-Cut คริสตอลถูกใช้เป็นอุปกรณ์ที่สัมพันธ์กับความถี่ทางความร้อนมีผลน้อยมากต่อการทำงาน เช่น ทรานซิสเตอร์ของคลื่น โซนา

ควอทซ์คริสตอลทุกชนิดที่ใช้เป็นอุปกรณ์ควบคุมความถี่เริ่มขึ้นในปี 1934 เมื่อ AT - Cut ควอทซ์คริสตอลได้ถูกพัฒนาขึ้น สิ่งที่ได้เปรียบของ AT - Cut ควอทซ์คริสตอล คือ แทบจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงความถี่เมื่ออยู่ที่อุณหภูมิห้อง ในยุคแรกของการใช้ควอทซ์คริสตอลเป็นอุปกรณ์ ควบคุมความถี่ จะสามารถเพิ่มความถี่เรโซแนนซ์ได้โดยการเอาดินสอมาขูดที่ขั้วไฟฟ้าของมัน หรือ หากต้องการจะลดความถี่เรโซแนนซ์ให้นำยางลบมาลบรอยดินสอออก ซึ่งความเข้าใจในเรื่องที่ มวลมีผลในการเหนี่ยวนำความถี่ให้เลื่อนไป รู้จักกันในชื่อว่า ควอลิตีทีฟ เบสิส (Qualitative Basis)

อย่างไรก็ตาม ในปี 1959 Sauerbrey ได้ตีพิมพ์บทความที่แสดงว่า การเปลี่ยนแปลงความถี่ ของการสั่นของคริสตอลมีผลโดยตรงกับอัตราส่วนของมวลที่ถูกเติมเข้าไป Sauerbrey ได้เป็น บุคคลที่ริเริ่มในการพัฒนาเครื่องมือควอลิตีทีฟ เพื่อใช้ในการวัดมวลที่น้อยมากๆ เช่น QCM

ดังนั้น QCM จึงสามารถจะอธิบายได้ว่าเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดมวลที่มีความไวสูงมาก องค์ประกอบหลักของ QCM ก็คือ เปียโซอิเล็กทริก AT-Cut ควอทซ์คริสตอล ซึ่งจะถูกระงับอยู่ ระหว่างขั้วไฟฟ้า เมื่อขั้วไฟฟ้าถูกเชื่อมต่อกับ Oscillator และไฟฟ้ากระแสสลับที่ถูกจ่ายให้กับ ขั้วไฟฟ้า ควอทซ์คริสตอลจะเริ่มสั่นที่ความถี่เรโซแนนซ์ เนื่องจากปรากฏการณ์เปียโซอิเล็กทริก การสั่นนี้ปกติแล้วจะมีความเสถียรเป็นอย่างมาก เนื่องจาก Q factor มีค่าสูง (คุณภาพของการสั่น)

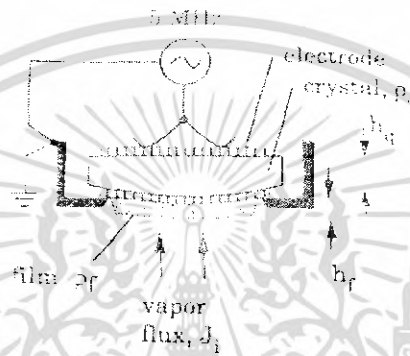
Quartz crystal - The heart of the QCM



รูปที่ 2.12 แสดงรูประบบควอทซ์คริสตอลไมโครบาลานซ์

การใช้การสั่นของผลึกควอทซ์มาเป็นตัวตรวจสอบการเกาะของมวลบนฐานรอง นับว่าเป็น เครื่องมือวัดความหนาที่มีประสิทธิภาพมากในเทคโนโลยีของฟิล์มบาง ผลึกควอทซ์นั้นจะถูกตัด ออกสารเป็นเอกสารที่ลงนามไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นเบาะประเอียงในการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นเวเฟอร์และถูกนำมาใช้เป็นตัวควบคุมสัญญาณความถี่แก่คอมพิวเตอร์, นาฬิกา, วิทยุ เพราะผลึกควอตซ์นั้นมีสมบัติเปียโซอิเล็กทริก ดังนั้น ผลึกควอตซ์จึงสามารถให้กำเนิดความต่างศักย์ที่กว้างไปมาตกร่อมระหว่างตัวมันเมื่อตัวมันสั่น ซึ่งความถี่ในการสั่นก็คือความถี่เรโซแนนซ์ โดยความถี่นี้สามารถนำไปขยายและป้อนกลับเข้ามาขับผลึกที่ความถี่เดิมได้อีก การเชื่อมต่อทางกระแสไฟฟ้าจะใช้แผ่นโลหะบางๆ แปะบนด้านทั้งสองของเวเฟอร์ผลึกควอตซ์ ดังรูป 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงภาพภาคตัดขวางของควอตซ์คริสตอลที่ใช้ตรวจจับมวล

ขั้วด้านหนึ่งจะถูกเปิดว่างไว้เพื่อให้มวลของสารที่ใช้ระเหยเป็นฟิล์มบางสามารถมาเกาะติดกับขั้วไฟฟ้าได้ มวลที่มาเกาะนี้จะทำให้เกิดโหนดแก่ผลึกส่งผลให้ความถี่เรโซแนนซ์ลดลง เมื่อเปรียบเทียบความถี่ของคริสตอลที่มีโหนดกับคริสตอลที่ใช้ในการอ้างอิง จะทำให้สามารถคำนวณปริมาณมวลหรือความหนาของสารที่มาเกาะติดเป็นฟิล์มบางได้ ซึ่งการวัดแบบมีคริสตอลอ้างอิงนั้นจะทำให้ได้ผลที่แม่นยำกว่าการวัดค่าความถี่ที่เปลี่ยนไปตรงๆ

หากคิดโดยการประมาณว่าการสั่นของผลึกควอตซ์ที่มีมวลเกาะก็คล้ายกับการสั่นของสปริงที่มีมวลเกาะ ได้ว่า

$$f_r = \frac{1}{T_v} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{----- (2.26)}$$

- เมื่อ f_r คือ ความถี่เรโซแนนซ์ (Hz)
 T_v คือ คาบของการสั่น (s)
 k คือ ค่าคงที่สปริง ($N/m = kg/s^2$)
 m คือ มวล (kg)

สำหรับคริสตอลที่มีมวลมาเกาะ ได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_r = T_{co} + \Delta T_r \propto \sqrt{m_q + m_f} = \sqrt{m_q} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{m_f}{m_q} \right) \quad \text{----- (2.27)}$$

หมายความว่า

$$\Delta T_r \propto m_f \propto \rho_f h_f$$

เมื่อ ΔT_r คือ การเปลี่ยนแปลงคาบของการสั่นเนื่องจากโหลด

m_q คือ มวลของคริสตอลที่ไม่มีโหลด

m_f คือ มวลของสารที่ใช้ระเหย

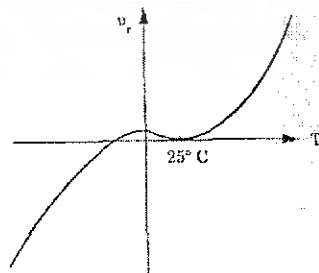
ρ_f คือ ความหนาแน่นของสารที่ใช้ระเหย

h_f คือ ความหนาของชั้นสารที่ถูกระเหยมาเกาะคริสตอล

พจน์สุดท้ายในสมการ (2.27) จะถูกต้องเมื่อ $m_f \ll m_q$ ดังตัวอย่างเช่น ถ้า $m_f/m_q < 0.1$ นั่นคือ ถ้า $h_q = 350 \mu\text{m}$ ความหนามากที่สุดของมวลที่สามารถจะไปเกาะติดและสมการยังคงใช้ได้คือ $35 \mu\text{m}$ ถ้าเกินไปกว่านี้อาจทำให้วัดได้ไม่แม่นยำก็คือคริสตอลหมดอายุการใช้งาน การแก้ปัญหานี้ทำโดย การคิดค่าอะคูสติคิมพีแดนซ์ (Z) ของมวลที่มาเกาะและคริสตอลลงไปด้วย ซึ่งช่วยยืดอายุการใช้งานของคริสตอลได้ โดย $m_f/m_q < 0.7$ เพราะสารที่ใช้ทำการปลูกฟิล์มนั้นมีค่า Z ต่างๆ กัน

การจะใช้ผลึกควอทซ์เป็นตัวตรวจจับมวลของสารที่มากบนฐานรอง และสามารถนำมาคำนวณเป็นค่าความหนาออกมาได้นั้น ต้องคำนึงถึงแหล่งกำเนิดสารที่ใช้ระเหยโดยใช้ Cosine law มาพิจารณาตำแหน่งการวางคริสตอลและ Knudsen equation มาพิจารณาแหล่งกำเนิดสาร ซึ่งผลคือควรวางคริสตอลให้ใกล้กับฐานรองมากที่สุด แต่คริสตอลอาจได้รับผลจากความร้อนของฐานรองหรือแหล่งกำเนิดทำให้ค่าความถี่ผิดเพี้ยนไปได้

การใช้งานคริสตอลนั้นการควบคุมอุณหภูมิมีนัยสำคัญมาก รูปที่ 2.14 แสดงการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงของ AT - Cut

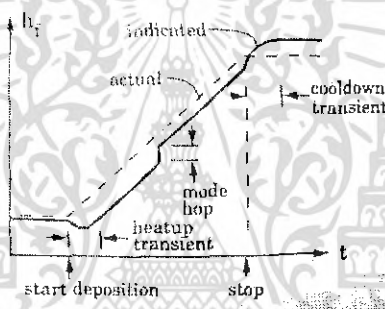


รูปที่ 2.14 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความถี่เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการตัดแบบ AT - Cut นี้ความถี่เรโซแนนซ์จะไม่เปลี่ยนแปลงมากนักในช่วงอุณหภูมิห้อง แต่ที่อุณหภูมิอื่นๆ นั้นอุณหภูมิมีผลเป็นอย่างมาก ซึ่งถ้าคริสตอลได้รับความร้อนไม่ว่าจากแหล่งกำเนิดหรือฐานรองในขณะที่ทำการวัดความหนาในกระบวนการปลูกฟิล์ม จะทำให้ค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่อ่านได้มีค่าเพิ่มขึ้นนั้นหมายความว่ามวลที่มากเกาะหรือความหนามีค่าลดลงจากที่ปกติเมื่อมีมวลมากเกาะคริสตอลค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่อ่านได้จะมีค่าลดลง ดังนั้นการแก้ปัญหาที่คือระบายความร้อนให้กับคริสตอลให้มีอุณหภูมิต่ำที่ระหว่างทำการวัด

ในการปลูกฟิล์มนั้น การเกิดความคลาดเคลื่อนในการสั้นของควอตซ์ซึ่งเป็นผลให้วัดค่าความหนาได้ผิดไปนั้น อาจเริ่มตั้งแต่เมื่อแหล่งกำเนิดให้ความร้อนในตอนเริ่มปลูกฟิล์มและตอนที่แหล่งกำเนิดเริ่มเย็นตัวลงเมื่อปลูกฟิล์มเสร็จแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงความหนาที่วัดได้จากควอตซ์คริสตอลเทียบกับความหนาที่เกิดขึ้นจริง

จะเห็นได้ว่าความหนาของฟิล์มที่เกิดขึ้นจริงๆ นั้นมีความเป็นเชิงเส้นในขณะที่ค่าความหนาที่วัดจากคริสตอลนั้นมีค่าที่กระโดด มีการลดลงของความหนา มีความหนามากกว่าความเป็นจริง ซึ่งการที่ค่าความหนาลดลงหรือเพิ่มขึ้นนั้นเป็นผลมาจากอุณหภูมิ ส่วนการที่ค่าความหนามีการกระโดดนั้นเป็นผลมาจากคริสตอลเปลี่ยนรูปแบบในการสั้น ที่มีผลมาจากฟิล์มที่ปลูกมีผิวหน้าที่ไม่เรียบ มีมวลมาก หรือฟิล์มเริ่มแตกตัวเพราะทำปฏิกิริยากับก๊าซที่รั่วเข้ามาในระบบ

การปลูกฟิล์มที่ไม่สามารถใช้คริสตอลเป็นตัวตรวจจับมวล ได้แก่ สารที่ใช้ปลูกเป็นของเหลว เช่น Ga, Hg หรือสารที่ปลูกทำปฏิกิริยากับขั้วโลหะหรือทำลายขั้วโลหะของคริสตอลปกติแล้วขั้วโลหะมักทำมาจาก Pt ซึ่งมีความแข็งแรงและทนทานมาก

2.3 หลักการทำงานของเครื่องวัดความหนาของฟิล์มบาง

โครงการพิเศษชิ้นนี้เป็นเครื่องวัดความหนาของฟิล์มบางที่ทำงานด้วยระบบไมโครโปรเซสเซอร์ และวงจรมวลความถี่ ซึ่งจะแปลงค่าความถี่ที่ได้มาเป็นค่าความหนาของฟิล์มบาง โดยจะใช้ควอตซ์คริสตอลซึ่งวางอยู่ใกล้กับฐานรองที่ใช้ปลูกฟิล์มบางเป็นตัวตรวจจับมวลของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารที่ระเหยมาเกาะบนผิวหน้าควอทซ์คริสตอล ซึ่งจะทำให้ความถี่ในการสั่นของควอทซ์คริสตอลเปลี่ยนไป และนำค่าความถี่ที่เปลี่ยนไปนี้มาคำนวณเป็นค่าความหนาของฟิล์มบาง โดยที่การคำนวณต้องคำนึงถึงความหนาแน่นของสารที่ใช้ปลูก, ตัวแปรทางเรขาคณิตระหว่างแหล่งกำเนิดกับฐานรอง และตัวควอทซ์คริสตอล

เมื่อไอระเหยของสารที่ระเหยขึ้นไปจับคริสตอลเป็นแผ่นฟิล์มบาง ทำให้ความถี่ในการสั่นของคริสตอลเปลี่ยนไป โดยที่ความถี่ที่เปลี่ยนไปนี้มีความสัมพันธ์กับความหนาของฟิล์มบางดังนี้

$$T = \frac{t(f_1 - f)}{\rho k A} \quad \text{----- (2.28)}$$

เมื่อ	T	คือ ความหนาของฟิล์ม (cm)
	ρ	คือ ความหนาแน่นของฟิล์ม ($g \cdot cm^{-3}$)
	k	คือ ความถี่คงที่ของควอทซ์คริสตอลในรูปแบบความหนา ($Hz \cdot cm^{-1}$)
	f	คือ ความถี่ของคริสตอลที่มีโหลด (Hz)
	f_0	คือ ความถี่ของคริสตอลที่ไม่มีโหลด (Hz)
	A	คือ พื้นที่ของคริสตอล (cm^2)
	t	คือ Tooling factor

จากสมการ (2.28) จะแสดงให้เห็นว่ามวลที่มาเกาะมีความสัมพันธ์กับความถี่ที่เปลี่ยนไป ทำให้เราสามารถหาค่าความหนาของฟิล์มบางที่ปลูก โดยการระเหยสารในระบบสุญญากาศได้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

หลังจากที่ทำการศึกษาทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง กับโครงการพิเศษเรียบร้อยแล้ว การทำงานขั้นต่อไป ก็คือ การวางแผนขั้นตอนการดำเนินงาน ซึ่งในบทที่ 3 นี้ จะอธิบายถึงรายละเอียดของส่วนต่างๆ ในขั้นตอนการดำเนินงานทั้งในส่วนของการออกแบบระบบฮาร์ดแวร์ (Hardware) การทดสอบการทำงานของฮาร์ดแวร์ และการออกแบบระบบซอฟต์แวร์ (Software)

3.1 ขั้นตอนการออกแบบระบบฮาร์ดแวร์ (Hardware Design)

ในการออกแบบระบบฮาร์ดแวร์จะมีรายละเอียดของการดำเนินงาน ดังต่อไปนี้

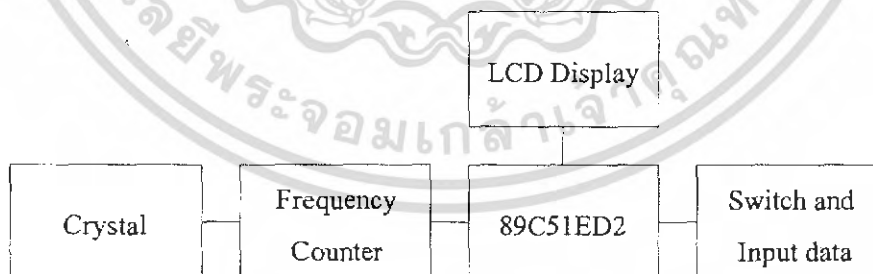
1) สร้างบล็อกไดอะแกรมแสดงส่วนประกอบและระบบการทำงานของเครื่องวัดความหนาของฟิล์มบาง

2) ศึกษาและออกแบบวงจรต่างๆ ให้ทำงานสอดคล้องกับบล็อกไดอะแกรม

3) การต่อวงจรต่างๆ

4) การทดสอบวงจร

3.1.1 บล็อกไดอะแกรมแสดงส่วนประกอบและระบบการทำงานของเครื่องวัดความหนาของฟิล์มบาง



รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรม (Block Diagram)

การทำงานของเครื่องวัดความหนาของฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.1 จะแสดงถึงการทำงานทั้งหมดของเครื่องวัดความหนาของฟิล์มบางซึ่งในขั้นแรกที่ Switch and Input data เราจะทำการป้อนข้อมูลเฉพาะของสารที่นำมาใช้ระเหยเป็นฟิล์มบาง เช่น ความหนาแน่นของเนื้อสาร เป็นต้น จากนั้นเราจะใช้คุณสมบัติเฉพาะในการสั่นของคริสตอลเข้ามาช่วยในการวัดความหนาของฟิล์มบาง ซึ่งก็คือ ในการปลูกฟิล์มบางนั้น เราจะนำคริสตอลวางไว้ในบริเวณใกล้เคียงกับฐานรอง เมื่อทำการระเหยสารในระบบสุญญากาศ เนื้อสารจะไปเกาะติดที่ฐานรองและคริสตอล ซึ่งเมื่อมีเนื้อสารมาเกาะติดที่คริสตอล จะทำให้ความถี่ในการสั่นของคริสตอลมีการเปลี่ยนแปลง จากนั้นวงจร Frequency Counter ที่มีชิพ ICM7226B เป็นตัวควบคุมการทำงาน จะทำการวัดค่าความถี่การสั่นที่เปลี่ยนแปลงของคริสตอล และส่งค่าที่วัดได้นี้ไปเก็บไว้ที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ AT89C51ED2 ขนาด 8-bit ซึ่งมีหน่วยความจำ 64 Kbytes จากนั้น ไมโครคอนโทรลเลอร์ AT89C51ED2 จะทำการประมวลผลเพื่อคำนวณหาค่าความหนาของฟิล์มบางแล้วแสดงผลทาง LCD โดยกระบวนการทั้งหมดนี้จะเกิดขึ้นในขณะที่ทำการปลูกฟิล์มบาง ซึ่งจะมี Real Time Clock เป็นตัวเก็บค่าวันเวลาที่ทำการปลูกฟิล์ม และบันทึกค่าความถี่ไว้ใช้ในการปลูกฟิล์มครั้งต่อไป

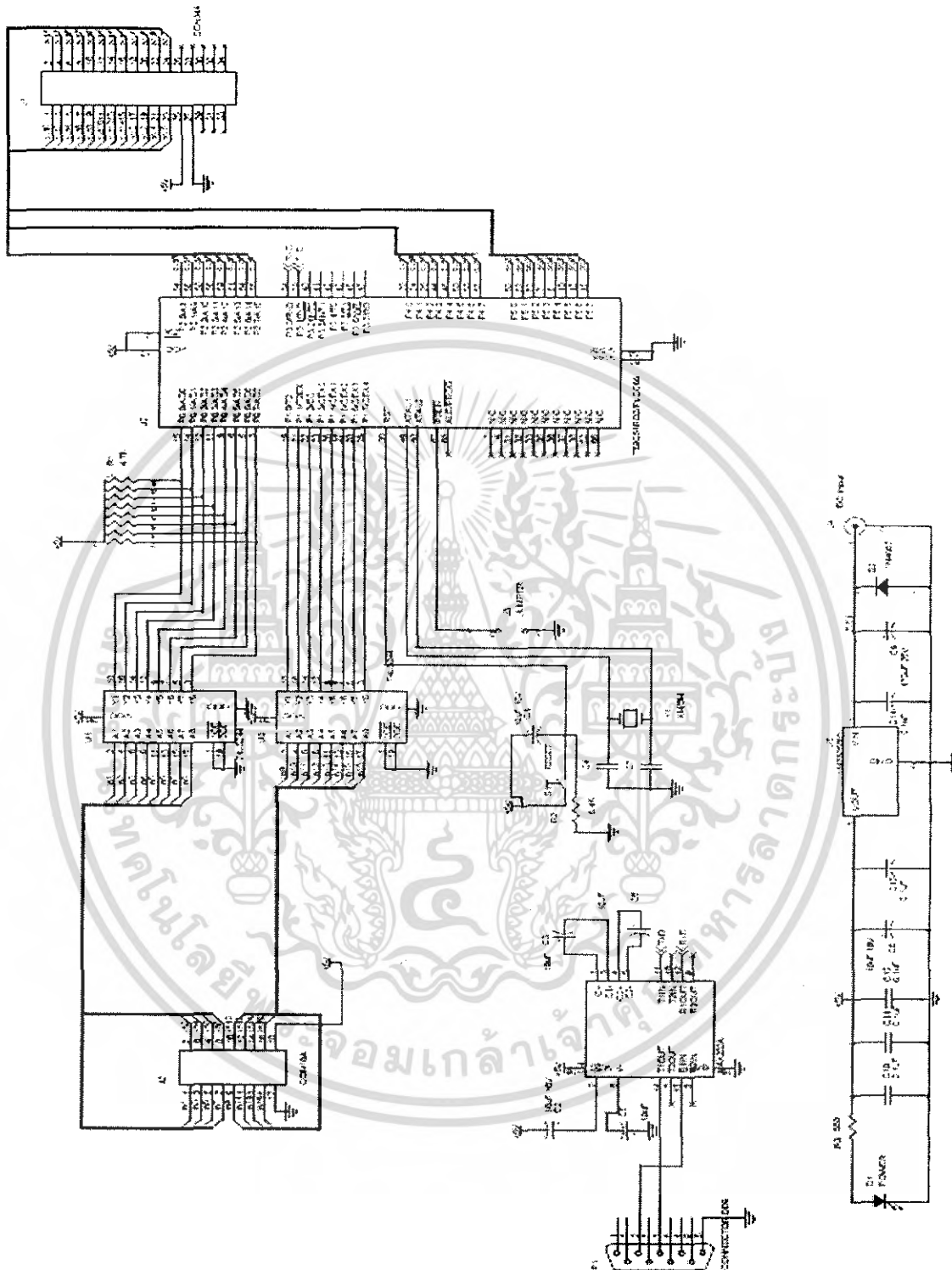
3.1.2 ศึกษาและออกแบบวงจรต่างๆให้ทำงานสอดคล้องกับบล็อกไดอะแกรม

สำหรับรายละเอียดของวงจรต่างๆ ที่ใช้ในการทำงานของเครื่องวัดความหนาของฟิล์มบางจะมีอยู่ 2 วงจร ดังนี้

- วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ AT89C51ED2
- วงจรนับความถี่ (Frequency Counter)

วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ AT89C51ED2

ในโครงการพิเศษนี้ได้เลือกไมโครคอนโทรลเลอร์ AT89C51ED2 มาใช้ในการประมวลผลของเครื่องวัดความหนาของฟิล์มบาง ซึ่งมีวงจรดังรูปที่ 3.2



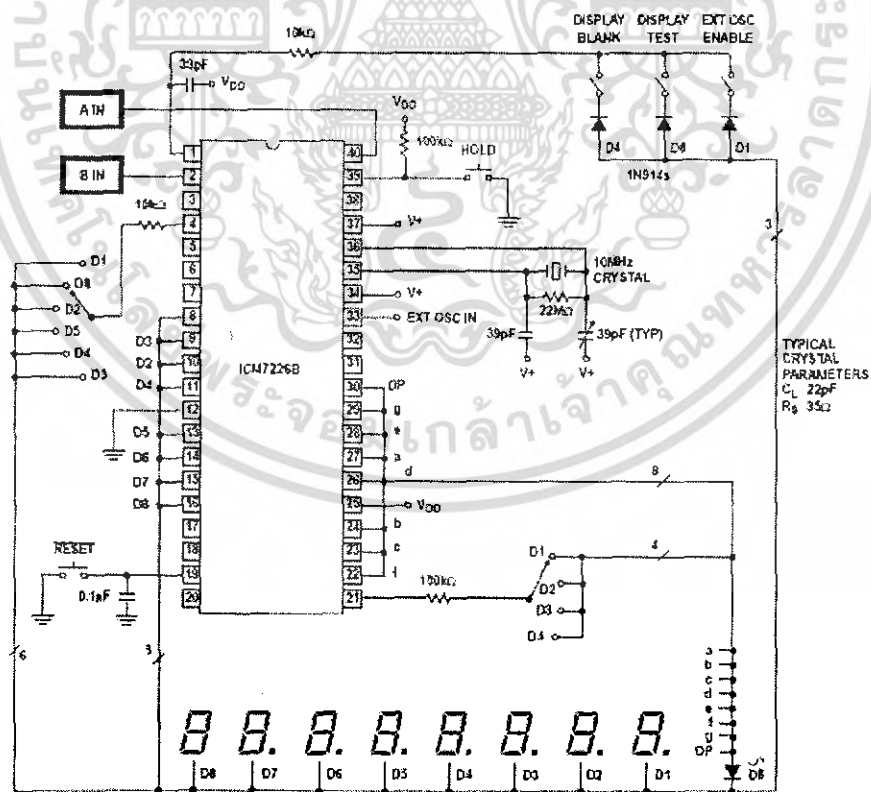
รูปที่ 3.2 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ AT89C51ED2

จากรูปที่ 3.2 ชิพ AT89C51ED2 จะทำหน้าที่ประมวลผลคำสั่งเพื่อควบคุมระบบการทำงานให้เป็นไปตามโปรแกรมที่ถูกเก็บบันทึกไว้ในหน่วยความจำแบบแฟลตขนาด 64 Kbytes เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้น พอร์ต 0 และ พอร์ต 1 ของชิพ AT89C51ED2 จะต่อเข้ากับ ไอซีเบอร์ 74LS244 ซึ่งเป็น บัฟเฟอร์ เพื่อป้องกันการเสียหายของชิพ AT89C51ED2 โดยพอร์ต 0, 1 จะทำหน้าที่รับค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลงของคริสตอลที่วัดได้จากวงจรนับความถี่เข้ามาทำการคำนวณ เพื่อหาค่าความหนาของฟิล์มบาง และจะใช้พอร์ต 2 ทำหน้าที่รับค่าอินพุตจากผู้ใช้ เช่น ความหนาแน่นของเนื้อสารที่ใช้, ความหนาของฟิล์มบางที่ต้องการ เป็นต้น ส่วนพอร์ต 3 จะใช้ RxD, TxD สำหรับติดต่อผ่าน MAX232A เพื่อเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก (เช่น คอมพิวเตอร์ เป็นต้น) ทาง Serial พอร์ต แต่ใน เครื่องวัดความหนาของฟิล์มบางนั้นไม่มีการติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอก พอร์ต 3 จึงไม่มีการใช้งาน สำหรับพอร์ต 4 จะมีหน้าที่เป็นตัวเชื่อมต่อการทำงานกับ Real Time Clock ซึ่งทำหน้าที่บันทึกวัน, เวลา และค่าความถี่สุดท้ายในการปลูกฟิล์มบาง ส่วนพอร์ต 5 จะเชื่อมต่อกับจอ LCD ซึ่งมีหน้าที่ในการแสดงผล

วงจรมับความถี่ (Frequency Counter)

สำหรับการวัดค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลงของคริสตอลนั้น เราจะใช้วงจรมับความถี่ (Frequency Counter) ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรมับความถี่ (Frequency Counter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

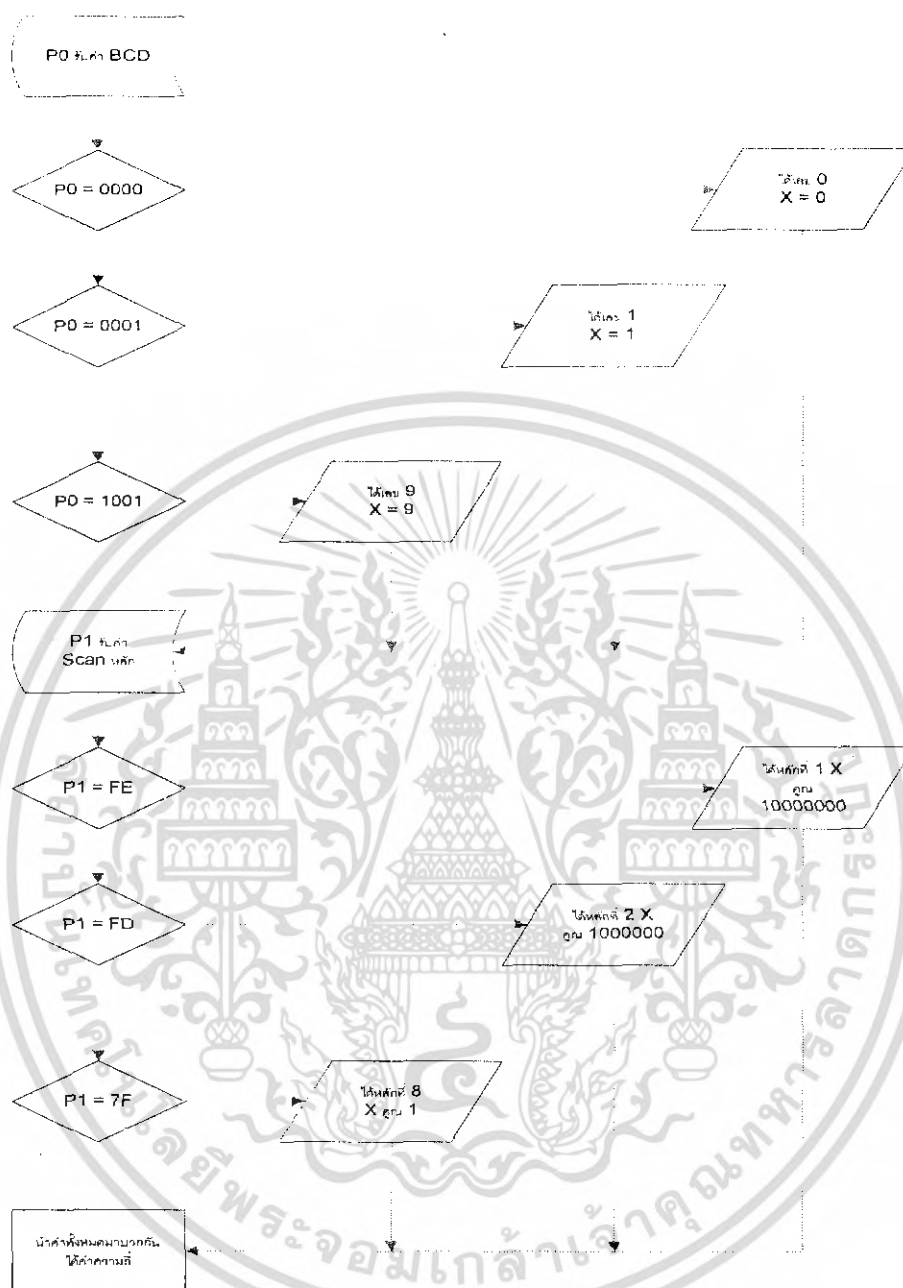
จากรูปที่ 3.3 ชิป ICM7226B จะมีหน้าที่รับค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลงจากคริสตอลเมื่อมีเนื้อสารมาเกาะในระบบการปลูกฟิล์มบาง ซึ่งจะมีการแสดงค่าที่วัดได้ออกมาทาง LED ชนิด 7-Segment โดยขา 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16 ของชิป ICM7226B จะมีหน้าที่เป็นตัวกำหนดการแสดงผลของแต่ละหลัก และขา 22, 23, 24, 26, 27, 28, 29, 30 ของชิป ICM7226B จะมีหน้าที่กำหนดค่าการแสดงผลตัวเลขของ 7-Segment (a, b, c, d, e, f, g, point) และขา 6, 7, 17, 18 จะให้เอาต์พุตออกมาในแบบ Binary Code Decimal (BCD) และจะทำการมีลติเพล็กซ์กับขา 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16 เพื่อทำการดึงค่าความถี่ที่แสดงผลออกไปทำการคำนวณในไมโครคอนโทรลเลอร์ AT89C51ED2 ต่อไป

รายละเอียดการรับค่า BCD และการสแกนหลักมีดังนี้

สำหรับรายละเอียดการรับค่า BCD และการสแกนหลักของวงจรนับความถี่ จะมีลำดับการทำงาน ดังรูปที่ 3.4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 Flowchart การรับค่า BCD และการสแกนหลักของวงจรมับความถี่

จากรูปที่ 3.4 เริ่มแรกไมโครคอนโทรลเลอร์รับ BCD ทางพอร์ต 1 และนำมาเทียบเป็นตัวเลข 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 และ 9 เมื่อได้ค่าตัวเลขที่ต้องการแล้วไมโครคอนโทรลเลอร์ก็จะมารับค่าการสแกนหลักทางพอร์ต 0 ซึ่งจะเป็นตัวบ่งบอกว่า เลขที่ได้นั้นมีค่าน้ำหนักเป็นเท่าใด เช่น รับ BCD เป็นเลข 1 และเป็นหลักที่ 8 ก็จะนำเลข 1 คูณกับ 10000000 หลักถัดมารับ BCD เป็นเลข 2 และเป็นหลักที่ 7 ก็จะนำเลข 2 คูณกับ 1000000 และไล่ลงไปจนครบ 8 หลัก จากนั้นนำค่า แต่ละหลักมาบวกกันก็จะได้เป็นความถี่ที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 การต่อวงจรต่างๆ

ในการต่อวงจรต่างๆ นั้น จะต้องทำการเตรียมอุปกรณ์และเลือกโหมดในการทำงานของแต่ละวงจร ดังนี้

วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ AT89C51ED2

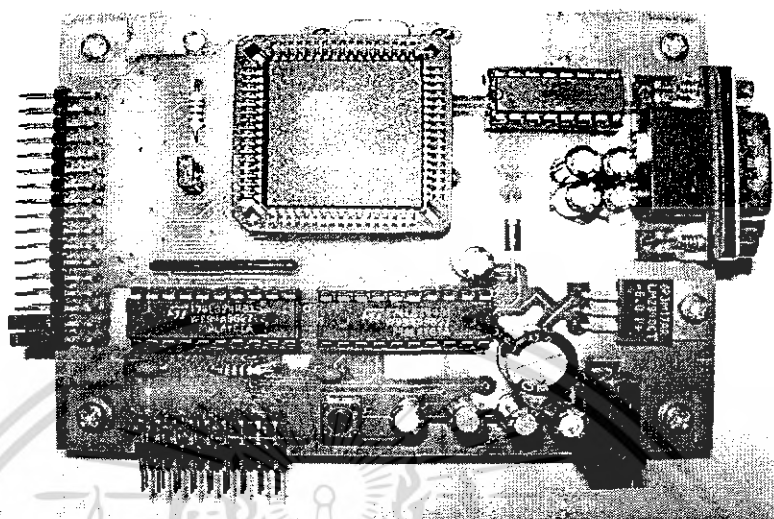
อุปกรณ์ที่ใช้มีดังนี้

- แผ่นลายวงจร	1 แผ่น
- ไอซีเบอร์ AT89C51ED2	1 ตัว
- ไอซีเบอร์ 74LS244	2 ตัว
- ไอซีเบอร์ MAX232A	1 ตัว
- LM2940	1 ตัว
- ไดโอดเบอร์ IN4007	1 ตัว
- DC JACK	1 ตัว
- CONNECTOR DB9	1 ตัว
- CONNECTOR 18 ขา	1 ตัว
- CONNECTOR 34 ขา	1 ตัว
- LED	1 ตัว
- JUMPER	1 ตัว
- SWITCH RESET	1 ตัว
- CRYSTAL 11.0592 MHz	1 ตัว
- ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรไลต์ 470 μ F	1 ตัว
- ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรไลต์ 10 μ F	6 ตัว
- ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรไลต์ 0.1 μ F	2 ตัว
- ตัวเก็บประจุชนิดเซรามิก 0.1 μ F	3 ตัว
- ตัวเก็บประจุชนิดเซรามิก 10 Pf	2 ตัว
- ตัวต้านทาน 560 Ω	1 ตัว
- ตัวต้านทาน 8.4 k Ω	1 ตัว
- ตัวต้านทานแบบแพ็ค 9 ขา 4.7K Ω	1 ตัว

เมื่อทำการเตรียมอุปกรณ์ครบแล้ว จึงทำการประกอบอุปกรณ์ต่างๆ ลงบนแผ่นปริ้นท์ที่กัด

เป็นลายวงจรออกมาเรียบร้อยแล้ว ดังรูปที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AT89C51ED2

วงจรมับความถี่ (Frequency Counter)

อุปกรณ์ที่ใช้มีดังนี้

- ICM7226B	1 ตัว
- ดิพสวิทช์	2 ตัว
- สวิตช์กดติด - ปลดปล่อย	2 ตัว
- คริสตอล 10 MHz	1 ตัว
- ตัวเก็บประจุชนิดเซรามิก 30 pF	3 ตัว
- ตัวเก็บประจุชนิดเซรามิก 0.1 μ F	1 ตัว
- ตัวต้านทาน 10 k Ω	2 ตัว
- ตัวต้านทาน 100 k Ω	2 ตัว
- ตัวต้านทาน 22 M Ω	1 ตัว

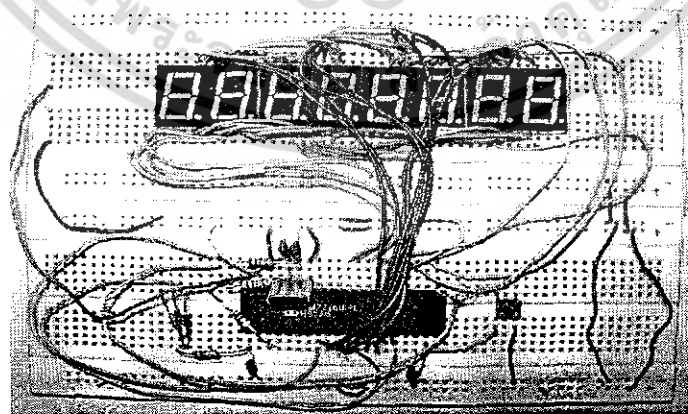
สำหรับการต่อวงจรมับความถี่ที่ใช้ในเครื่องวัดความหนาของฟิล์มบางนั้น จะมีโหมดการทำงานต่างๆ ดังตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 Multiplexed Input Function

INPUT	FUNCTION	DIGIT
FUNCTION INPUT Pin 4	Frequency	D1
	Period	D8
	Frequency Ratio	D2
	Time Interval	D5
	Unit Counter	D4
	Oscillator Frequency	D3
RANGE INPUT Pin 21	0.01s/1 Cycle	D1
	0.1s/10 Cycles	D2
	1s/100 Cycles	D3
	10s/1K Cycles	D4
	Enable External Range Input	D5
CONTROL INPUT Pin 1	Display Off	D4 and Hold
	Display Test	D8
	1MHz Select	D2
	External Oscillator Enable	D1
	External Decimal Point Enable	D3

จากตารางที่ 3.1 ที่ขา 4 ของ ICM7226B เราจะเลือกเชื่อมต่อกับ D1 ตามลายวงจร เนื่องจากเราได้ใช้งานเกี่ยวกับการวัดค่าความถี่ ส่วนขา 21 จะเลือกเชื่อมต่อกับ D1 ตามลายวงจร เพื่อเลือกใช้ Range Input ที่เร็วมากที่สุด และขา 1 จะเลือกเชื่อมต่อกับ D8 ตามลายวงจร เพื่อเลือกเป็นแบบ Display Test ซึ่งเป็นโหมดที่ 7-Segment นั้น มีการทำงานตลอดเวลา โดยวงจรจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 บอร์ดวงจรนับความถี่ (Frequency Counter)

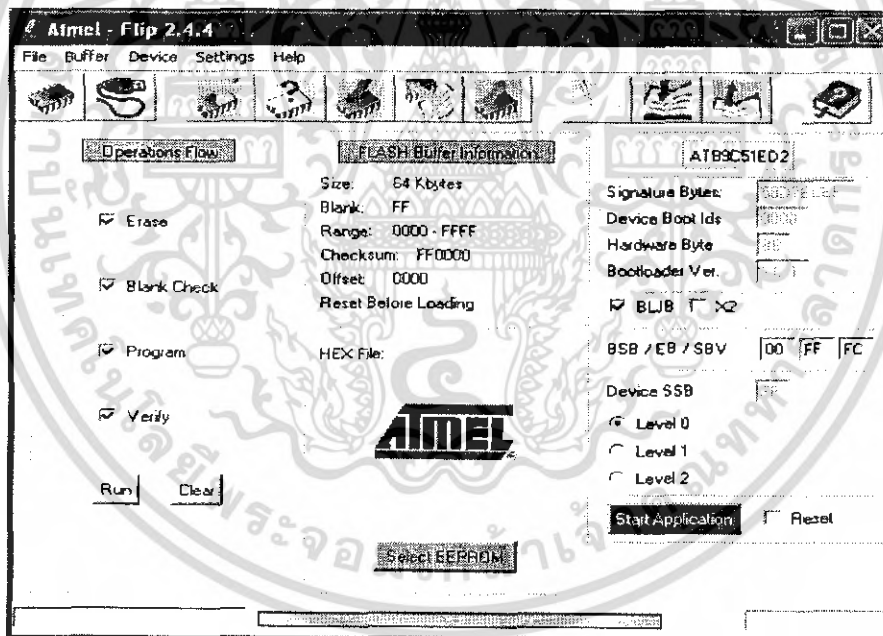
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การทดสอบการทำงานของฮาร์ดแวร์

เมื่อทำการต่อวงจรต่างๆ เสร็จเรียบร้อยแล้ว เราจึงต้องมีการทดสอบการทำงานของวงจร เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและดูประสิทธิภาพในการทำงานให้ได้ตรงตามต้องการ ก่อนนำไปใช้งานจริงๆ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการสร้างเครื่องวัดความหนาของฟิล์มบาง

วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ AT89C51ED2

เราสามารถทดลองวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ AT89C51ED2 ได้โดยการอัดโปรแกรมลงในหน่วยความจำแบบแฟลชของไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งจะต้องอาศัยโปรแกรม Flip Loader ของบริษัท Atmel เป็นตัวช่วยในการอัดโปรแกรม จากนั้นทำการรันโปรแกรมผ่านทาง Terminal เพื่อสังเกตการทำงานและการแสดงผลของไมโครคอนโทรลเลอร์ว่าสามารถทำงานได้จริงตามที่ออกแบบไว้



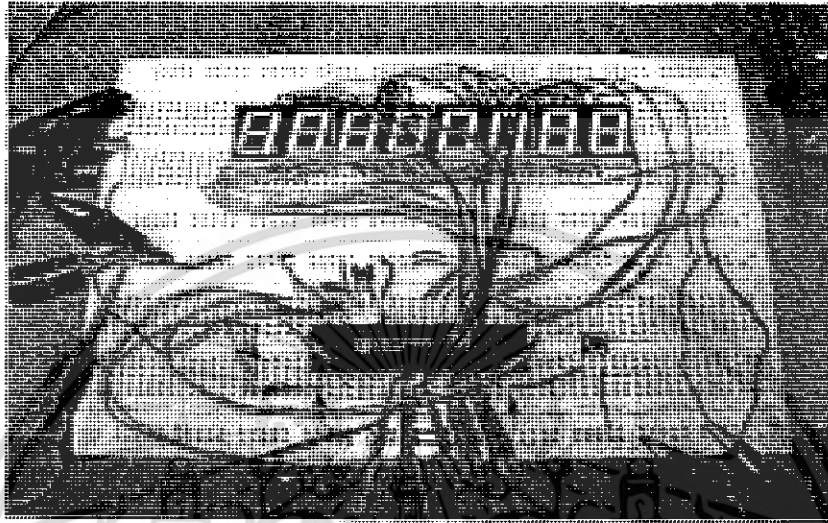
รูปที่ 3.7 แสดงโปรแกรม Flip Loader

วงจรมับความถี่ (Frequency Counter)

ในการทดสอบการวัดค่าความถี่ของวงจรมับความถี่ เราสามารถทำได้โดยการป้อนสัญญาณจาก Function Generator แล้วสังเกตการแสดงผลทาง 7-Segment ของวงจรมับความถี่ ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าที่วัดได้นั้นมีความถูกต้องและแม่นยำ โดยการนำค่าที่วัดได้มาเทียบกับค่าความถี่ที่วัดจาก Oscilloscope

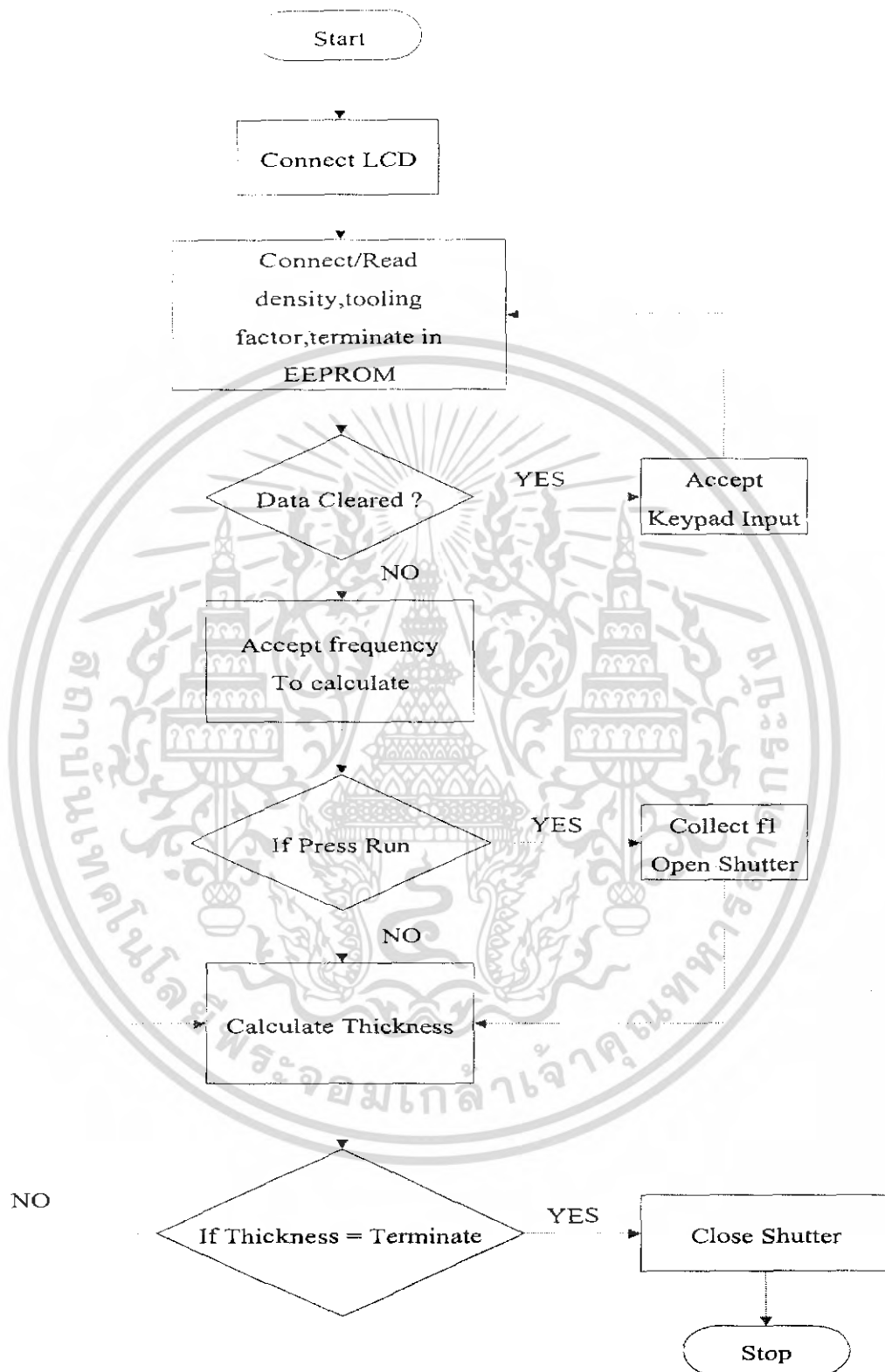


รูปที่ 3.8 การแสดงผลทาง 7-Segment ของวงจรมับความถี่

3.3 ขั้นตอนการออกแบบซอฟต์แวร์ (Software Design)

สำหรับซอฟต์แวร์ที่ใช้ในเครื่องวัดความหนาของฟิล์มบางนั้น เราจะใช้คอมไพเลอร์ของ Keil ในการเขียนโปรแกรม ซึ่งจะมีลำดับการทำงานของโปรแกรม ดังรูปที่ 3.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 Flowchart การทำงานของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.9 เมื่อเริ่มการทำงานไมโครคอนโทรลเลอร์จะติดต่อกับจอ LCD ให้เริ่มทำงาน และคอยให้พร้อมแสดงค่า จากนั้นจะตรวจดูว่ามีการเคลียร์ค่าความหนาแน่นของสารที่จะใช้ในการปลูกฟิล์มบาง ค่า Tooling factor และความหนาสุดท้ายของฟิล์มบางที่ต้องการ ซึ่งค่าเหล่านี้จะเก็บค่าอยู่ใน EEPROM แล้วจะรับค่าความหนาแน่นและความหนาที่ต้องการมาเก็บไว้ในหน่วยความจำ เพื่อใช้ในการคำนวณต่อไป ถัดมาจะให้ จากนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์จะรับค่า BCD จากวงจรนับความถี่ทางพอร์ต 4 และรับค่าการสแกนหลักจากวงจรนับความถี่ทางพอร์ต 0 นำค่าทั้งสองมาคำนวณเป็นค่าความถี่ของควอทซ์คริสตอล ซึ่งในตอนแรกเมื่อทำการปลูกฟิล์มจะกดปุ่ม RUN ซึ่งโปรแกรมจะทำการเก็บค่าความถี่ของควอทซ์คริสตอลก่อนปลูกฟิล์มเป็นค่าคงที่ ที่ให้นำไปเปรียบเทียบกับค่าความถี่ขณะทำการปลูกฟิล์ม และเริ่มเปิดชัตเตอร์ แต่ถ้าหากเริ่มปลูกฟิล์มหรืออยู่ในระหว่างการปลูกฟิล์ม ทำการคำนวณค่าความถี่ที่เข้ามาเป็นความหนาตามปกติ และแสดงค่าความหนาออกทางจอ LCD ต่อจากนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์จะตรวจสอบว่าค่าความหนาที่คำนวณไปนั้นเท่ากับค่าความหนาที่ได้ตั้งไว้ในตอนแรกหรือยัง หากยังไม่เท่าไมโครคอนโทรลเลอร์ก็จะไปทำการรับความถี่แล้วแปลงเป็นความหนาตามขั้นตอนข้างต้น แต่เมื่อความหนาที่ได้เท่ากับค่าที่ได้ตั้งไว้แล้วไมโครคอนโทรลเลอร์ก็จะสั่งให้เครื่องปลูกฟิล์มปิดชัตเตอร์

เมื่อระบบต่างๆ ทั้งระบบฮาร์ดแวร์ ระบบซอฟต์แวร์ และในส่วนการทดสอบการทำงาน ของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์สามารถทำงานได้ตามต้องการแล้ว ก็จะนำเครื่องวัดความหนาของฟิล์มบางที่ได้ออกแบบไว้ ไปทดลองวัดความหนากับระบบปลูกฟิล์มจริงๆ โดยวัดสอบเทียบกับเครื่องวัดความหนาของฟิล์มบางที่ได้มาตรฐาน เพื่อนำมาปรับปรุงระบบต่างๆ ที่ออกแบบไว้ให้วัดความหนาได้แม่นยำมากขึ้น

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

จากในขั้นตอนแรกที่ใช้ฟังก์ชันเจเนอเรเตอร์เป็นตัวจำลองแหล่งกำเนิดสัญญาณความถี่ แทนคริสตอลในระบบเครื่องปลูกฟิล์ม เมื่อสามารถแสดงค่าความถี่ได้ถูกต้องแล้ว ในขั้นตอนนี้จะนำเครื่องวัดความหนาของฟิล์มบางที่ได้ออกแบบไว้ ไปทดลองวัดความหนากับระบบปลูกฟิล์มจริงๆ โดยวัดสอบเทียบกับเครื่องวัดความหนาของฟิล์มบางที่ได้มาตรฐาน เพื่อนำมาปรับปรุงระบบการคำนวณค่าความหนาให้วัดความหนาได้อย่างแม่นยำ

4.1 วิธีการทดลอง

1. เปิดระบบเครื่องปลูกฟิล์มและเปิดเครื่องวัดความหนาของฟิล์มบาง FTM7 ซึ่งจะใช้เป็นเครื่องวัดความหนามาตรฐานที่จะใช้สอบเทียบ และเปิดเครื่องวัดความหนาของฟิล์มบางที่นำมาทดสอบ
2. เลียบสายสัญญาณจากคริสตอลในระบบเครื่องปลูกฟิล์มเข้ากับเครื่องวัดความหนาของฟิล์มบางทั้ง 2 เครื่อง
3. ทำการป้อนค่าความหนาแน่นของเนื้อสารที่ใช้ปลูก และค่า Tooling Factor ของเครื่องวัดความหนาของฟิล์มบางที่นำมาทดสอบให้เท่ากับเครื่อง FTM7
4. กดปุ่ม RUN เมื่อเริ่มทำการปลูกฟิล์มพร้อมกันทั้งสองเครื่อง จากนั้นสังเกตค่าความหนาที่ได้พร้อมทั้งจดบันทึก
5. นำข้อมูลที่ได้อ่านวิเคราะห์หาค่าความคลาดเคลื่อน และนำมาพล็อตกราฟหาสมการปรับแก้ค่าความคลาดเคลื่อน
6. นำสมการปรับแก้ที่ได้จากการทดลองไปปรับแก้สมการที่ใช้ในการคำนวณในเครื่องวัดความหนาของฟิล์มบาง
7. ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 1 – 6 จนกว่าจะได้ค่าความหนาจากเครื่องวัดความหนาของฟิล์มบางที่นำมาทดสอบตรงกับเครื่อง FTM7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบที่ใช้ในการทดสอบ

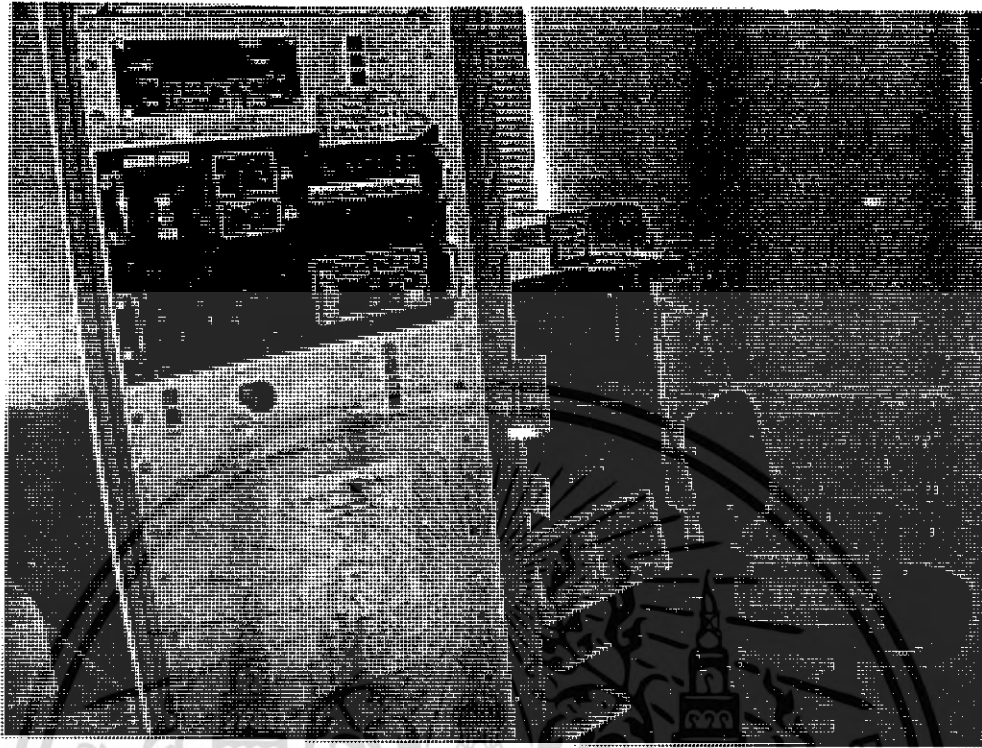


รูปที่ 4.1 แสดงเครื่องวัดความหนาของฟิล์มบาง



รูปที่ 4.2 แสดงระบบที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดงเครื่องวัดความหนาของฟิล์มบางกับระบบปลุกฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ใช้ในการคำนวณ

$$T = t \frac{f_1 - f_2}{\rho k A} \quad \text{----- (4.1)}$$

เมื่อ	T	คือความหนาของฟิล์มบาง
	t	คือ Tooling factor
	f_1	คือความถี่ของคริสตอลก่อนปลูกฟิล์ม
	f_2	คือความถี่ของคริสตอลขณะปลูกฟิล์ม
	ρ	คือความหนาแน่นของสารที่ใช้ปลูกฟิล์ม
	k	คือ Sensitivity ของคริสตอล
	A	คือพื้นที่ของคริสตอล

หมายเหตุ

การทดลองครั้งที่ 1

$$t = 1$$

$$\rho = 7.2$$

$$k = 48648700000000$$

$$A = 1$$

การทดลองครั้งที่ 2

$$t = 1$$

$$\rho = 7.2$$

$$k = 1$$

$$A = 0.000154$$

การทดลองครั้งที่ 3 และ 4

$$t = 3.1$$

$$\rho = 7.2$$

$$k = 1$$

$$A = 0.000154$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

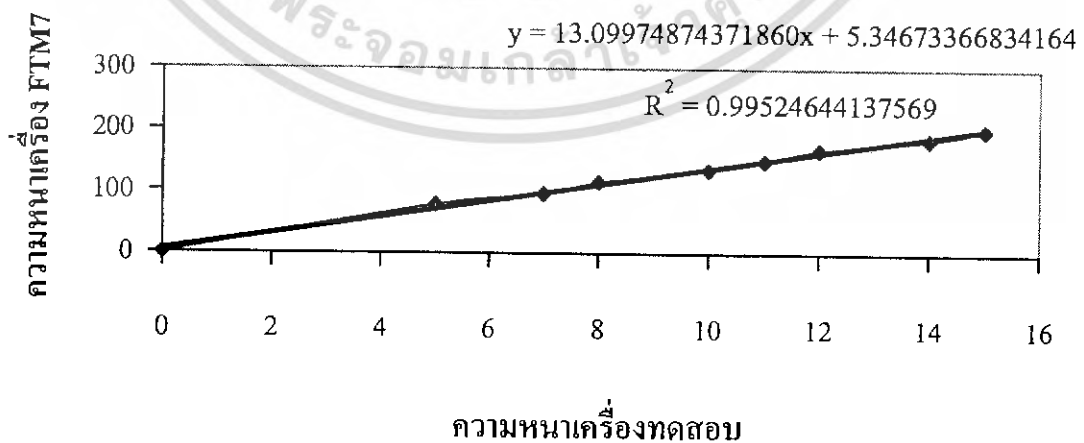
4.2 ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองครั้งที่ 1

f(kHz)	T(nm)	T-ftm7(nm)	T(ปรับแก้แล้ว)	ค่า error(%)
5887.1	0	0	0	0
5883	5	77.8	71	8.92
5882	7	95.6	97	1.49
5881	8	114.2	110	3.59
5880	10	133.7	136	1.92
5879	11	148.8	149	0.36
5878	12	167.2	162	2.86
5877	14	184.4	189	2.27
5876	15	200.6	202	0.53

กราฟการสอบเทียบครั้งที่ 1

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาที่ได้จากเครื่องวัดความหนาของฟิล์มบางทั้งสองเครื่อง



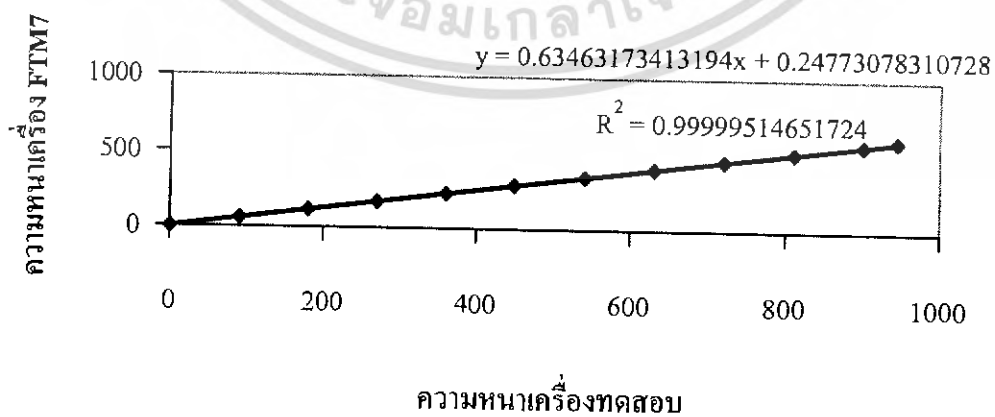
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองครั้งที่ 2

f(kHz)	T(nm)	T-ftm7(nm)	T(ปรับแก้แล้ว)	ค่า error (%)
5785.4	0	0	0	0
5784.4	90	58	57	1.41
5783.4	180	114.5	114	0.08
5782.4	270	171.4	172	0.14
5781.4	360	228.5	229	0.09
5780.4	450	286.3	286	0.07
5779.4	541	343.5	343	0.05
5778.4	631	400.4	401	0.04
5777.4	721	457.2	458	0.13
5776.4	811	514.8	515	0.04
5775.4	901	571.8	572	0.08
5774.9	945	600.9	600	0.20

กราฟการสอบเทียบครั้งที่ 2

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาที่ได้จากเครื่องวัดความหนาของฟิล์มบางทั้งสองเครื่อง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

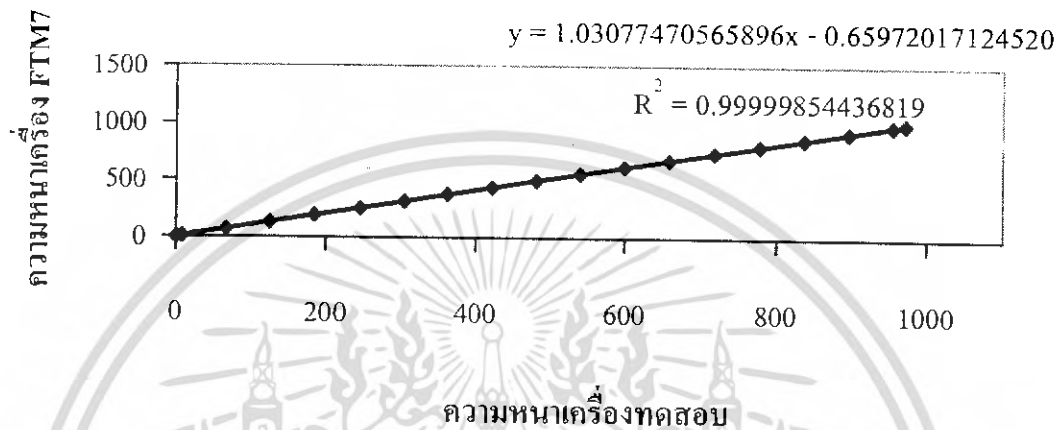
ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองครั้งที่ 3

f(kHz)	T(nm)	T-ftm7(nm)	T(ปรับแก้แล้ว)	ค่า error (%)
5624.14	0	0.0	0	0
5624	8	8.0	8	0.00
5623	67	68.0	68	0.00
5622	126	129.5	129	0.39
5621	185	190.0	190	0.00
5620	244	250.0	251	0.40
5619	303	311.7	312	0.10
5618	362	372.9	372	0.24
5617	422	433.9	434	0.02
5616	481	494.7	495	0.06
5615	540	555.6	556	0.07
5614	599	616.7	617	0.05
5613	658	677.7	678	0.04
5612	717	738.7	739	0.04
5611	777	800.0	800	0.00
5610	836	861.0	861	0.00
5609	895	922.2	922	0.02
5608	954	983.3	983	0.03
5607.73	971	1000.0	1000	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟการสอบเทียบครั้งที่ 3

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาที่ได้จากเครื่องวัดความหนาของฟิล์มบางทั้งสองเครื่อง



ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองครั้งที่ 4

f(kHz)	T(nm)	T-ftm7(nm)	ค่า error (%)
5558.22	0.0	0	0.00
5557.22	60.0	62.6	4.15
5556.22	121.0	124.7	2.97
5555.22	182.0	187.4	2.88
5554.22	253.0	259.9	2.65
5553.22	304.0	312.4	2.69
5552.22	365.0	375.2	2.72
5551.22	426.0	437.9	2.72
5550.22	487.0	500.2	2.64
5549.22	548.0	563.2	2.70
5548.22	609.0	625.2	2.59
5547.22	670.0	688.1	2.63
5547.03	682.0	700	2.57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 อภิปรายผลการทดลอง

ในการทดลองสิ่งที่เราวัดได้นั้นคือความถี่ในการสั่นของคริสตอล ซึ่งตัวคริสตอลนั้นจะสั่นอยู่ที่ความถี่ค่าหนึ่ง แต่เมื่อมีมวล (ซึ่งคือสารที่ใช้ระเหย) ไปเกาะที่ผิวหน้าของคริสตอลจะทำให้คริสตอลมีความถี่ในการสั่นลดลง เนื่องจากมวลที่มาเกาะทำให้สั่นได้ยากขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงสามารถนำค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปมาคำนวณเทียบเป็นความหนาของฟิล์มบางที่มาเกาะได้

เมื่อนำเครื่องวัดความหนาของฟิล์มบางไปวัดสอบเทียบกับเครื่องวัดมาตรฐาน (FTM7) พบว่าค่าความหนาที่ได้นั้นผิดจากความเป็นจริงไปมาก จึงต้องทำการปรับสมการและใช้สมการปรับแก้ค่ามาช่วยในการวัด ซึ่งค่าที่ออกมาหลังการปรับแก้กันนั้นมีความคลาดเคลื่อนน้อยมาก โดยสมการปรับแก้ที่ใช้คือ

$$Y = (2.11521368469 \times 10^{-14} \times T) - 1.68831722831396 \times 10^{-11} \quad \text{----- (4.2)}$$

$$Z = (1.03101423794093 \times Y) - 2.36394033984895 \times 10^{-10} \quad \text{----- (4.3)}$$

โดย ค่า T คือ ค่าความหนาของชั้นฟิล์มบางที่เราคำนวณออกมาได้ก่อนการปรับแก้สมการ
 ค่า Y คือ ค่าความหนาของชั้นฟิล์มบางที่เราคำนวณออกมาได้หลังการปรับแก้ครั้งที่ 1
 ค่า Z คือ ค่าความหนาของชั้นฟิล์มบางที่เราคำนวณออกมาได้หลังการปรับแก้ครั้งที่ 2

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการนำเครื่องวัดความหนาฟิล์มบางไปเชื่อมต่อกับระบบปลูกฟิล์มและทำการสอบเทียบกับเครื่อง FTM7 พบว่า

ในส่วนของการสอบเทียบการตรวจนับความถี่ของคริสตอลที่วางอยู่ในระบบปลูกฟิล์มบางนั้น เครื่องวัดความหนาของฟิล์มบางสามารถวัดค่าความถี่ได้ตรงกับเครื่อง FTM7

แต่ในส่วนของการสอบเทียบการคำนวณค่าความถี่ไปเป็นความหนานั้น ค่าความหนาที่วัดออกมาได้นั้น มีค่าไม่ตรงกับค่าจริงของชั้นฟิล์มที่เทียบกับเครื่อง FTM7 จึงทำให้เราต้องกำหนดค่า Tooling Factor ของระบบขึ้นมาเพื่อปรับค่าสมการการคำนวณให้ถูกต้องยิ่งขึ้น และเมื่อนำผลการทดลองที่วัดได้หลังจากเพิ่มค่า Tooling Factor ปรากฏว่าค่าที่วัดได้ยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่ เราจึงทำการสร้างสมการปรับค่าขึ้นมาอีก เมื่อนำไปทำการวัดความหนาของชั้นฟิล์มอีกครั้ง ปรากฏว่าค่าความหนาที่วัดได้มีความถูกต้องแม่นยำใกล้เคียงกับเครื่อง FTM7 โดยมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยซึ่ง แสดงว่าเราสามารถนำเครื่องวัดความหนาของฟิล์มบางนี้ไปใช้งานได้จริง

5.2 ข้อเสนอแนะ

คาดว่าถ้าหากเพิ่มความละเอียดตำแหน่งจุดทัศนียมในการคำนวณความถี่ของเครื่องก็จะสามารถช่วยให้เครื่องวัดความหนาของฟิล์มบางวัดได้ละเอียดขึ้น

สมการที่ใช้ในการคำนวณเดิมเป็น

$$T = t \frac{f_1 - f_2}{\rho k A} \quad \text{----- (5.1)}$$

เมื่อ	T	คือความหนาของฟิล์มบาง
	t	คือ Tooling factor
	f_1	คือความถี่ของคริสตอลก่อนปลูกฟิล์ม
	f_2	คือความถี่ของคริสตอลขณะปลูกฟิล์ม
	ρ	คือความหนาแน่นของสารที่ใช้ปลูกฟิล์ม
	k	คือ Sensitivity ของคริสตอล
	A	คือพื้นที่ของคริสตอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และมีการปรับแก้ค่าด้วยสมการ

$$Y = (2.11521368469 \times 10^{-14} \times T) - 1.68831722831396 \times 10^{-11} \quad \text{----- (5.2)}$$

$$Z = (1.03101423794093 \times Y) - 2.36394033984895 \times 10^{-10} \quad \text{----- (5.3)}$$

โดย ค่า T คือ ค่าความหนาของชั้นฟิล์มบางที่เราคำนวณออกมาได้ก่อนการปรับแก้สมการ
 ค่า Y คือ ค่าความหนาของชั้นฟิล์มบางที่เราคำนวณออกมาได้หลังการปรับแก้ครั้งที่ 1
 ค่า Z คือ ค่าความหนาของชั้นฟิล์มบางที่เราคำนวณออกมาได้หลังการปรับแก้ครั้งที่ 2

แต่ถ้ามีการเพิ่มค่า ความหนาแน่นของตัวคริสตอลเอง, Acoustic impedance (Z – value) เข้า
 ไปน่าจะช่วยให้การคำนวณแม่นยำมากขึ้นอีกตามสมการที่เครื่อง FTM7 ใช้

$$T = \frac{\rho_q}{\rho} \cdot N_q \cdot \frac{Z_f}{\pi Z_q f_2} \cdot \tan^{-1} \left\{ \frac{Z_q}{Z_f} \cdot \tan \left[\pi \left(1 - \frac{f_2}{f_1} \right) \right] \right\} \quad \text{----- (5.4)}$$

เมื่อ ρ_q คือความหนาแน่นของคริสตอล
 N_q คือค่าคงที่ความถี่ของคริสตอลในเชิงความหนา
 Z_f คือ Acoustic impedance ของสารที่ใช้ปลูก
 Z_q คือ Acoustic impedance ของคริสตอล

เอกสารอ้างอิง

Smith, Donald L. 1995. **Thin – film deposition: principles and practice.** New York: McGraw – Hill.

Viitala, Tapani. 2004. **WHAT IS A QUARTZ CRYSTAL MICROBALANCE – QCM.**
<http://www.pharmaceutical-int.com/categories/qcm-technology/what-is-a-quartz-crystal-microbalance-qcm.asp>. KSV Instruments Ltd

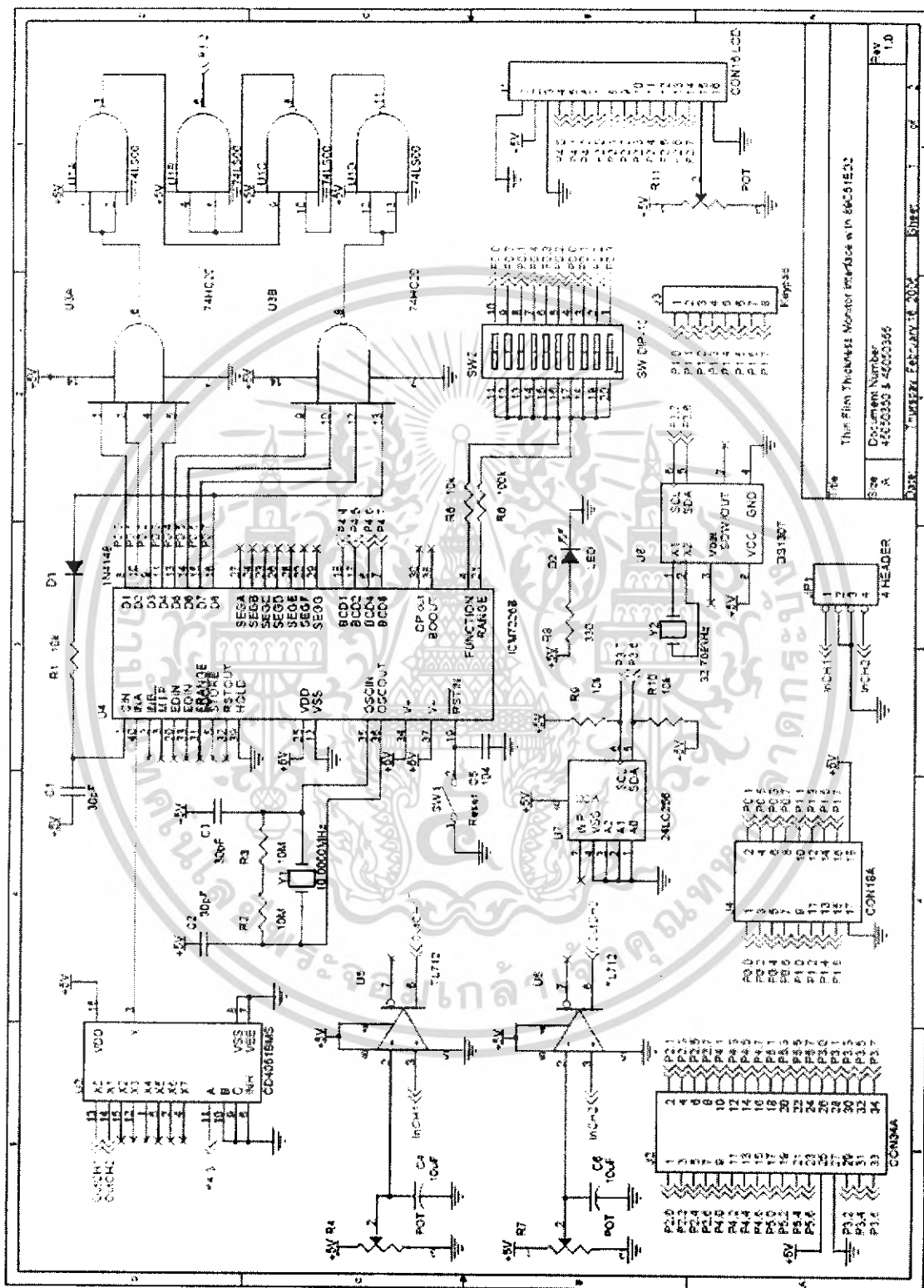
Jauch Quartz GmbH. 2002. **Quartz Crystal Theory.** <http://www.jauch.de>.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



This Thinness Monitor interface with 66C81E52
 Document Number
 4550355 & 4550356
 DATE: 10/10/2000
 SHEET: 1/1
 Rev: 1.0

รูปแสดงวงจรของเครื่องวัดความหนาของฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้