หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ ๔

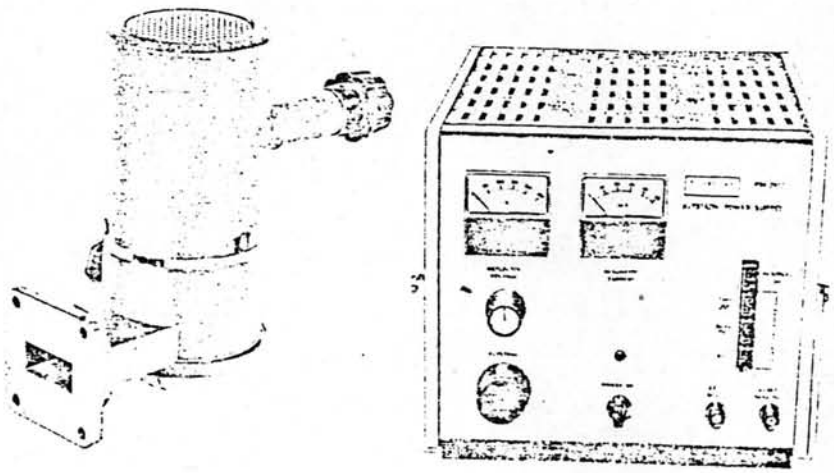
การวัดค่าคงที่ฉนวนที่ความถี่ไมโครเวฟ

ในการทดลองวัดค่าคงที่ ฉนวนของสารละลายผลึกเหลวนีมาติก โดยอาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่ไมโครเวฟ เราส่งคลื่นไมโครเวฟไปในสายส่ง (transmition line) ทั้งนี้เพื่อป้องกันการสูญเสียพลังงานสายส่งที่ใช้ในการทดลองเป็นท่อนำคลื่น (wavegiude) แบบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เรียกว่า ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม (rectangular wavegiude) สิ่งที่สำคัญในการทดลองเราต้องวัดสัมประสิทธิการสะท้อน (หรือ ρ และ Θ) ที่ผิวของสาร

๔.๑ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

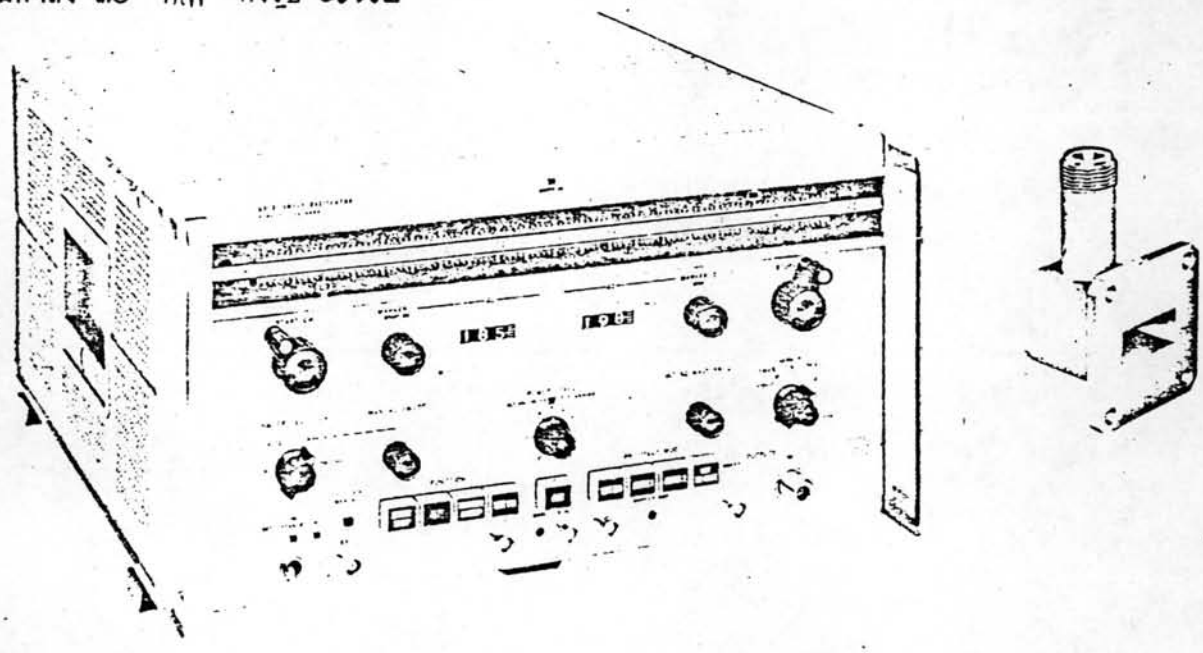
๔.๑.๑ เครื่องกำเนิดไมโครเวฟ

ก. Krystron tube ของบริษัทPhillips Model PM 7011x ซึ่งให้สัญญาณในช่วง ๘.๕ – ๙.๖ GHz ด้วยกำลัง ๔๐ mW มีความแน่นอน ๐.๐๐๑ GHz ต้องใช้เครื่องมือส่งกำลัง (power supply) Model PM 7812 ดังรูป ๔.๑.๑



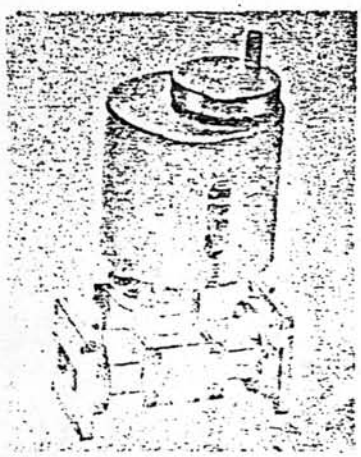
รูปที่ ๔.๑.๑(ก) ไครสตรอน (ข) เพาเวอร์ซัพพลาย

ข. Sweep oscillator ของบริษัท Hewlett Packard Model HP694B กำเนิดขึ้นโดยอาศัยหลักbackward wave oscillator tubeให้ความถี่ในช่วง ๘.๐ – ๑๒.๔ GHz มีกำลัง ๓๐ mW ดังรูป ๔.๑.๒



รูปที่ ๔.๑.๒ Sweep oscillator HP 694B และ Adapter 354C

๔.๑.๒ เครื่องวัดความถี่ (Wave meter) เป็นเครื่องมือสำหรับใช้วัดความถี่ของคลื่นในท่อนำคลื่น เป็นของบริษัทPhillips Model PM 7070X ab มีลักษณะเป็นกล่องอภินาทสำหรับโมด TE_{101} ภายในเป็นโพรงกลม (cylendrical cavity) ซึ่งสามารถปรับปริมาตรของโพรงนี้ได้ ดังนั้นความถี่อภินาท(resonance frequency)จึงขึ้นกับความสูงของกล่องที่เราสามารถปรับได้โดยมีตัวเลขบนหน้าปัดบอกจนมีปริมาตรพอเหมาะในการวัดเราแต่งให้ความถี่อภินาทของกล่องเท่ากับความถี่ของสัญญาณในท่อนำคลื่นขณะนั้น ซึ่งขณะที่เกิดอภินาทกล่องอภินาทจะดูดกลืนสัญญาณที่ผ่านลดลง เครื่องมือนี้อ่านค่าได้ละเอียด±๐.๑ %

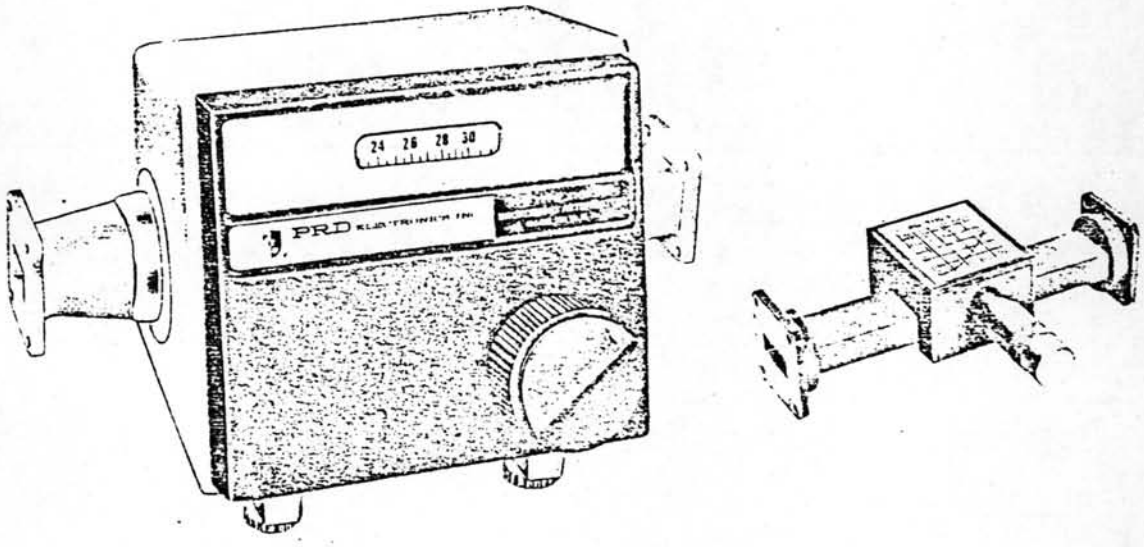


รูปที่ ๔.๑.๓ เวฟมิเตอร์

๔.๑.๓ เครื่องลดสัญญาณ (Attenuator)

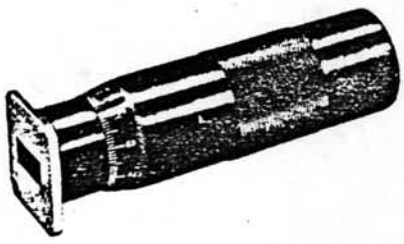
๔.๑.๓ ก. PM 7110X ของ Phillips ใช้ลดความเข้มของสัญญาณลงในช่วง ๐ – ๓๕ dB มีความละเอียด ๑๐ % เป็นชนิดแผ่นเคลื่อนที่

๔.๑.๓ ข. X 101 ของ PRD ใช้ลดสัญญาณในช่วง ๐ – ๖๐ dB มีความแม่นยำ ๒ % เครื่องลดสัญญาณนี้ทำให้เฟสของคลื่นที่ผ่านเปลี่ยนไปน้อยมาก เป็นชนิดแผ่นหมุน (rotary wane attenuator)



รูปที่ ๔.๑.๔ แอทเทนูเอเตอร์ Attenuator PM 7110X และ X 101

๔.๑.๔ พลันเจอร์ (Plunger) เป็นท่อนำคลื่นปลายปิดด้วยแผ่นโลหะ เพื่อให้คลื่นสะท้อนที่ผิวโลหะนี้ แผ่นโลหะนี้สามารถเคลื่อนไปมาได้ จึงทำให้เราสามารถเปลี่ยนเฟสของคลื่นไมโครเวฟได้ เครื่องมือนี้สามารถบอกตำแหน่งละเอียดถึง ๐.๐๒ มิลลิเมตร



รูปที่ ๔.๑.๕ พลันเจอร์ (Plunger)

๔.๑.๕ แมจิกที (Magic Tee)

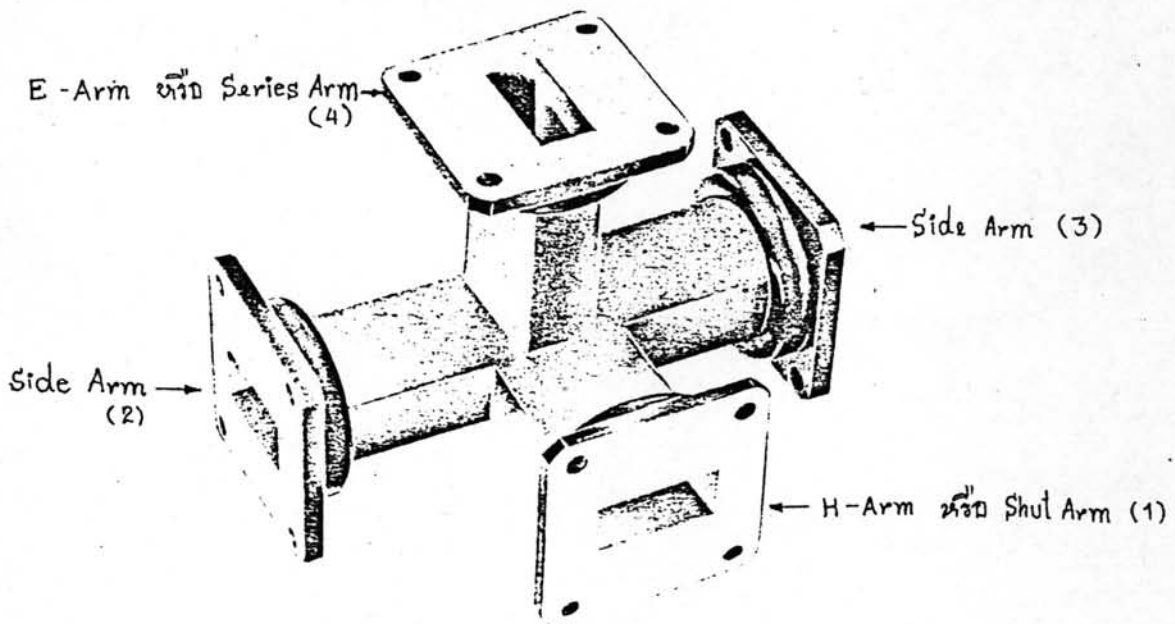
ก. ส่วนประกอบ เป็นท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าต่อกันดังรูป

๑. แขน H หรือ ชันท์ (shut arm) เรียกว่า ขา ๑

๒. แขนข้าง (side arm) เรียกว่า ขา ๒ และ ขา ๓

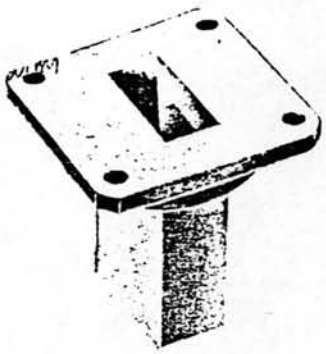
๓. แขน E หรือ แขนอนุกรม (series arm) เรียกว่า ขา ๔

ข. สมบัติ ถ้าสัญญาณเข้าขา ๑ จะแยกออกทางขา ๒ และ ขา๓ โดยมีเฟส และอัมพลเท่ากัน โดยไม่มีสัญญาณออกทางขา ๔ เลย และถ้าสัญญาณที่วิ่งกลับจากขา ๒ และ ขา ๓ มีเฟสและอัมพลเท่ากันจะรวมกันออกทางขา ๑ โดยไม่ออกทางขา ๔ เลย ดังนั้นอาศัยสมบัติดังกล่าว เราสามารถเปรียบเทียบสัญญาณได้



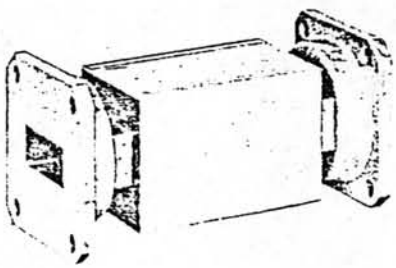
รูปที่ ๔.๑.๖ แมจิกที

๔.๑.๖ ท่อลัดวงจร(Shorted wavegiude) เป็นท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมปลายปิดด้วยแผ่นโลหะราบภายในฉาบทอง ใช้สำหรับใส่ผลึกเหลวที่จะวัดค่าคงที่ฉนวน



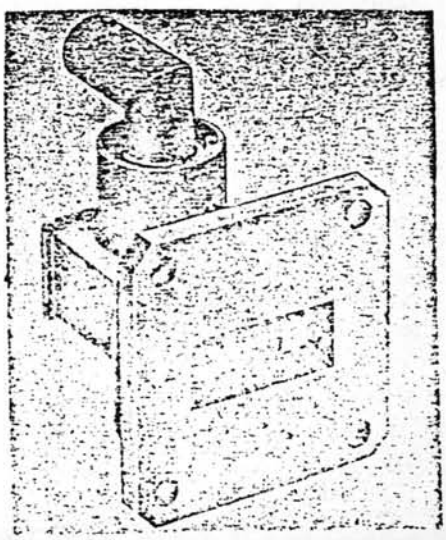
รูปที่ ๔.๑.๗ ท่อลักวงจร

๔.๑.๗ เครื่องกักสัญญาณกลับ (Isolator) ใช้กักสัญญาณของคลื่นไมโครเวฟที่สะท้อนกลับ เพื่อไม่ให้เข้าเครื่องกำเนิดสัญญาณ เพราะจะทำให้เครื่องกำเนิดสัญญาณเสื่อมคุณภาพได้



รูปที่ ๔.๑.๘ เครื่องกักสัญญาณ

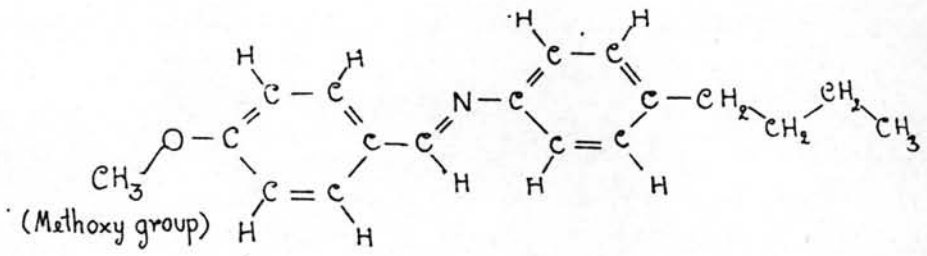
๔.๑.๘ เครื่องรับสัญญาณ (Signal detector) ใช้จับสัญญาณที่ขา ๔ ของแมจิกที เป็นเครื่องจับสัญญาณแบบผลึก (crystal diode) สัญญาณที่ได้ส่งไปยังออสโลสโคป (oscilloscope)



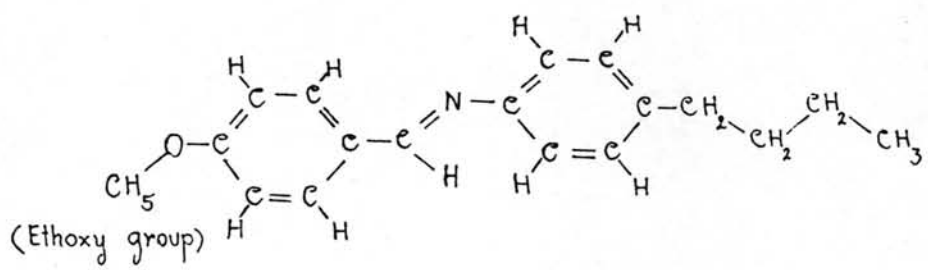
รูปที่ ๔.๑.๙ เครื่องรับสัญญาณ

๔.๒ การเตรียมสารที่ใช้ในการทดลอง

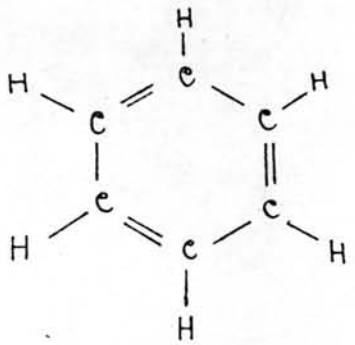
ในการทดลองวัดค่าคงที่ฉนวนของสารละลายผลึกเหลวแบบนีมาติกชนิด MBBA และชนิด EBBA เพื่อศึกษาไดโพลทางไฟฟ้าและเวลาผ่อนคลายของสารซึ่ง เป็นกุญแจสำคัญนำไปสู่ค่าคงที่ฉนวนรูปร่าง และ สมบัติบางประการของผลึกเหลวบริสุทธิ์ทั้งสองชนิด ในการทดลองผสมผลึกเหลวนี้กับเบ็นซิน เพื่อแยกให้โมเลกุลของผลึกเหลวอยู่ห่างกันจนทำให้แรงปฏิกริยาระหว่างไดโพลหมดไป



รูปที่ ๔.๒.๑ โครงสร้างของ MBBA (n-(p-methoxybenzyliden)-p-n-butylaniline) ซึ่ง ๑ mol = ๒๖๗ g



รูปที่ ๔.๒.๒ โครงสร้างของ EBBA (n-(p-ethoxybenzyliden)-p-n-butylaniline) ซึ่ง ๑ mol = ๒๘๑ g



รูปที่ ๔.๒.๓ โครงสร้างของ เบนซิน (C_6H_6) ซึ่ง ๑ mol = ๗๘ g

ในการผสมผลึกเหลวซึ่งเป็นตัวถูกละลาย กับ เบนซินซึ่งเป็นตัวทำละลาย ให้มีความเข้มข้นเป็นสัดส่วนโดยโมล (mole fraction) โดยกำหนดว่า

$$C_L = \frac{n_L}{n_L + n_B} \qquad (๔.๒.๑)$$

เมื่อ C_L เป็น โมลแฟรกชั่นของผลึกเหลว

n_L เป็น จำนวนโมลของผลึกเหลว

n_B เป็น จำนวนโมลของ เบนซิน

โดยที่

$$n_L = \frac{m_L}{A_L} \qquad (๔.๒.๒)$$

และ

$$n_B = \frac{m_B}{A_B} \qquad (๔.๒.๓)$$

เมื่อ m_L เป็น มวลของผลึกเหลวที่ใช้ผสม

A_L เป็น ๑ โมล ของผลึกเหลว

m_B เป็น มวลของ เบนซินที่ใช้ผสม

A_B เป็น ๑ โมล ของเบนซิน

ดังนั้น จากสมการ (๔.๒.๑),(๔.๒.๒) และ (๔.๒.๓) กลายเป็น

$$C_L = \frac{m_L/A_L}{m_L/A_L + m_B/A_B}$$

$$C_L = \frac{m_L A_B}{A_B m_L + A_L m_B} \qquad (๔.๒.๔)$$

จาก (๔.๓.๔) เขียนใหม่เป็น

$$m_\beta = \frac{A_B m_L (1 - C_L)}{A_L C_L} \qquad (๔.๒.๕)$$

$$m_L = \frac{A_L m_B C_L}{A_\beta (1 - C_L)} \qquad (๔.๒.๖)$$

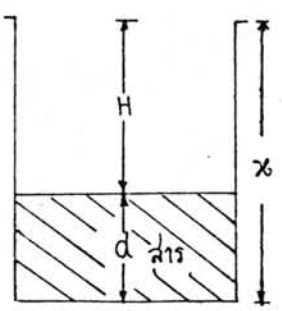
สมการ (๔.๒.๕) และ (๔.๒.๖) เป็นสมการสำหรับคำนวนมวลของผลึกเหลว และมวลของเบนซินที่ใช้ในการผสมเพื่อให้ได้โมลแฟรกชั่นตามต้องการ

๔.๓ <u>การวัดความหนาของผลึกเหลว</u>

ในการวัดความหนาของผลึกเหลวเราใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์ ซึ่งให้ความละเอียด ± ๐.๐๑ มิลลิเมตร ตอนแรกวัดความลึกของท่อน้ำคลื่นสั้น สมมุติให้เป็น x เซนติเมตร จากนั้นนำผลึกเหลวใส่ลงในท่อสั้น สมมุติให้หนา d เซนติเมตร แล้วทำการใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์วัดจากปากท่อน้ำคลื่นถึงผิวของผลึกเหลว สมมุติได้ H เซนติเมตร ดังรูป(๔.๓.๑)

ดังนั้นเราจะได้ว่า

$$d = x - H \qquad (๔.๓.๑)$$



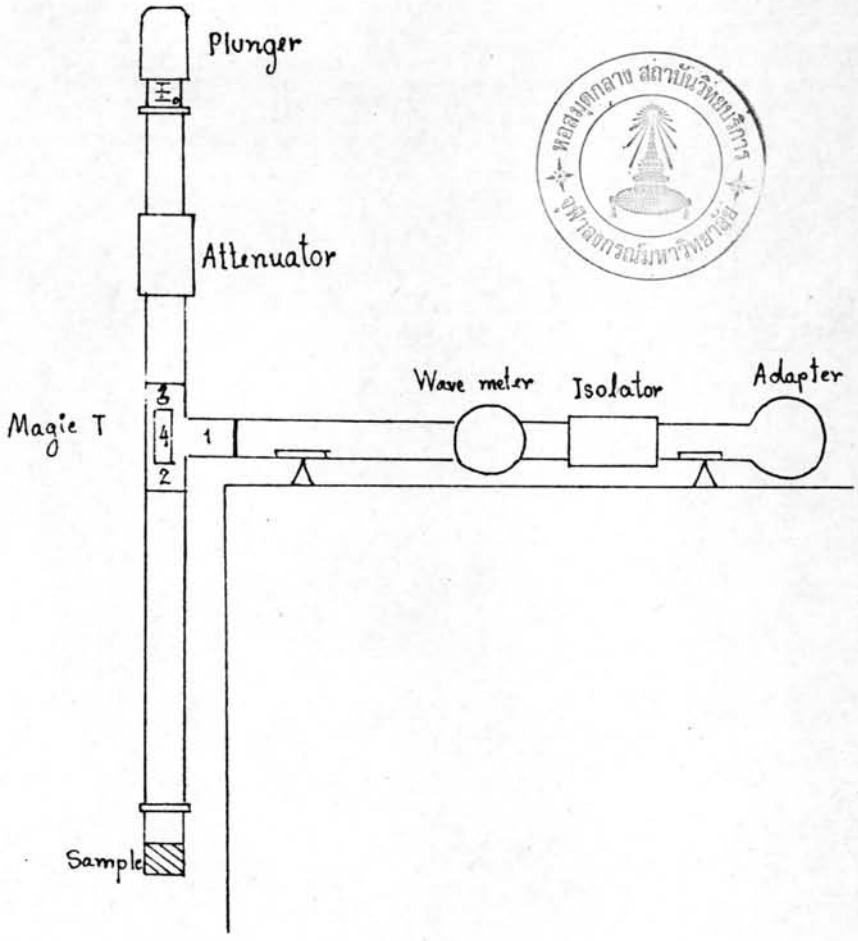
<u>รูป ๔.๓.๑</u> แสดงการวัดความหนาของผลึกเหลวในท่อน้ำคลื่นสั้น

ในการทดลองนี้ ใช้ท่อนำคลื่นสั้นซึ่งสูง ๕.๐๑๖ ± ๐.๐๐๕ เซนติเมตร กว้าง ๑.๐๒๑ ± ๐.๐๐๕ เซนติเมตร ยาว ๒.๒๘๖ ± ๐.๐๐๖ เซนติเมตร มีน้ำหนัก ๑๑๘.๘๔๕ กรัม

๔.๔ การวัดสัมประสิทธิการสะท้อนด้วยแมจิกที

เราจัดเครื่องมือการทดลองดังรูป (๔.๓.๒) เริ่มแรกเราวัดความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ไมโครเวฟโดยอาศัยเวฟมิเตอร์ การทดลองเราให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดเข้าทางขา ๑ ของแมจิกที จากนั้นสัญญาณไมโครเวฟจะถูกแยกเป็นสองส่วน โดยมีอัมพลและเฟสเท่ากัน ออกทางขา ๒ สู่ผลึกเหลวซึ่งบรรจุอยู่ในท่อสั้น และขา ๓ สู่แอทเทนูเอเตอร์ และ พลันเจอร์ จากนั้นสัญญาณก็จะสะท้อนกลับมารวมกันที่แมจิกที สัญญาณที่สะท้อนจากขา ๒ นั้น จะมีเฟสเปลี่ยนไปและถูกผลึกเหลวดูดกลืน (absorb) ไว้บางส่วน ทำให้อัมพลลดลงไม่เท่าเดิม เราปรับพลันเจอร์จนเฟสในขา ๒ และขา ๓ เท่ากัน จากนั้นนำค่าที่ได้ไปหา Θ ในสมการ (๓.๓.๒๒) ได้ จากนั้นลดสัญญาณไมโครเวฟในขา ๓ โดยอาศัยแอทเทนูเอเตอร์ เป็นตัวลดสัญญาณ ข้อสังเกต แอทเทนูเอเตอร์จะลดสัญญาณ ๒ ครั้ง ครั้งแรกออกจากแมจิกทีทางขา ๓ ผ่านแอทเทนูเอเตอร์ ไปยังพลันเจอร์ และสะท้อนกลับออกมา ผ่านแอทเทนูเอเตอร์อีกครั้งหนึ่งกลับสู่แมจิกที เราปรับแอทเทนูเอเตอร์จนอัมพลของคลื่นไมโครเวฟที่สะท้อนเข้าทั้งขา ๒ และขา ๓ เท่ากัน ตอนนี้สัญญาณจะไม่ผ่านเข้าขา ๔ เลย ตามคุณสมบัติของแมจิกที เราสังเกตได้จากออสซิลโลสโคปไม่มีสัญญาณออกเลย เราหาค่า ρ ในสมการ (๑.๔.๑๑) ได้จากแอเทนูเอเตอร์ ซึ่งบอกถึงการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของผลึกเหลวในขาที่ ๒ เมื่อเราปรับทั้งพลันเจอร์และแอทเทนูเอเตอร์พร้อม ๆ กันจนสัญญาณไมโครเวฟในขา ๔ ของแมจิกทีเป็น ๐ นั่นคือ อัมพลและเฟสในขา ๒ และขา ๓ เท่ากัน (macth) เราจะสามารถหา Θ และ ρ ได้ดังกล่าว

จากนั้นก็เปลี่ยนความหนาของสารละลายผลึกเหลว แล้วดำเนินการทดลองเหมือนเดิมเก็บข้อมูลแล้วนำมาวิเคราะห์โดยละเอียดซึ่งจะกล่าวในบทต่อไป



หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ๔.๓.๒ แสดงการจัดเครื่องมือการทดลองวัดสัมประสิทธิการสะท้อนโดยใช้แมจิกที

๔.๕ การวัดค่า Θ ในการทดลอง

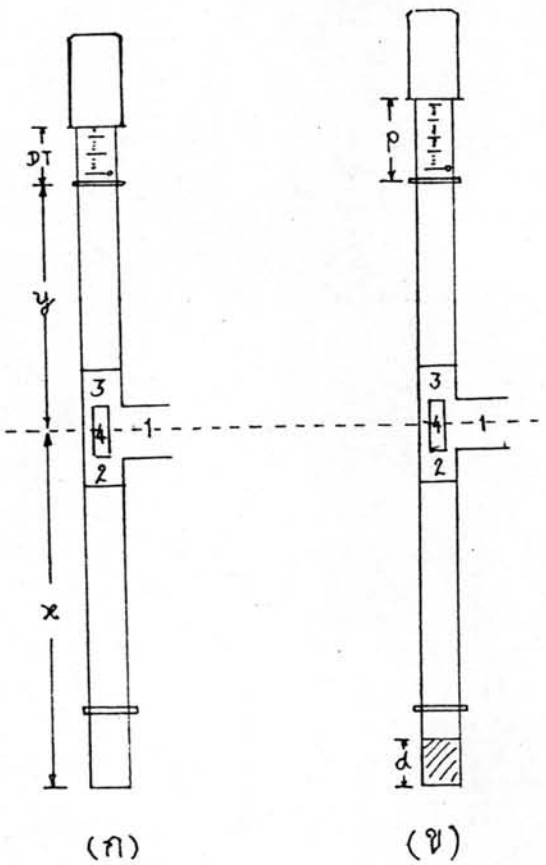
ในการทดลอง เราใช้แมจิกทีเพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบอัมพลและเฟส กล่าวคือเริ่มแรกเราให้สัญญาณเข้าทางขา ๑ และจะแยกสู่ขา ๒ และขา ๓ ของแมจิกทีสะท้อนที่กันของท่อสั้นและที่พลันเจอร์ตามลำดับ กลับสู่แมจิกทีตอนนี้คลื่นที่กลับมาอัมพลเท่ากัน (เราถือว่าการสะท้อนบนผิวโลหะไม่มีการสูญเสียพลังงาน) จึงไม่ต้องปรับแอทเทนูเอเตอร์แต่เฟสไม่เท่ากันเนื่องจากระยะทางในการเดินทางของคลื่นไม่เท่ากันเราต้องปรับพลันเจอร์โดยพยายามหมุนพลันเจอร์จนทำให้สัญญาณไม่ออกทางขา ๔ ให้อ่านพลันเจอร์ได้ D_T เซนติเมตรนั้นคือเราทราบว่าเฟสและอัมพลของสัญญาณไมโครเวฟในขา ๒ และขา ๓ ของแมจิกทีเท่ากัน ถ้าให้ระยะทางในการเคลื่อนที่ของสัญญาณไมโครเวฟในขา ๒ และขา ๓ เป็น x และ y ตามลำดับดังรูป (๔.๕.๑ก.) อาศัยสมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

$$\vec{E} = \vec{E}_o e^{-j(\omega t + \beta_1 z)} \qquad (๔.๕.๑ก.)$$

$$\vec{H} = \vec{H}_o e^{-j(\omega t + \beta_1 z)} \qquad (๔.๕.๑ข.)$$

โดยที่ $\beta_1 z$ เป็นเฟสของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อ z เป็นระยะทางการเคลื่อนที่ของคลื่นในท่อนำคลื่น และ β_1 เป็นตัวประกอบการแผ่ของคลื่นไมโครเวฟในสูญญากาศ จากสมบัติของแมจิกทีเราจะได้

$$-2\beta_1(y + \Delta T) + \pi = -2\beta_1 x + \pi \qquad (๔.๕.๒)$$



รูป ๔.๕.๑ แสดงการวัด Θ จากพลันเจอร์

ต่อจากนั้น เราเติมสารละลายผลึกเหลวลงในท่อน้ำคลื่นสั้น แล้วทำการวัดสัญญาณใหม่ คอนนี้สัญญาณไมโครเวฟในขา ๒ จะผ่านและสะท้อนที่ผิวของสารละลายผลึกเหลว โดยมีเฟสเปลี่ยนเป็น Θ ดังนั้นเราต้องปรับพลันเจอร์จนได้ตำแหน่งที่คลื่นในขา ๒ และขา ๓ มีเฟสตรงกันอีกครั้งหนึ่ง ให้อ่านค่าบนพลันเจอร์ได้ P เซนติเมตรนั้นคือเฟสของไมโครเวฟในขา ๒ และขา ๓ เท่ากัน ดังรูป (๔.๕.๑ข.) ดังนั้นเราจะได้ว่า

$$-2\beta_1(y+P) + \pi = -2\beta_1(x-d) + \Theta \qquad (๔.๕.๓)$$

เอาสมการ (๔.๕.๒) ลบด้วย (๔.๕.๓) เราได้

$$2\beta_1(P-DT) = -2\beta_1 d + \pi - \Theta$$

$$\Theta = 2\beta_1(DT-p-d)+\pi \qquad (๔.๕.๔)$$

สมการ (๔.๕.๔) เป็นสมการสำหรับหาค่า Θ จากการทดลอง ดังนั้นเมื่อ $\beta_1 = 2\pi/\lambda$ จากสมการ (๓.๕.๖) และ (๔.๕.๘) ทำให้เราได้

$$\xi = (DT-d)-(p-\tfrac{\lambda}{4}) \qquad (๔.๕.๕)$$

สมการ (๔.๕.๕) เป็นสมการสำหรับหาค่า ξ ซึ่งเป็นระยะที่ได้รับสัญญาณไมโครเวฟมากที่สุดถึงผิวของสารละลายผลึกเหลว

๔.๖ <u>การวัดค่า ρ จากการทดลอง</u>

ในการทดลองเราต้องวัดค่า ρ ซึ่งเราใช้แอทเทนูเอเตอร์แบบโรตารีแวน อาศัยหลักที่ว่าเมื่อสัญญาณไมโครเวฟผ่านสารละลายผลึกเหลวในขา ๒ จะถูกดูดกลืนพลังงานบางส่วนเอาไว้ ทำให้อัมพลไม่เท่ากับอัมพลที่สะท้อนมาจากพลันเจอร์ จึงต้องปรับแอทเทนูเอเตอร์ในขา ๓ เพื่อลดสัญญาณลงจนมีอัมพลเท่ากับอัมพลในขา ๒ ซึ่งเราสามารถสังเกตได้ที่ออสซิลโลสโคป จากนี้เราอ่าน แอทเทนูเอเตอร์เป็น dB

พิจารณาจากสูตร

$$dB = 20 \log \frac{E_0}{E} \qquad (๔.๖.๑)$$

ในเมื่อ $\vec{E}$ เป็นสนามไฟฟ้าเมื่อผ่านแอทเทนูเอเตอร์ และ $\vec{E}_o$ เป็นสนามไฟฟ้าตอนขาเข้าแอทเทนูเอเตอร์

<u>รูป ๔.๖.๑</u> แสดงการถูกกลืนสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของเครื่องลดสัญญาณ

ถ้าเราพิจารณาสนามไฟฟ้าที่แอทเทนูเอเตอร์ พบว่าสนามไฟฟ้าจะผ่านแอทเทนูเอเตอร์ ๒ ครั้ง ครั้งแรกจากแมจิกทีผ่านแอทเทนูเอเตอร์ไปยังพลันเจอร์ จากพลันเจอร์สะท้อนกลับผ่านแอทเทนูเอเตอร์ไปยังแมจิกที

พิจารณาครั้งแรก

$$dB_1 = 20 \log \frac{E_o}{E_1} \qquad (๔.๖.๒)$$

พิจารณาครั้งหลัง

$$dB_2 = 20 \log \frac{E_1}{E_2} \qquad (๔.๖.๓)$$

สมการ (๔.๖.๒) บวกกับสมการ (๔.๖.๓)

$$dB_1 + dB_2 = 20 \log \frac{E_o}{E_2} \qquad (๔.๖.๔)$$

เนื่องจากการถูกกลืนพลังงานของแอทเทนูเอเตอร์ทั้งสองครั้ง เท่ากัน นั่นคือ

$$2dB = 20 \log \frac{E_o}{E_2}$$

$$\frac{E_o}{E_2} = \log^{-1}\frac{dB}{10} \qquad (๔.๖.๕)$$

พิจารณาการดูดกลืนพลังงาน เราเปรียบเทียบสนามไฟฟ้าที่ออกต่อสนามไฟฟ้าที่เข้า นั่นคือสมการ (๔.๖.๕) กลายเป็น

$$\frac{E_2}{E_o} = \left(\log^{-1}\frac{dB}{10}\right)^{-1} \qquad (๔.๖.๖)$$

จากสมการ (๔.๖.๖) ทำให้

$$\rho = \frac{E_2}{E_o}$$

$$= \left(\log^{-1}\frac{dB}{10}\right)^{-1} \qquad (๔.๖.๗)$$

สมการ (๔.๖.๗) เป็นสมการใช้สำหรับคำนวนหา ρ จากการทดลอง