บทที่ ๔

การสร้างอุปกรณ์บางอย่าง การเตรียมสารตัวอย่าง และการวัดค่าคงที่ไดอิเลคตริกของสารตัวอย่าง

การวัดค่าคงที่ไดอิเลคตริกของฉนวนนั้นทำได้หลายแบบ สำหรับฉนวนซึ่งดูดกลืนพลังงานไม่มาก($\frac{\epsilon''}{\epsilon'} \approx 0$) เราอาจวัดค่าคงที่ไดอิเลคตริกได้โดยอาศัยโพรงอภินาทหรือโดยการวัดสัมประสิทธิ์ของการสะท้อน(Γ)ของไมโครเวฟจากผิวของสารซึ่งบรรจุอยู่ที่ปลายท่อนำคลื่นซึ่งอุดตัน แต่ถ้าสารนั้นดูดกลืนพลังงานได้มาก($\frac{\epsilon''}{\epsilon'} \neq 0$) ตัวอย่างเช่นน้ำเป็นต้น เราก็อาจวัดค่าคงที่ไดอิเลคตริกของสารนั้นโดยวัดสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนเช่นเดียวกัน แต่หลักการคำนวณจะต่างจากการคำนวณในแบบแรกเล็กน้อย ในบทนี้เราจะกล่าวถึงการวัดค่าคงที่ไดอิเลคตริก ในแบบต่างๆ การจัดและการออกแบบเครื่องมือ และจะแสดงผลการทดลองโดยละเอียด

๔.๑ การสร้างโพรงอภินาทรูปทรงกระบอก

ในการวัดค่า κ ของสารโดยใช้โพรงอภินาท เราทำการวัดโดยบรรจุสารที่ต้องการวัด ให้เต็มในโพรงอภินาท ด้วยเหตุผลหลายประการ เราจึงได้เลือกโพรงอภินาทกลมซึ่งมีโมด TE_{101} โลดอยู่ ในการทดลองเราวัดความถี่อภินาทและจากความยาว(L) และรัศมีของโพรงกลม(a) เราสามารถคำนวณค่า $\kappa = \epsilon/\epsilon_0$ ของสารตัวอย่างได้จากสมการ

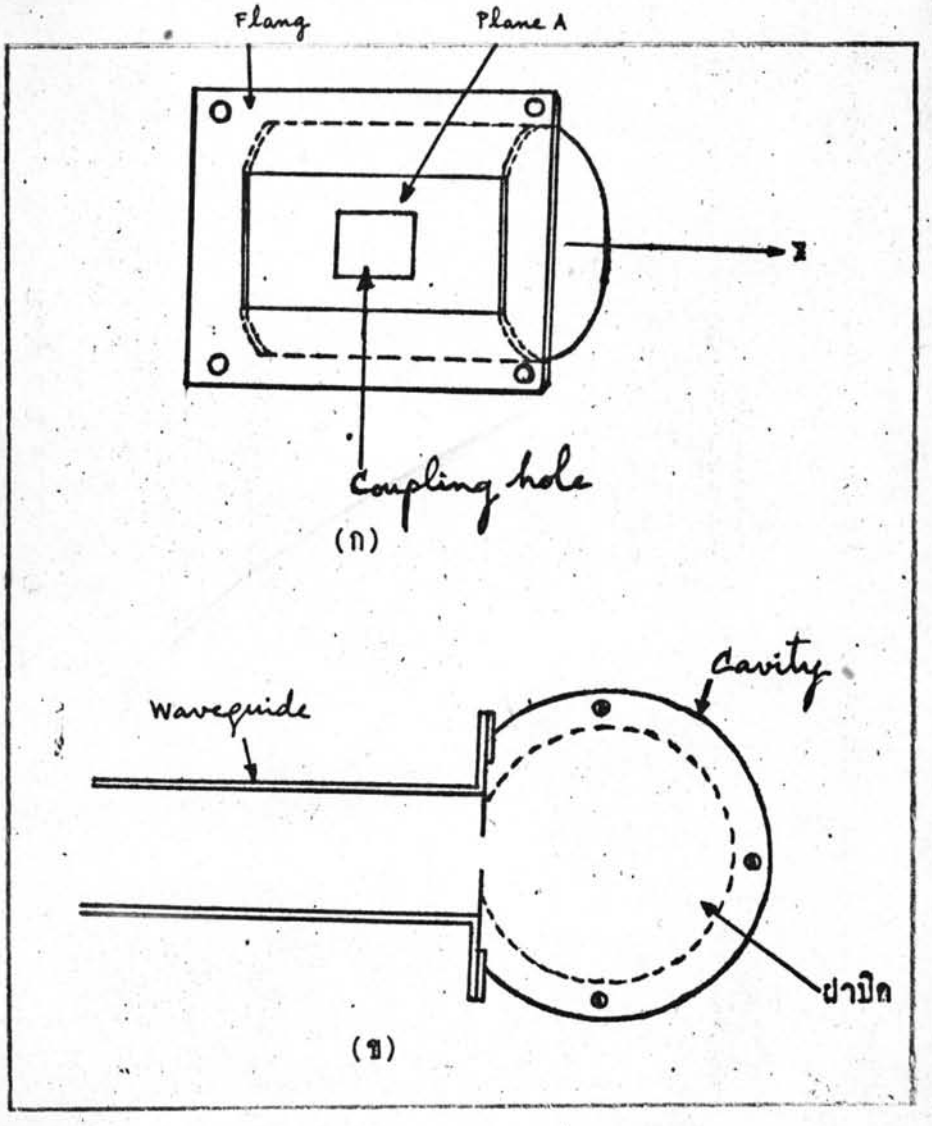
$$f_0 = \frac{c}{2\sqrt{\kappa}} \left[\left(\frac{1}{L}\right)^2 + \left(\frac{3.83}{\pi a}\right)^2 \right]^{1/2} \qquad (๔.๑.๑)$$

เนื่องจากเครื่องกำเนิดไมโครเวฟที่มีอยู่สามารถให้ความถี่ได้เพียงจาก ๘.๕ - ๙.๔ จิกะเฮิทซ์ ในการวัดค่า ϵ เราจำต้องทราบว่า ϵ หรือ $\kappa = \epsilon/\epsilon_0$ อย่างเคล่าๆเสียก่อน อาจทราบได้จากการทดลองแบบอื่นหรือจากการคาดคะเน จากค่า κ ที่กะไว้นี้ เราหาค่า L และ a ที่พอเหมาะที่จะทำให้ f_0 ตกอยู่ในช่วง ๘.๕ - ๙.๔ จิกะเฮิทซ์ ค่า L และ a จะต้องเลือกให้พอเหมาะพอที่เราจะสร้างโพรงอภินาทขึ้นได้ จากนั้นเราก็ทำการทดลองหาค่า f_0 และคำนวณ κ ที่แท้จริงออกมา ถ้าค่า L และ a ที่เรากำหนด ทำให้ความถี่อภินาท f_0 ตกอยู่นอก ๘.๕ - ๙.๔ จิกะ

เอิทซ์ เราจะต้องหาค่า L และ α ชุดใหม่ จากนั้นก็ทำโพรงอภินาทอันใหม่ จนกว่า f_0 จะตกอยู่ในช่วงความถี่ดังกล่าวตามต้องการ ท่อทรงกระบอกที่ใช้ในการทำโพรงอภินาท เป็นท่อทองเหลืองมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดต่างๆกัน การที่ได้เลือกเอาท่อโลหะทองเหลืองก็เพราะว่า หาได้ง่ายในท้องตลาด ราคาพอสมควร และทำการกลึงได้ง่ายกว่าโลหะอย่างอื่น ตัวอย่างเช่น ต้องการสร้างโพรงอภินาทให้มีความถี่อภินาท ๘.๖ จิกะเฮิทซ์ สมมติว่าค่าคงที่ไดอิเลคตริกของสารที่เรากะเอาไว้มีค่าประมาณ ๒ เลือกความยาวของท่อเท่ากับ ๑.๘๗ เซ็นติเมตร จากสูตร(๔.๑.๑)จะคำนวณหาค่าเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อออกมาได้ประมาณ ๓.๔๘ เซ็นติเมตร นำท่อทองเหลืองมาตัดให้มีความยาวประมาณ ๕ เซ็นติเมตร การที่ตัดให้ยาวกว่าค่าที่กำหนดเอาไว้ก็เพื่อสะดวกในการที่จะใช้เครื่องจับ เนื่องจากว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อจะมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้กำหนดไว้ จึงต้องนำเข้าเครื่องกลึงเพื่อกลึงให้ได้ค่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อตามที่ต้องการ แล้วจึงนำมาตัดให้ได้ขนาดเท่าที่กำหนดเอาไว้ จากนั้นนำมาใสด้วยเครื่องให้ผนังส่วนหนึ่งของท่อเป็นพื้นราบ ดังรูปที่ ๔.๑ก พื้นราบนี้คือระนาบ A นั่นเอง ส่วนนี้จะใช้เจาะรูต่อเพื่อรับคลื่นไมโครเวฟ แล้วใช้เครื่องเซาะร่องทั้งสองข้างของพื้นที่ๆได้ใสเอาไว้แล้วนั้นทั้งนี้เพื่อจะใช้เป็นเนื้อที่ๆจะยึดกับแผ่นทองเหลือง(FLANGE) ซึ่งจะนำไปยึดติดกับส่วนต่างๆของเครื่องมือไมโครเวฟ จากนั้นทำฝาปิดทั้งสองข้าง ในการทำพื้นที่ระนาบ A และเจาะรูต่อเราได้กลึงปลาสติกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางพอๆกับท่อใส่เข้าไปในท่อด้วยเพื่อเป็นการรักษาผิวของผนังที่บางให้เรียบเอาไว้ โพรงอภินาทรูปทรงกระบอกซึ่งต่อติดเข้ากับท่อนำคลื่นได้แสดงเอาไว้ตามรูปที่ ๔.๑ข

สำหรับโมด TE_{101} ที่โลดอยู่ในโพรงอภินาทกลมนั้น สนามแม่เหล็กมีแต่ในแนวแกน(H_z) และแนวรัศมี(H_ρ) ส่วนสนามไฟฟ้ามีแต่ในแนววนรอบๆแกน(E_θ) ดังที่ได้กล่าวอย่างละเอียดในหัวข้อ ๒.๖ สนามเหล่านี้สามารถสร้างขึ้นโดยอาศัย E_t และ H_t จากโมด TE_{10} ในท่อนำคลื่นโดยผ่านทางรูต่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าดังแสดงในรูปที่ ๔.๑ก ในการนี้มีข้อระวังสองประการคือประการแรกขอบด้านยาวของพื้นที่หน้าตัดของท่อนำคลื่นจะต้องขนานกับแกนของทรงกระบอก ในกรณีนี้ E_t และ H_t ในท่อนำคลื่นจะขนานกับ E_θ และ H_z ในโพรงอภินาทพอดี ประการที่สองขอบทั้งสองของรูต่อควรจะอยู่กึ่งกลางและขนานกับขอบทั้งสองของภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นด้วย ถ้าหากไม่เป็นไปตามนี้ E_t และ H_t ในท่อนำคลื่นอาจสร้างโมด TM_{111} ขึ้นในโพรงซึ่งเป็นสิ่งที่เราไม่ต้องการ

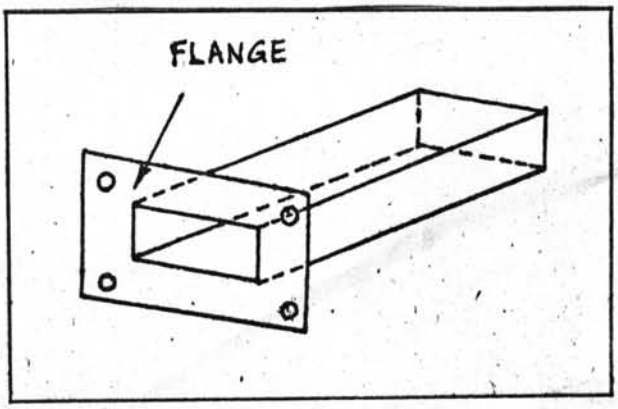
ในการบรรจุสารลงในโพรงอภินาทเราจะเปิดฝาด้านหนึ่งของโพรงออก จากนั้น-บรรจุสารซึ่งเป็นของแข็งลงไปแล้วจึงปิดฝา จะเห็นว่าฝากับผิวโค้งของโพรงจะไม่สัมผัสกันดีนักในทางไฟฟ้า(BAD ELECTRICAL CONTACT) แต่สิ่งนี้จะไม่ทำให้เกิดความลำบากขึ้น ถ้าภายในโพรงมีแต่เพียงโมด TE_{101} เพราะโมดนี้จะไม่มีกระแสไหลจากผิวโค้งของโพรงมายังฝา แต่ถ้ามีโมด TM_{111} อยู่ กระแสที่ไหลจากผิวโค้งของโพรงมายังฝาจะทำให้เกิดการ-สูญเสียพลังงาน ค่า f_0 ที่ได้จะคลาดเคลื่อนไป ด้วยเหตุนี้เราจึงต้องระวังไม่ให้มีโมด TM_{111} เกิดขึ้นในโพรง เพื่อที่จะให้ได้ค่า f_0 ที่ถูกต้อง



รูปที่ ๔.๑ โพรงอภินาท (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านข้าง

๔.๒ การสร้างท่อสั้น

ในการทดลองวัดค่าคงที่ไดอิเลคตริกของสารตัวอย่างพวกที่เป็นของเหลว เราได้สร้างภาชนะเพื่อบรรจุสารตัวอย่างที่เป็นของเหลวและเรียกภาชนะที่สร้างขึ้นนี้ว่า ท่อสั้น ในการสร้างท่อสั้นเราจะเริ่มจากท่อนำคลื่นรูปเหลี่ยมทองเหลือง นำมาตัดออกให้มีความยาวประมาณ ๕ หรือ ๖ เซ็นติเมตร นำเข้าเครื่องไสให้ปลายทั้งสองข้างเรียบ แล้วปิดปลายข้างหนึ่งด้วยแผ่นทองเหลืองให้สนิทโดยการเชื่อมด้วยตะกั่วบัดกรี ส่วนปลายอีกข้างหนึ่งยึดติดเข้ากับแผ่นทองเหลืองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า(FLANGE) เพื่อจะนำไปยึดติดเข้ากับท่อนำคลื่น ดังแสดงเอาไว้ในรูปที่ ๔.๒



รูปที่ ๔.๒ ท่อสั้น

๔.๓ การเตรียมสารตัวอย่าง

สารที่เราเลือกมาเป็นสารตัวอย่างเพื่อวัดค่าคงที่ไดอิเลคตริกตัวแรกคือ โพลีเอทธิลีน (POLYETHYLENE) เท่าที่มีขายในตลาดมีลักษณะเป็นเม็ดๆสีขาว จึงจำเป็นที่จะต้องนำมาหลอมเพื่อให้เป็นเนื้อเดียวกัน อุปกรณ์ที่ใช้ในการหลอมโพลีเอทธิลีนมีเบ้าหลอมในที่นี้เราใช้บีเกอร์ขนาด ๑๐๐ ลูกบาศก์เซ็นติเมตร และแผ่นร้อน(HOT PLATE)ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ ในขั้นแรกนำโพลีเอทธิลีนมาล้างทำความสะอาด ผึ่งให้แห้ง แล้วจึงนำไปใส่ในบีเกอร์ประมาณครึ่งหนึ่งของบีเกอร์ จากนั้นก็นำขึ้นไปตั้งบนแผ่นร้อน ปรับความร้อนประมาณ ๑๓๐

องศาเซลเซียส ทิ้งไว้จนกระทั่งว่าโพลีเอทธิลีนหลอมเป็นเนื้อเดียวกันซึ่งในตอนนี้จะสังเกตเห็นว่าโพลีเอทธิลีนที่หลอมเหลวแล้วนี้มีลักษณะเป็นของเหลวที่มีความหนืดมากและใสด้วย จากนั้นจึงเติมโพลีเอทธิลีนลงไปอีกจนเกือบเต็มบีเกอร์ ปล่อยทิ้งไว้บนแผ่นร้อนจนหลอมละลายใสเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วจึงตัดไฟ ปล่อยทิ้งไว้ให้ค่อยๆเย็นลงเอง เมื่อเย็นลงจะได้โพลีเอทธิลีนเป็นของแข็งเนื้อเดียวกันมีสีขาวขุ่นๆ มีรูปร่างทรงกระบอกเหมือนกับรูปทรงของบีเกอร์ และพร้อมที่จะนำไปทำการดัดแปลงรูปร่างเพื่อให้เหมาะสมกับอุปกรณ์ที่ใช้ แล้วทำการวัดหาค่าคงที่ไดอิเลคตริกต่อไป

๔.๔ การวัดค่าคงที่ไดอิเลคตริกของสารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง

อย่างที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนต้นว่า สารที่เราใช้ทดลองวัดได้แก่โพลีเอทธิลีน เราทำการวัดโดยใช้วิธีต่างกันสองวิธี วิธีแรกคือใช้โพรงอภินาทกลม วิธีที่สองโดยการวัดค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อน Γ ที่สะท้อนออกจากผิวดังที่กล่าวในหัวข้อ ๒.๗ รายละเอียดได้บรรยายอยู่ข้างล่างนี้

๔.๔.๑ โดยการใช้โพรงอภินาทกลมหรือโพรงกลม

นำโพลีเอทธิลีนที่เตรียมเอาไว้มากลึงให้มีขนาดพอดีกับโพรงอภินาทกลม เมื่อกลึงเรียบร้อยแล้วจึงนำมาสอดเข้าไปในโพรง ปิดฝา นำโพรงที่มีโพลีเอทธิลีนบรรจุอยู่ภายในติดเข้ากับเครื่องมือ แล้วเริ่มต้นทำการวัด ในการวัดด้วยวิธีนี้ ปริมาณที่เราวัดได้คือ z λ และ E_{max}/E_{min} ที่ความถี่ f ต่างๆรอบๆ f_0 โดยที่ z คือระยะทางที่วัดจากรูต่อของโพรงออกมาจนถึงตำแหน่งที่ให้ค่าสนามไฟฟ้าสูงที่สุด ดังแสดงไว้ในรูปที่ ๔.๓ λ คือความยาวคลื่นของคลื่นไมโครเวฟที่อยู่ในท่อนำคลื่นซึ่งวัดได้โดยใช้ตัวตรวจวัดคลื่นสถิตหรืออาจคำนวณเอาจากสูตรที่ว่า

$$\lambda = \left[\left(\frac{f}{c}\right)^2 - \left(\frac{1}{2a}\right)^2\right]^{-\frac{1}{2}} \qquad (๔.๔.๑.๑)$$

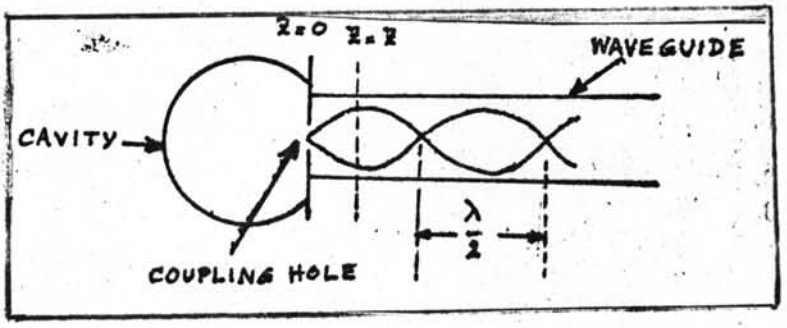
โดยที่ f คือความถี่ของคลื่น วัดได้โดยใช้เวฟมิเตอร์ a คือความยาวของด้านกว้างของท่อนำคลื่นซึ่งมีค่าเท่ากับ ๒.๒๘๖ ± ๐.๐๔๖ เซ็นติเมตร c คือความเร็วแสงในสูญญากาศมีค่า

เท่ากับ ๓×๑๐^{๑๐} เซ็นติเมตร/วินาที ส่วนการวัด E_{max}/E_{min} หรือVSWRเราวัดได้โดยอาศัยแอทเทนูเอเตอร์ จากปริมาณดังกล่าวจะนำไปคำนวณหาค่า θ และ$(1 + \rho)/(1 - \rho)$ โดยอาศัยสูตรดังต่อไปนี้

$$\theta = (DP - Z)/\lambda \qquad (๔.๔.๑.๒)$$

$$(1 + \rho)/(1 - \rho) = \log^{-1}(DB/20) \qquad (๔.๔.๑.๓)$$

โดยที่ DP (DETUNED POSITION) คือแหน่งของระนาบที่ผ่านรูต่อซึ่งที่ระนาบนี้ถือว่า $Z = 0$



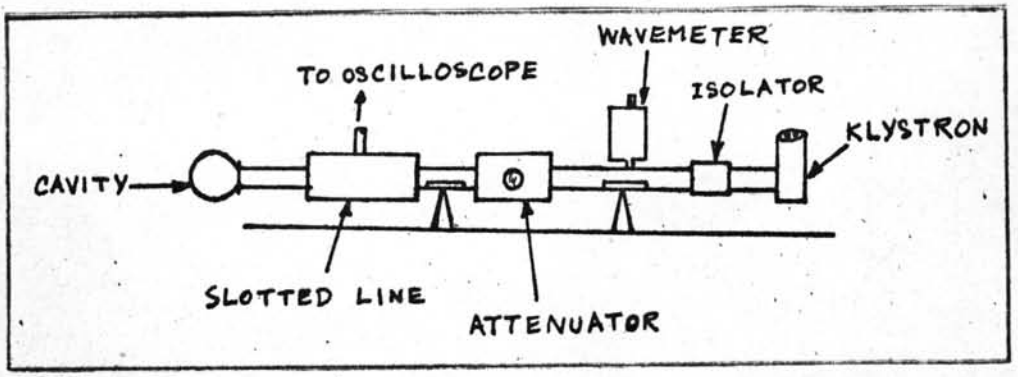
หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

รูปที่ ๔.๓ คลื่นสถิตในท่อนำคลื่นซึ่งต่อไว้ด้วยโพรงอภินาท

จากนั้นนำค่าที่ได้จากสมการ(๔.๔.๑.๒)และ(๔.๔.๑.๓)ใส่ลงไปในแผนภูมิสมิธ และจากแผนภูมิสมิธจะทำให้เราได้ซัสเซพแตนซ์ B ที่ความถี่ต่างๆซึ่งจะนำไปสู่ค่าความถี่อภินาท f_0 จากค่าความถี่อภินาทที่ได้จะทำให้เราสามารถคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเลคตริก κ ของโพลีเอทธิลีนได้จากสูตร

$$\kappa = (c/2f_0)^2 \left[(1/L)^2 + (3.83/\pi a)^2 \right] \qquad (๔.๔.๑.๔)$$

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองได้จัดเอาไว้ตามแสดงในรูปที่ ๔.๔



รูปที่ ๔.๔ การวัดค่าคงที่ไดอิเลคตริกโดยใช้โพรงอภินาท

โพรงกลมที่มี a = ๑.๗๔๔ ซ.ม. L = ๑.๘๗๕ ซ.ม. ในการหา DP เมื่อโพรงบรรจุไว้ด้วยพลาสติกที่เป็นเพล็คซิกลาส(PLEXYGLASS)จะได้ข้อมูลออกมาตามตารางที่ ๔.๑

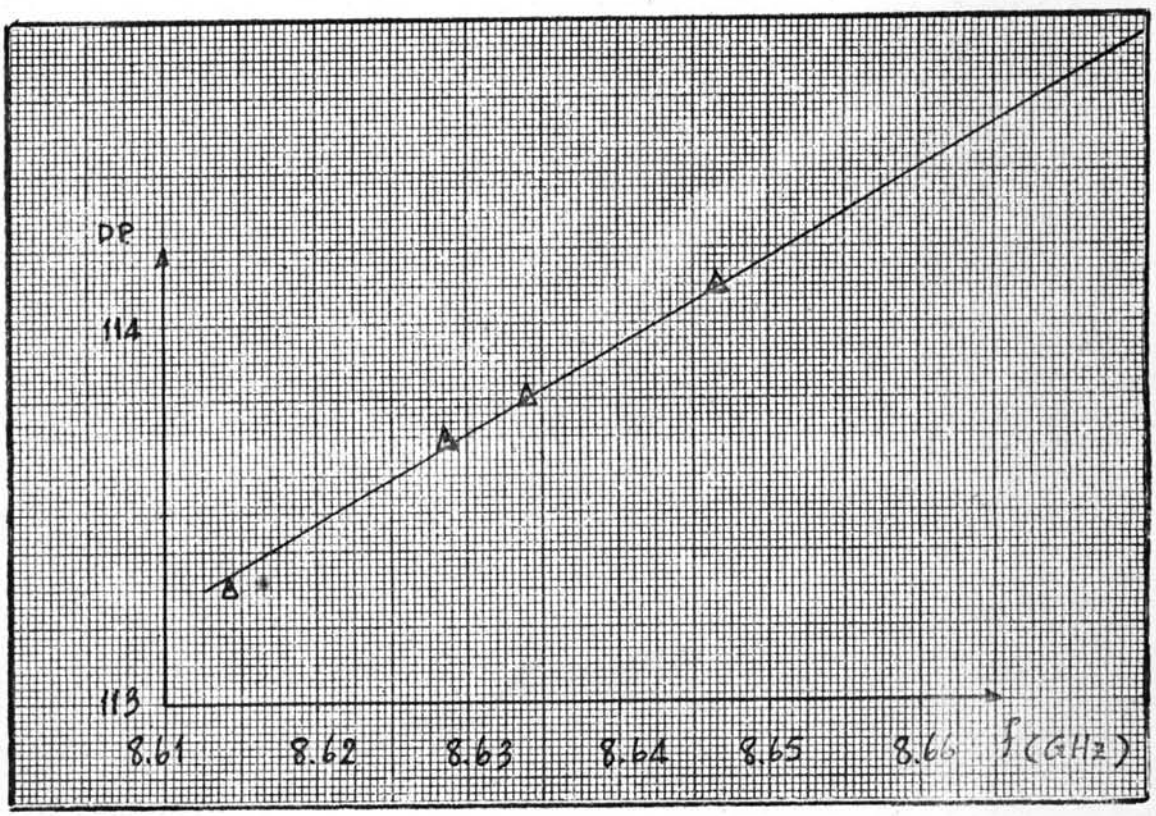
f(GHz)	Z(mm)
๘.๖๑๔๓	๑๑๓.๓
๘.๖๒๘๗	๑๑๓.๗
๘.๖๓๔๑	๑๑๓.๘
๘.๖๔๖๗	๑๑๔.๑

ตารางที่ ๔.๑ ค่า DP ของโพรงกลม a = ๑.๗๔๔ ซ.ม. L = ๑.๘๗๕ ซ.ม. ซึ่งบรรจุด้วยเพล็คซิกลาส

จากตารางที่ ๔.๑ จะให้ผลตามรูปที่ ๔.๕ เมื่อได้ DP แล้วเราจะใส่โพลีเอทธิลีนเข้าไปในโพรงกลมแทนเพล็คซิกลาส แล้วทำการวัดค่าต่างๆออกมา ดังแสดงไว้ในตารางที่ ๔.๒ ซึ่งจะเห็นว่าตำแหน่ง Z = ๐ เปลี่ยนไปเล็กน้อยกับความถี่

f(GHz)	Z(mm)	DP(mm)	λ(mm)	A(DB)	θ	(1+ρ)/(1-ρ)
๘.๖๒๔๗	๑๐๔.๒๗	๑๑๓.๗๐	๕๓.๖๔	๑๒.๖๐	๐.๑๗๖	๔.๒๗
๘.๖๓๒๑	๑๐๕.๔๐	๑๑๓.๗๖	๕๓.๖๕	๖.๐๐	๐.๑๔๗	๒.๐๐
๘.๖๓๓๘	๑๐๖.๔๐	๑๑๓.๘๐	๕๓.๖๒	๓.๕๐	๐.๑๒๔	๑.๕๐
๘.๖๓๕๘	๑๒๑.๒๐	๑๑๓.๘๔	๕๓.๖๐	๔.๓๕	-๐.๑๓๗	๑.๖๕
๘.๖๓๖๖	๑๒๑.๔๐	๑๑๓.๘๘	๕๓.๕๘	๕.๑๑	-๐.๑๔๐	๑.๘๐
๘.๖๓๗๗	๑๒๒.๘๐	๑๑๓.๙๐	๕๓.๕๗	๑๐.๑๐	-๐.๑๖๖	๓.๒๐
๘.๖๓๙๔	๑๒๓.๖๓	๑๑๓.๙๒	๕๓.๕๔	๑๔.๙๑	-๐.๑๘๑	๕.๕๐

ตารางที่ ๔.๒ ค่าต่างๆที่ได้จากการใส่โพลีเอทธิลีนเข้าไปในโพรงกลม a = ๑.๗๔๔ ซ.ม. L = ๑.๘๗๕ ซ.ม.



รูปที่ ๔.๕ ค่า DP ที่ความถี่ต่างๆของโพรงกลมเมื่อบรรจุไว้ด้วยเพล็ค
ซิกลาส a = ๑.๕๔๔ ซ.ม. L = ๑.๘๗๕ ซ.ม.

จากตารางที่ ๔.๒ นำค่า θ และ $(1+\varsigma)/(1-\varsigma)$ ลงไปใส่ในแผนภูมิสมิธจะได้ดังรูปที่ ๔.๖ จากรูปนี้จะทำให้เราได้ค่าความนำ G ซัสเซบแตนซ์ B ที่ความถี่ต่างๆตามตารางที่ ๔.๓

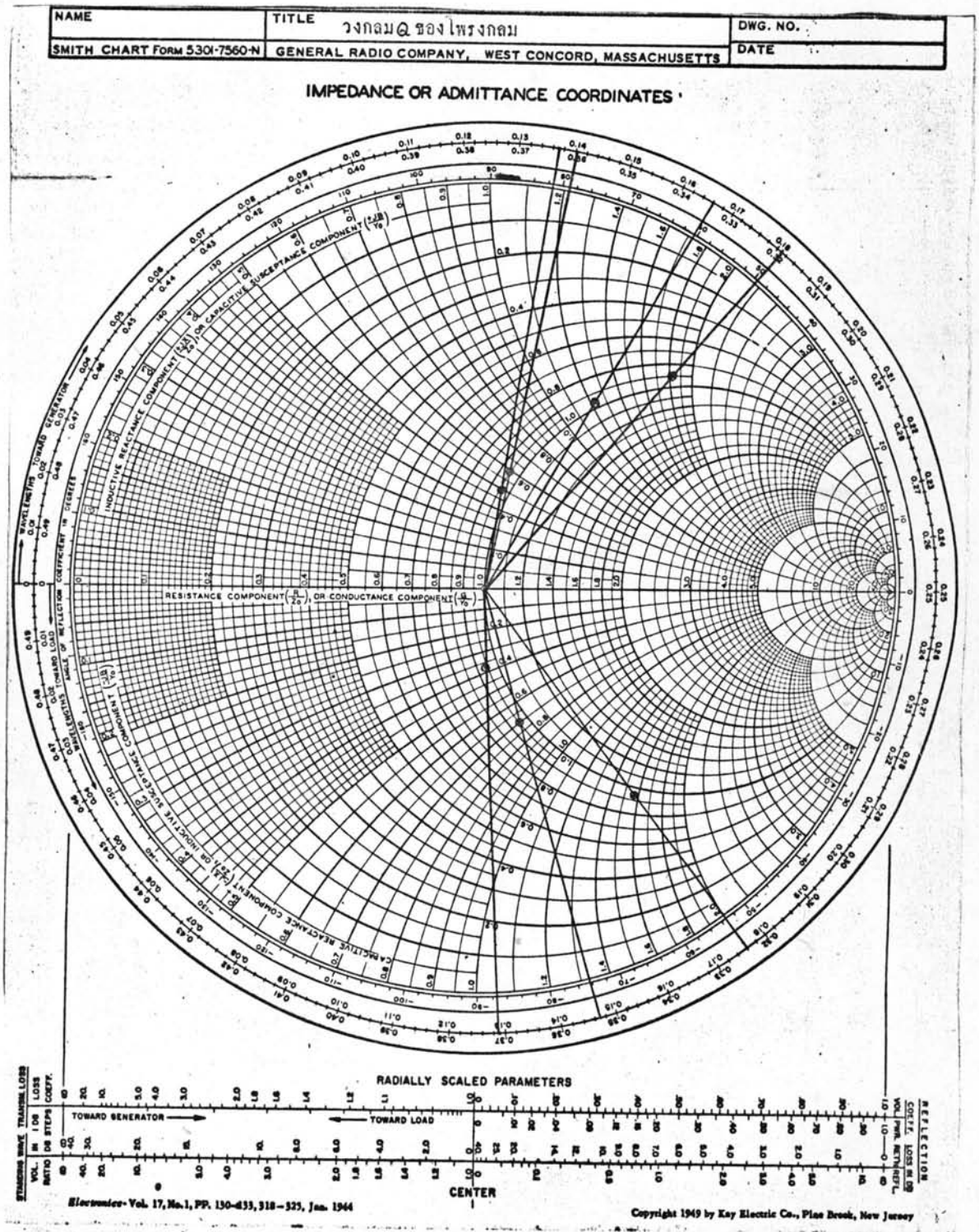
f	G	B
๘.๖๒๔๗	๐.๔๕	-๑.๕๕
๘.๖๓๒๑	๐.๔๖	-๐.๖๘
๘.๖๓๓๘	๐.๔๔	-๐.๔๐
๘.๖๓๕๘	๐.๔๕	๐.๕๐
๘.๖๓๖๖	๐.๔๔	๐.๕๘
๘.๖๓๗๗	๐.๔๖	๑.๒๐
๘.๖๓๔๔	๐.๔๕	๑.๘๐

ตารางที่ ๔.๓ ค่า G และ B ที่ความถี่ต่างๆสำหรับโพรงกลม a = ๑.๗๔๔ ซ.ม.
L = ๑.๘๗๕ ซ.ม.

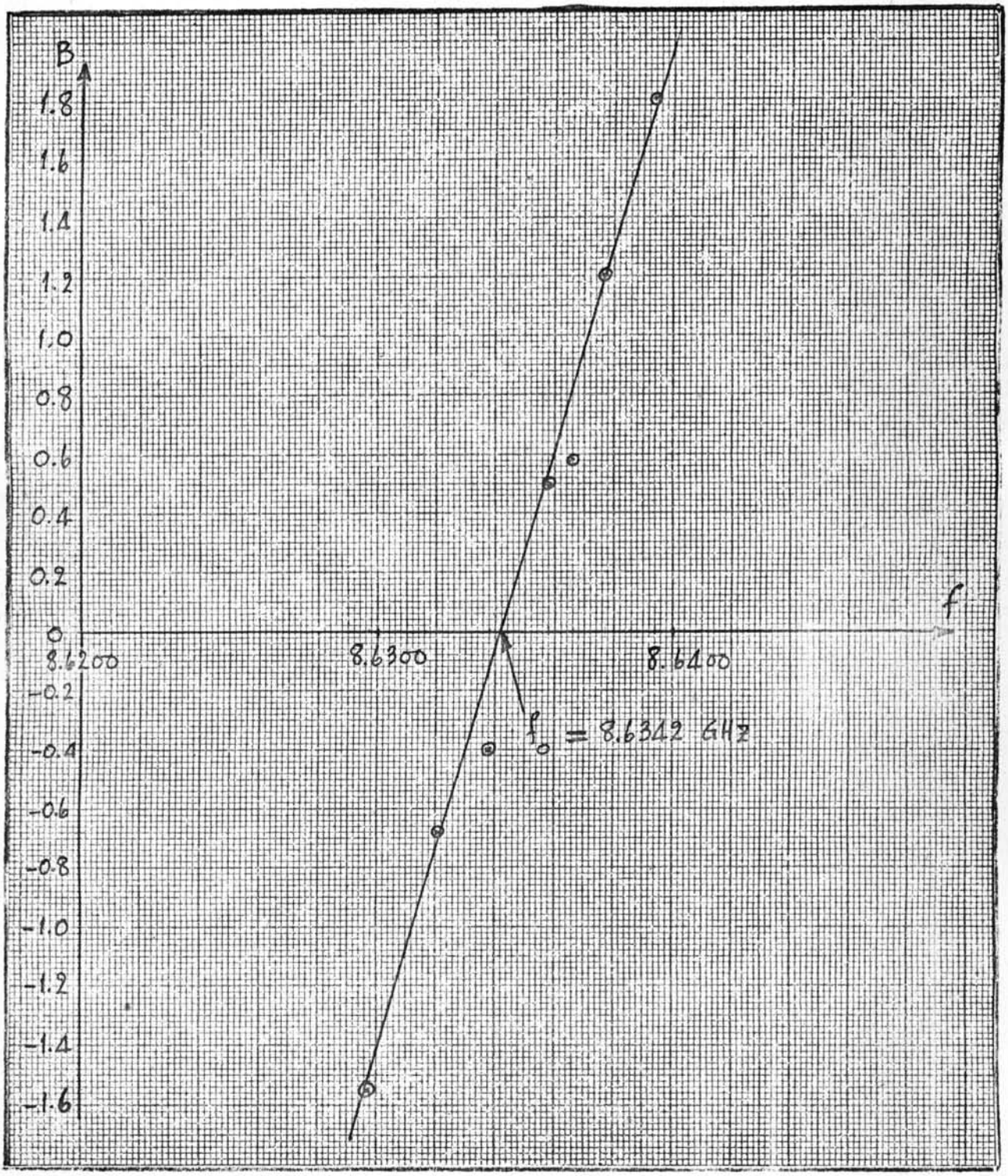
จากตารางที่ ๔.๓ นำค่าความถี่ f กับซัสเซบแตนซ์ B มาพลอต(PLOT)จะได้ตามรูปที่ ๔.๗ และจากรูปที่ ๔.๗ จะทำให้เราได้ค่าความถี่อภินาท f_0 = ๘.๖๓๔๒ จิกะเฮิทซ์ เพราะฉะนั้นจากสมการ(๔.๔.๑.๔) เราคำนวณค่าคงที่ไดอิเลคตริก ได้เป็น

$$\kappa = \left(\frac{c}{2f_0}\right)^2\left[\frac{1}{L^2} + \left(\frac{3.83}{\pi a}\right)^2\right] = 2.33$$

โดยที่ L = ๑.๘๗๕ ซ.ม. และ a = ๑.๗๔๔ ซ.ม.



รูปที่ ๔.๖ แผนภูมิสมิธของโพรงกลม a = ๑.๙๙๔ ซ.ม. L = ๑.๔๙๕ ซ.ม.



รูปที่ ๔.๗ B เป็นฟังค์ชันของ f สำหรับโพรงกลม a = ๑.๙๔๔ ซ.ม.

L = ๑.๘๗๕ ซ.ม.

สำหรับโพรงกลมที่มี a = ๑.๔๐๘ ซ.ม. L = ๒.๕ ซ.ม. เราจะได้ค่า DP ตามตารางที่ ๔.๔ และตามรูปที่ ๔.๘

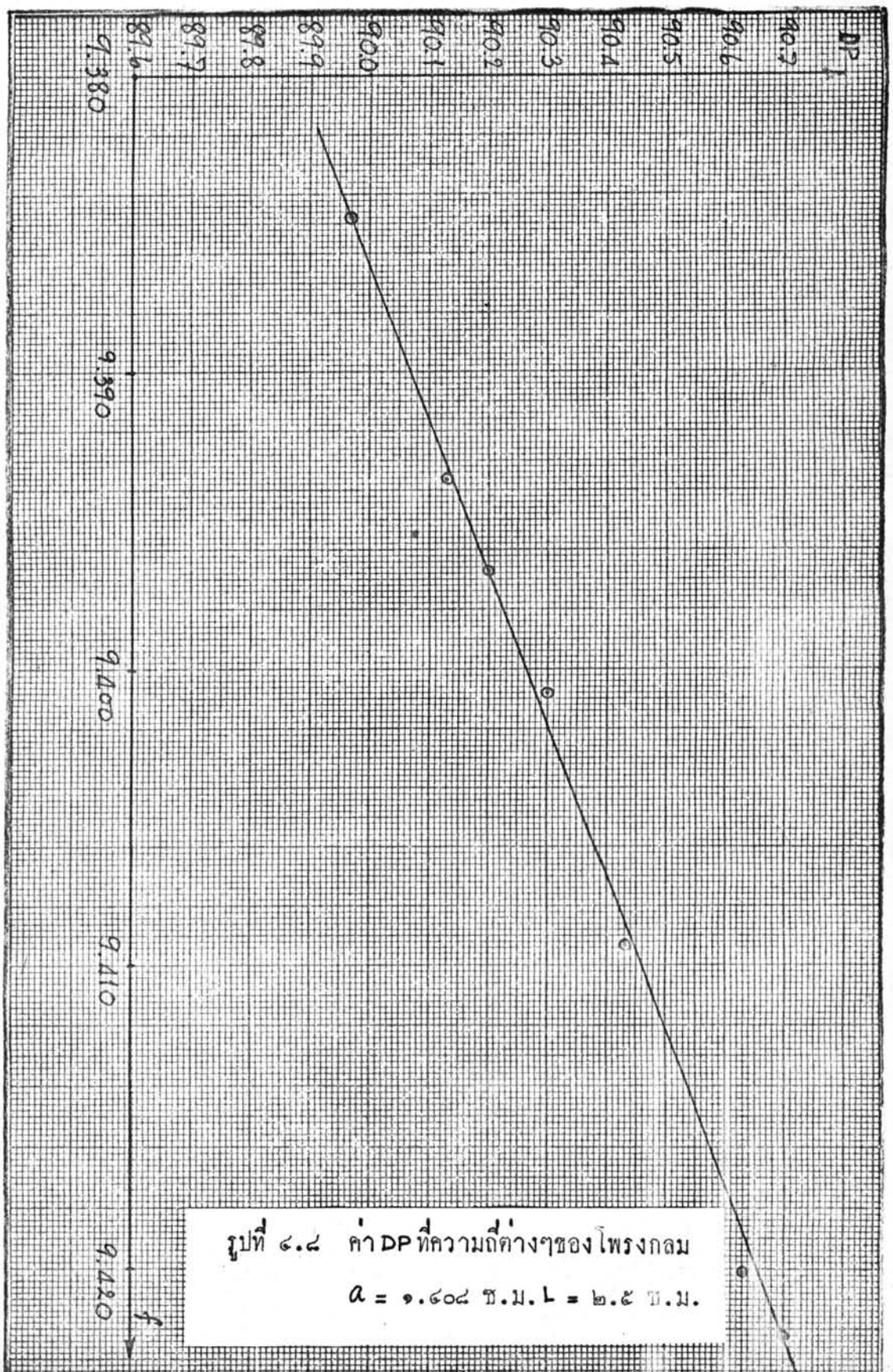
f(GHz)	Z(mm)
๔.๓๘๔๘	๘๔.๔๗
๔.๓๙๓๖	๔๐.๑๓
๔.๓๙๖๗	๔๐.๒๐
๔.๔๐๐๘	๔๐.๓๐
๔.๔๐๔๓	๔๐.๔๓
๔.๔๒๐๑	๔๐.๖๓
๔.๔๒๒๒	๔๐.๗๐

ตารางที่ ๔.๔ ค่า DP ของโพรงกลม a = ๑.๔๐๘ ซ.ม. L = ๒.๕ ซ.ม. ซึ่งเป็นโพรงกลมที่ว่างเปล่า

เมื่อใส่โพลีเอทธิลีนเข้าไปในโพรง เราวัดค่าต่างๆออกมาได้ตามตารางที่ ๔.๕

f(GHz)	Z(mm)	A(DB)	λ(mm)	DP(mm)	θ(°)	(1+ρ)/(1-ρ)
๔.๓๙๖๕	๔๕.๐๓	๑๖.๒๖	๔๔.๗๐	๔๐.๑๔๕	-๐.๑๐๘	๖.๕๐
๔.๓๙๗๖	๔๔.๔๐	๑๕.๑๒	๔๔.๖๔	๔๐.๒๑๕	-๐.๐๔๓	๕.๗๐
๔.๔๐๐๔	๔๔.๐๗	๑๔.๔๐	๔๔.๖๖	๔๐.๒๗๐	-๐.๐๘๕	๕.๒๕
๔.๔๐๐๔	๔๓.๘๐	๑๓.๘๐	๔๔.๖๖	๔๐.๒๘๐	-๐.๐๗๔	๔.๔๐
๔.๔๐๕๘	๔๑.๑๓	๑๒.๐๔	๔๔.๖๑	๔๐.๓๗๐	-๐.๐๑๗	๔.๐๐
๔.๔๑๑๖	๘๘.๗๐	๑๒.๘๐	๔๔.๕๖	๔๐.๔๘๐	๐.๐๔๐	๔.๓๗
๔.๔๑๓๖	๘๖.๔๓	๑๔.๓๒	๔๔.๕๔	๔๐.๕๒๐	๐.๐๘๑	๕.๒๐
๔.๔๑๔๐	๘๖.๕๓	๑๔.๘๑	๔๔.๔๔	๔๐.๖๒๐	๐.๐๔๒	๕.๕๐

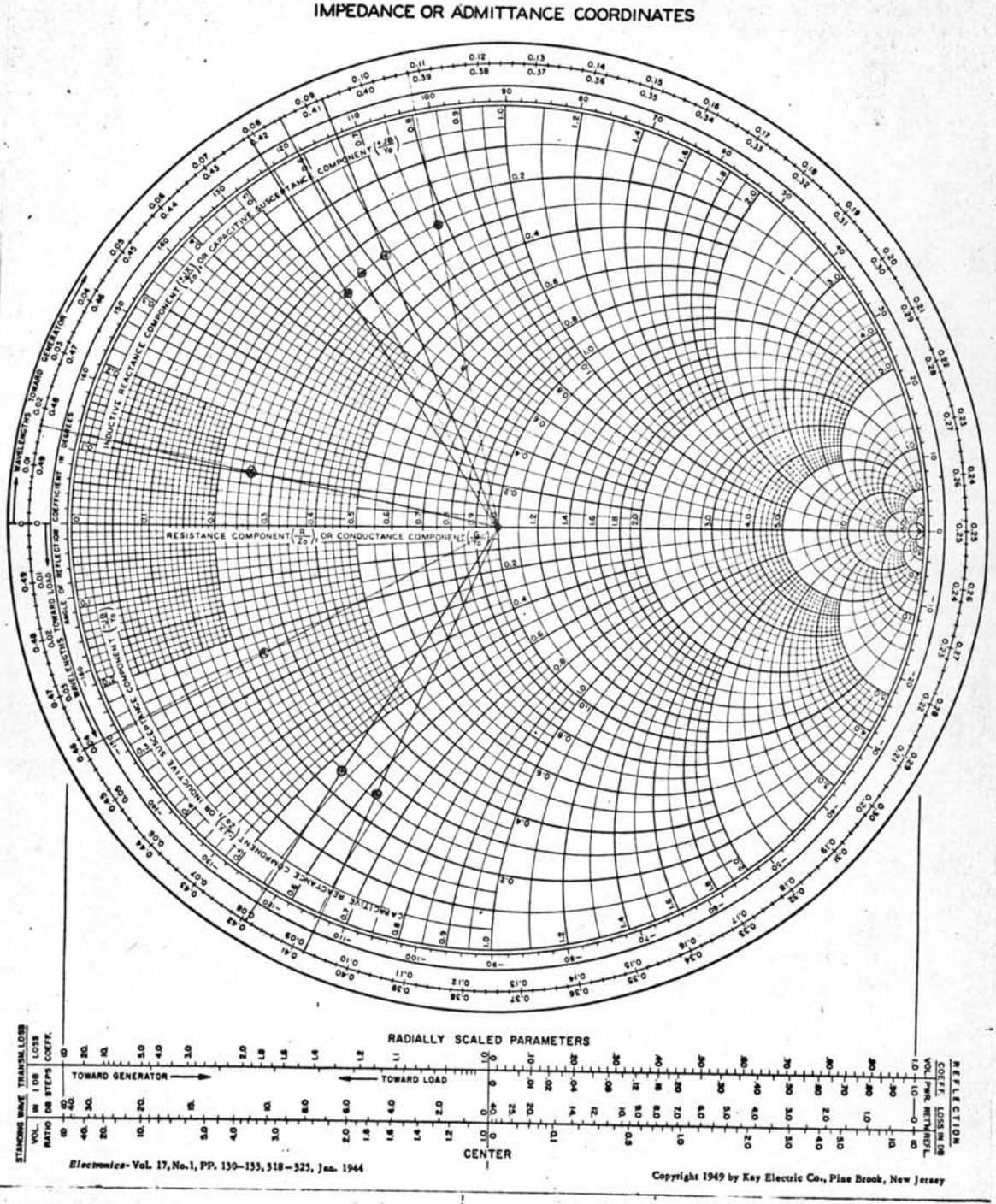
ตารางที่ ๔.๕ ค่าต่างๆที่ได้จากการใส่โพลีเอทธิลีนในโพรงกลม a= ๑.๔๐๘ ซ.ม. L = ๒.๕ ซ.ม.



รูปที่ ๔.๘ ค่า DP ที่ความถี่ต่างๆของโพรงกลม

a = ๑.๔๐๔ ซ.ม. L = ๒.๕ ซ.ม.

NAME	TITLE วงกลม Q ของโพรงกลม	DWG. NO.
SMITH CHART FORM 5301-7560-N	GENERAL RADIO COMPANY, WEST CONCORD, MASSACHUSETTS	DATE



Electronics- Vol. 17, No. 1, PP. 130–133, 318–325, Jan. 1944

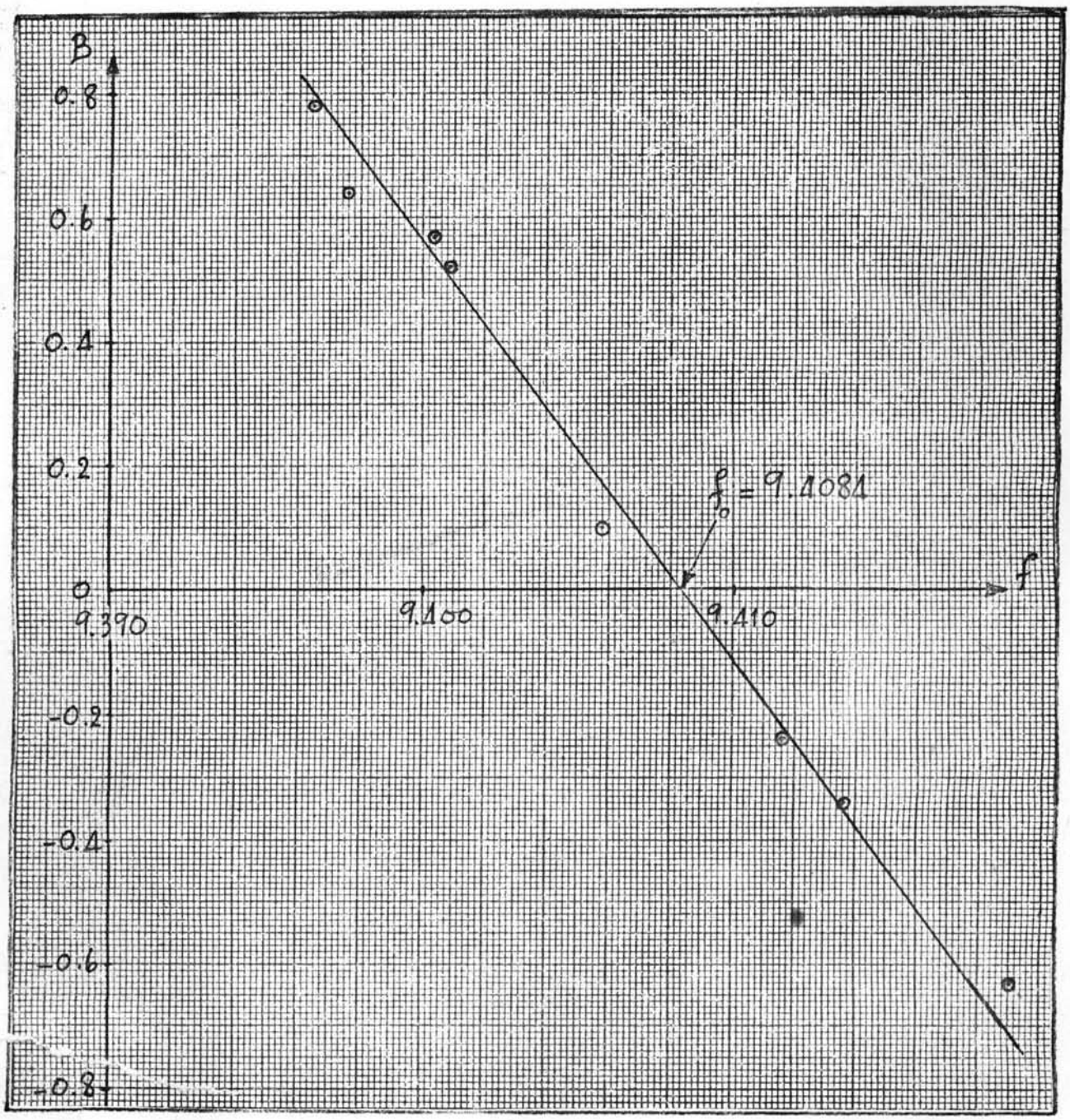
Copyright 1949 by Kay Electric Co., Pine Brook, New Jersey

รูปที่ ๔.๔ แผนภูมิสมิธของโพรงกลม a = ๑.๔๐๔ ซ.ม. L = ๓.๕ ซ.ม.

f(GHz)	G	B
๔.๓๔๖๕	๐.๒๕	๐.๗๘
๔.๓๔๗๖	๐.๒๕	๐.๖๔
๔.๔๐๐๔	๐.๒๕	๐.๕๗
๔.๔๐๐๔	๐.๒๖	๐.๕๒
๔.๔๐๕๘	๐.๒๖	๐.๑๐
๔.๔๑๑๖	๐.๒๕	-๐.๒๔
๔.๔๑๓๖	๐.๒๕	-๐.๕๔
๔.๔๑๔๐	๐.๒๖	-๐.๖๓

ตารางที่ ๔.๖ ค่า G และ B ที่ความถี่ต่างๆสำหรับโพรงกลม

a = ๑.๔๐๘ ซ.ม. L = ๒.๕ ซ.ม.



รูปที่ ๔.๑๐ B เป็นฟังค์ชันของ f สำหรับโพรงกลม a = ๑.๔๐๔ ซ.ม.

L = ๒.๕ ซ.ม.

จากรูปที่ ๔.๙ เราจะได้ผลออกมาตามตารางที่ ๔.๖ จากตารางที่ ๔.๖ เราจะได้ผลออกมาตามรูปที่ ๔.๑๐ และจากรูปที่ ๔.๑๐ เราจะได้ค่าความถี่อภินาท f_0 มีค่าเท่ากับ ๙.๔๐๘๔ จิกะเฮิทซ์ เพราะฉะนั้นเราจึงคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเลคตริก K ได้เป็น

$$K = (c/2f_0)^2 \left[(1/L)^2 + (3.83/\pi a)^2 \right] = 2.32$$

โดยที่ L = ๒.๕ ซ.ม. a = ๑.๔๐๘ ซ.ม.

และสำหรับโพรงกลมที่มีขนาด a = ๑.๕๐๒ ซ.ม. L = ๒.๕ ซ.ม. เราทำการวัดเช่นเดียวกันกับโพรงกลมทั้งสองอันดังได้กล่าวมาแล้ว ผลปรากฏว่าได้ความถี่อภินาทออกมาเท่ากับ ๘.๙๑๐๐ จิกะเฮิทซ์ ดังนั้นเราจึงคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเลคตริกออกมาได้เท่ากับ ๒.๓๒ เพราะฉะนั้นจากทั้งสามโพรงกลมจึงสรุปผลออกมาได้ตามตารางที่ ๔.๗

ความถี่อภินาท (GH_z)	$K = \epsilon/\epsilon_0$ (จากการวัด)	L (ซ.ม.)	a (ซ.ม.)
๘.๖๓๔๒	๒.๓๓๓	๑.๘๗๕	๑.๗๔๔
๘.๙๑๐๐	๒.๓๒๑	๒.๕๐๐	๑.๕๐๒
๙.๔๐๘๔	๒.๓๑๒	๒.๕๐๐	๑.๔๐๘

ตารางที่ ๔.๗ ค่าคงที่ไดอิเลคตริก K ของโพลีเอทธิลีน โดยการใช้โพรงกลมขนาดต่างๆกัน

จากตารางที่ ๔.๗ เราจะได้ค่าคงที่ไดอิเลคตริกโดยเฉลี่ยออกมาเป็น ๒.๓๒ ± ๐.๐๑

๔.๔.๒ โดยการวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อน

เราอาจพิสูจน์ได้โดยการทดลองหลายวิธีว่า โพลีเอทธิลีนดูดกลืนพลังงานได้น้อยมาก ในกรณีนี้เราสามารถวัดค่า κ ของสารนี้ได้โดยวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อน Γ ดังที่ได้พูดเอาไว้ในหัวข้อ ๒.๓ ในการวัดด้วยวิธีนี้เรานำโพลีเอทธิลีนที่ได้เตรียมเอาไว้มากลึงให้มีรูปร่างลักษณะอย่างเดียวกันกับท่อนำคลื่น และให้มีขนาดพอดีที่จะสอดใส่เข้าไปในท่อเหลี่ยมได้เต็มพอดี โพลีเอทธิลีนที่กลึงได้นี้มีขนาดความหนา(d)ต่างๆกัน จากนั้นเราจะสอดโพลีเอทธิลีนรูปเหลี่ยมขนาดความหนาต่างๆกันเข้าไปในท่อนำคลื่น แล้วปิดด้วยแผ่นทองเหลืองดังรูปที่ ๔.๑๑ และจากนั้นก็นำเข้าไปติดกับเครื่องตรงกับตำแหน่งที่เคยติดโพรงกลม ตามที่ได้แสดงเอาไว้ในรูปที่ ๔.๔ การสะท้อนของคลื่นที่ปลายท่อนำคลื่นซึ่งเป็นโลหะและที่ผิวของสาร จะทำให้เกิดคลื่นสถิต ปริมาณที่เราต้องการวัดคือ ความหนาของสาร(d) ระยะทางจากจุดที่มีสนามไฟฟ้ามีความเข้มสูงสุดหรือตำแหน่ง E_{max} จนถึงผิวของสาร(ξ) ระยะทางระหว่าง E_{min} ที่ติดกันในบริเวณท่อนำเหนือผิวของสารจะเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น($\lambda/2$) อัตราส่วน VSWR(E_{max}/E_{min}) และ ความถี่(f) λ และ ξ วัดได้โดยการอาศัยตัวตรวจวัดคลื่นสถิต E_{max}/E_{min} วัดได้โดยใช้แอทเทนูเอเทอร์ f วัดได้ด้วยเวฟมิเตอร์ และ d วัดได้โดยใช้เวอร์เนีย คาลิเปอร์ จากค่าปริมาณเหล่านี้จะทำให้เราคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเลคตริกของสารได้โดยอาศัยสมการ

$$\kappa = \left(\beta_1^2 + \frac{\pi^2}{a^2}\right)\left(\frac{e}{2\pi f}\right)^2 \qquad (๔.๔.๒.๑)$$

โดยที่ e คือความเร็วของแสงในสูญญากาศ a คือความกว้างของท่อนำคลื่น และค่า β_2 นั้นเราหาได้จากสมการ

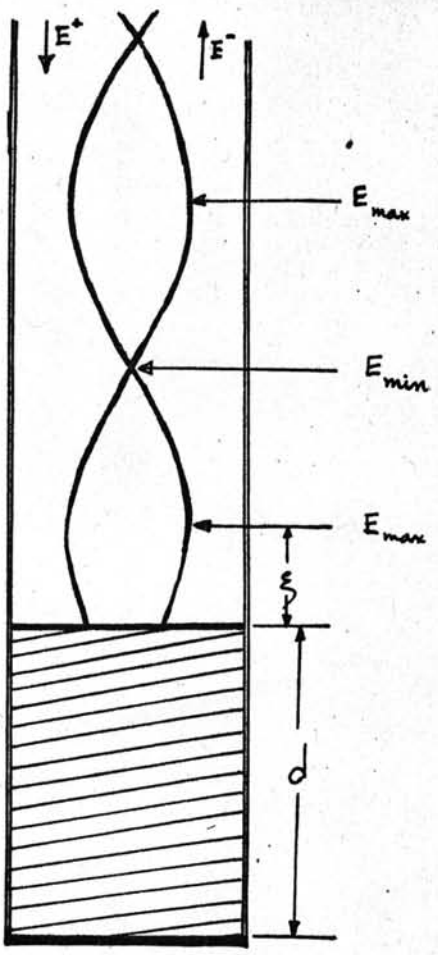
$$\tan\theta = \frac{2\beta_1\beta_2 \sin 2\beta_2 d}{(\beta_1^2-\beta_2^2) - (\beta_1^2+\beta_2^2)\cos 2\beta_2 d} \qquad (๔.๔.๒.๒)$$

โดยที่

$$\theta = 2\beta_1\xi \cdot \frac{180}{\pi} \text{ องศา และ } \beta_1 = \frac{2\pi}{\lambda}$$

โพลีเอทธิลีนรูปเหลี่ยมที่ได้ทำการกลึงเอาไว้มีขนาดของความหนา(d) ๓ ขนาด คือมีความหนา ๐.๖๔๘ ซ.ม. ๑.๐๐ ซ.ม. และ ๓.๓๘๑ ซ.ม. ซึ่งเราจะได้แยกทำการวัดแต่ละขนาดดังต่อไปนี้

สำหรับโพลีเอทธิลีนที่มีขนาด d = ๐.๖๔๘ ซ.ม. วัดที่ค่าความถี่ ๘.๗๗๖๒ จิกะเฮิทซ์



รูปที่ ๔.๑๑ การสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผิวของไดอิเลคตริก ที่ไม่มีการดูดกลืนพลังงาน

วัด λ = ๕.๒๔ ซ.ม. ξ = ๑.๑๒๒ ซ.ม. เราคำนวณได้ $\beta_1 = \frac{2\pi}{\lambda}$ = ๑.๑๔๑ ซ.ม.$^{-1}$
$\theta = 2\beta_1 \xi \times \frac{180}{\pi}$ = ๑๕๔.๑๗° $\tan\theta$ = − 0.4841 = $\frac{2\beta_1\beta_2 \sin\beta_2 d}{(\beta_1^2-\beta_2^2)-(\beta_1^2+\beta_2^2)\cos\beta_2 d}$ = A
จากการเปลี่ยนค่า β_2 ต่างๆจะทำให้เราคำนวณ A ออกมาได้ตามที่ได้แสดงเอาไว้ในตาราง ที่ ๔.๘ จากตารางอันนี้จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง A กับ β_2 ตามรูปที่ ๔.๑๒ จากรูปนี้และจากค่า $\tan\theta$ = −๐.๔๘๔๑ จะทำให้เราได้ค่า β_2 = ๒.๔๑ ซ.ม.$^{-1}$

β_2 (ซม.$^{-1}$)	A
๑.๖	๓.๑๑๔
๑.๘	๑.๒๘๒
๒.๐	๐.๖๔๕
๒.๒	๐.๑๓๐
๒.๔	−๐.๔๓๔
๒.๖	−๑.๕๒๔

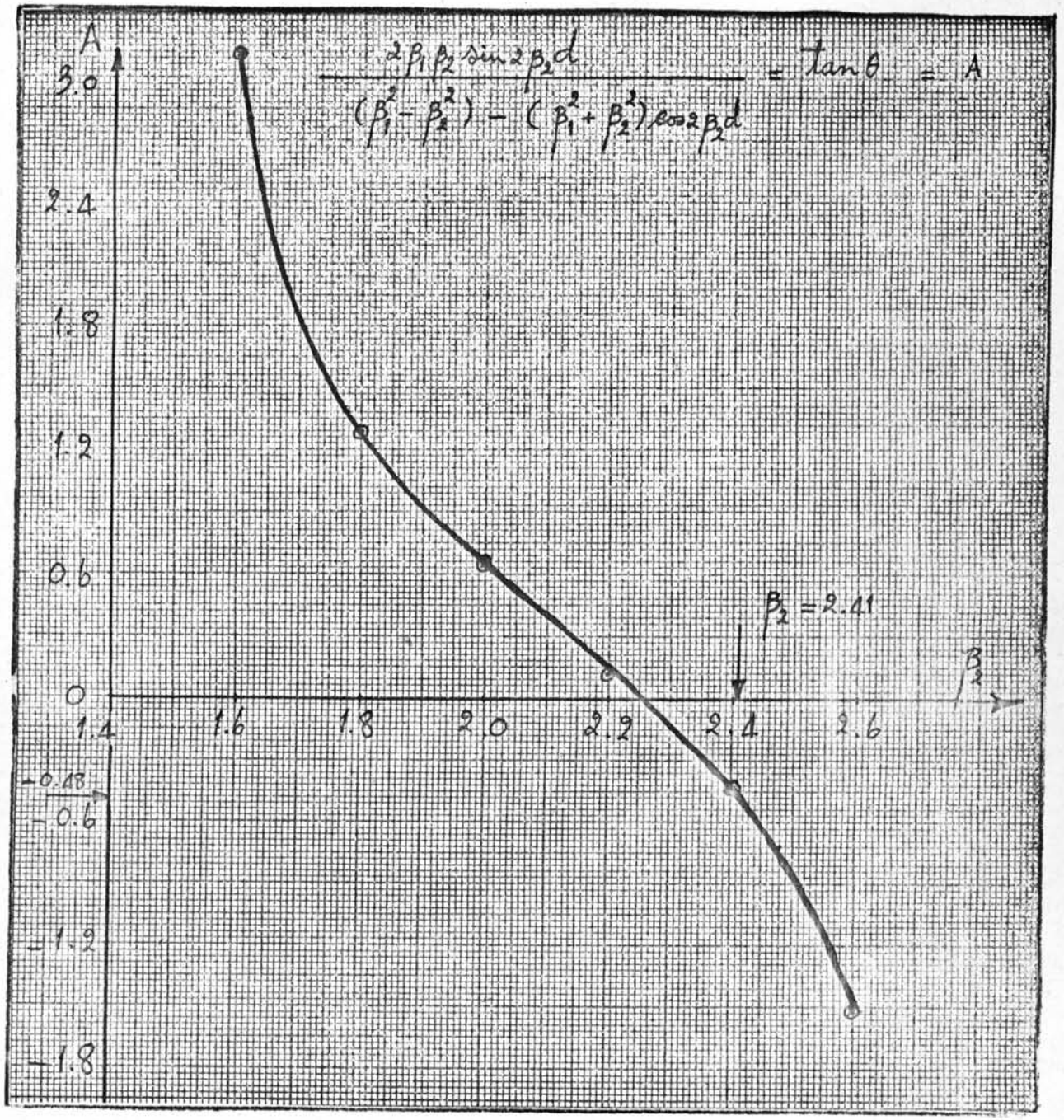
ตารางที่ ๔.๘ ค่า A ที่ได้จากการเปลี่ยนค่า β_2 ที่ f = ๘.๗๗๖๒ จิกะเฮิทซ์
d = ๐.๖๔๘ ซ.ม. λ = ๕.๒๔ ซ.ม. β_1 = ๑.๑๔๔๑ ซ.ม.$^{-1}$

แทนค่า β_2 = ๒.๔๑ ซ.ม.$^{-1}$ a = ๒.๒๘๖ ซ.ม. f = ๘.๗๗๖๒ × ๑๐^{๙} เฮิทซ์ และ c = ๓ × ๑๐^{๑๐} ซ.ม./วินาที ลงไปในสมการ(๔.๔.๒.๑) เราจะได้

$$\kappa = [(2.41)^2 + (\pi/2.286)^2]\left(\frac{3\times10^{10}}{2\pi\times8.7762\times10^{9}}\right)^2 = 2.28$$

โพลีเอทธิลีนอันเดียวกันนี้ วัดที่ความถี่ต่างๆก็กระทำตามวิธีอย่างเดียวกันดังได้แสดงเอาไว้ตามข้างบน ผลที่ได้แสดงเอาไว้ในตารางที่ ๔.๙

<u>หมายเหตุ</u> ถ้าเราพิจารณาสมการ(๔.๔.๒.๒) สำหรับค่าคงที่ β_1 และ d ถ้าเราเขียนกราฟระหว่างฟังก์ชันนี้กับ β_2 เราจะพบว่าค่าของฟังก์ชันเปลี่ยนกลับไปกลับมาคล้ายๆกับฟังก์ชันของ *sine* หรือ *cosine* ลักษณะนี้จะทำให้เราได้ค่า β_2 หลายๆค่าสำหรับ θ ค่าใดค่าหนึ่ง ซึ่งหมายถึงได้ค่า κ หลายค่าด้วย ปัญหาจึงเกิดขึ้นว่า β_2 ค่าใดที่ให้ค่า κ ที่ถูกต้อง เราอาจจะแก้ปัญหานี้ได้โดยทำการทดลองที่หลายๆความถี่ ซึ่งแต่ละความถี่จะให้ β_2 หลายๆค่า ค่า



รูปที่ ๔.๑๒ A ที่เป็นฟังก์ชันของ β_2 โดยใช้ความถี่ ๘.๙๗๖๒ จิกะเฮิรตซ์

β_2 ที่ถูกต้องจะต้องเป็น β_2 ของแต่ละความถี่ซึ่งให้ค่า κ ค่าเดียวกันเท่านั้น โดยวิธีนี้เราอาจหาค่า κ ที่ถูกต้องได้ หรือเราอาจแก้ปัญหานี้โดยอาศัยค่า κ ซึ่งได้จากการทดลองของโพรงกลม โดยการเลือกเอาค่า β_2 ที่ให้ κ ที่ใกล้เคียงกับค่า κ ที่ได้จากการทดลองของโพรงกลม เราก็อาจได้ค่า κ ที่ถูกต้องได้เช่นกัน

f (GHz)	λ (cm)	ξ (cm)	θ (°)	β_1 (cm^{-1})	β_2 (cm^{-1})	$\kappa = \epsilon/\epsilon_0$
๘.๓๗๖๒	๕.๒๔	๑.๑๒๒	๑๕๔.๑๓๐	๑.๑๔๔๑	๒.๔๑	๒.๒๘
๘.๘๑๒๐	๕.๑๗	๑.๐๗๕	๑๔๔.๗๐๘	๑.๒๑๕๓	๒.๔๔	๒.๓๐
๘.๘๔๔๗	๕.๑๘	๑.๑๐๗	๑๕๓.๘๗๓	๑.๒๑๓๐	๒.๔๑	๒.๒๔
๙.๖๒๙๙	๔.๒๙	๐.๖๘๕	๑๑๔.๙๖๔	๑.๔๖๔๖	๒.๗๒	๒.๒๘
๙.๖๕๖๘	๔.๒๘	๐.๖๕๒	๑๐๙.๖๘๐	๑.๔๖๘๐	๒.๗๖	๒.๗๒

ตารางที่ ๔.๙ ค่าคงที่ไดอิเลคตริกของโพลีเอทธิลีนที่มีความหนา ๐.๖๙๘ ซ.ม. ที่ค่าความถี่ต่างๆ

จากค่าที่ได้ตามตารางที่ ๔.๙ เราจะได้ค่าไดอิเลคตริกโดยเฉลี่ยออกมาเป็น ๒.๒๘ ± ๐.๑๖

สำหรับโพลีเอทธิลีนที่มีขนาดความหนา d = ๑.๐๐ ซ.ม. โดยใช้ความถี่ ๙.๓๓๖๒ จิกะเฮิทซ์ เราทำการวัดค่าต่างๆออกมาได้ดังนี้

λ = ๔.๕๖ ซ.ม. β_1 = $-$ ๑.๓๓๓๓ ซ.ม.$^{-1}$ ξ = $-$๐.๔๑๑ ซ.ม. θ = $-$๑๔๓.๗๘°

$$\tan\theta = 0.732 = \frac{2\beta_1\beta_2 \sin 2\beta_2 d}{(\beta_1^2-\beta_2^2) - (\beta_1^2+\beta_2^2)\cos 2\beta_2 d} = A$$

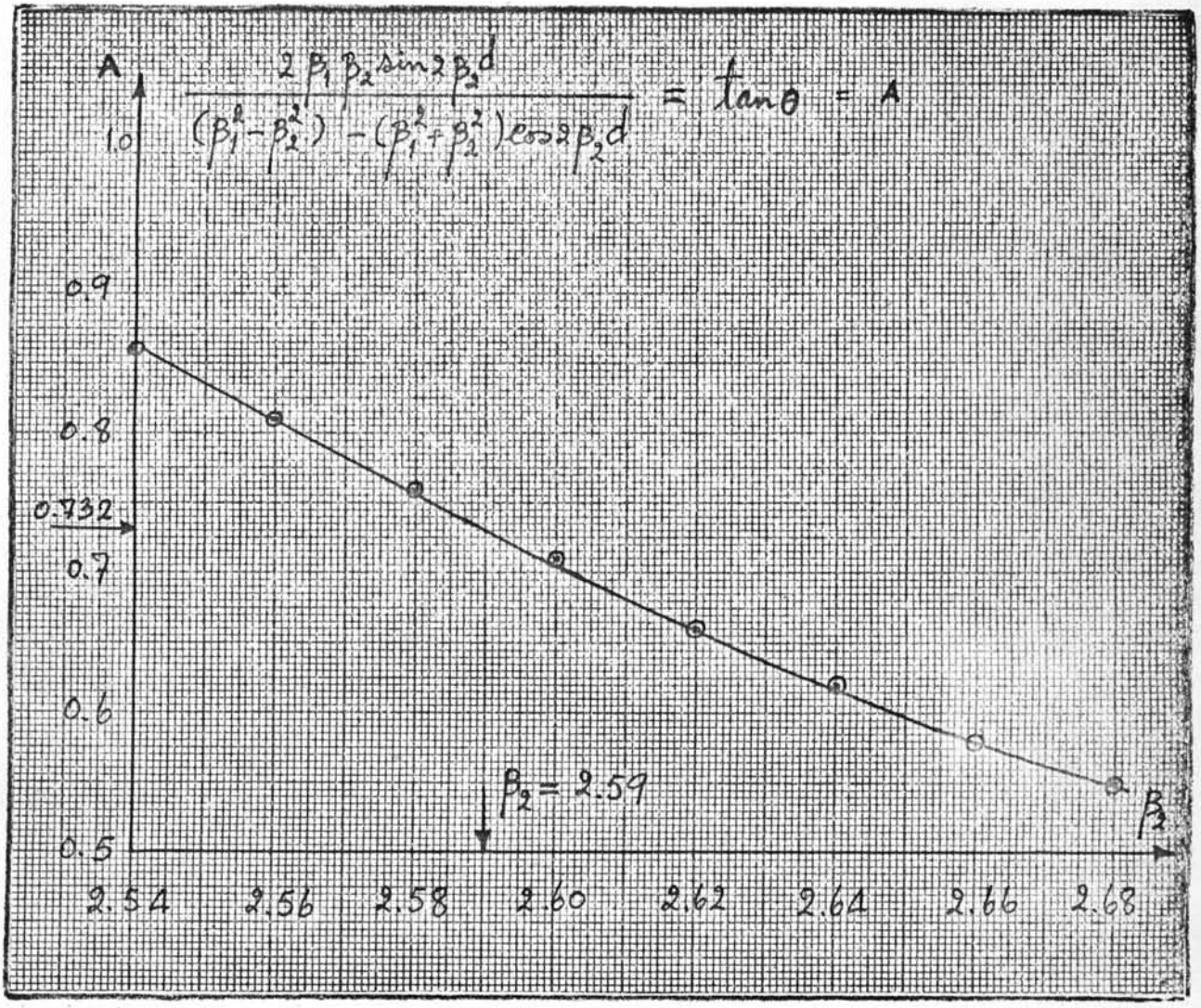
จากการเปลี่ยนค่า β_2 ต่างๆจะทำให้เราได้ค่า A ออกมาได้ตามที่แสดงเอาไว้ในตารางที่ ๔.๑๐ และ A มีความสัมพันธ์กับ β_2 ดังรูปที่ ๔.๑๓ ซึ่งจากรูปนี้ $\tan\theta$ = ๐.๓๓๒ จะให้ค่า β_2 = ๒.๕๔ เพราะฉะนั้นเราจึงได้ค่าคงที่ไดอิเลคตริก

$$\kappa = \left[(2.59)^2 + \left(\frac{\pi}{2.286}\right)^2\right]\left(\frac{3\times10^{10}}{2\pi \times 9.3362\times10^{9}}\right)^2 = 2.25$$

โพลีเอทธิลีนขนาด d = ๑.๐๐ ซ.ม. วัดที่ค่าความถี่ต่างๆก็กระทำตามวิธีอย่างเดียวกันและได้ผลออกมาดังแสดงเอาไว้ในตารางที่ ๔.๑๑

β_2	A
๒.๕๔	๐.๘๖๔
๒.๕๖	๐.๘๐๔
๒.๕๘	๐.๗๕๗
๒.๖๐	๐.๗๐๔
๒.๖๒	๐.๖๖๕
๒.๖๔	๐.๖๒๓
๒.๖๖	๐.๕๘๔
๒.๖๘	๐.๕๔๗

ตารางที่ ๔.๑๐ ค่า A ที่ได้เมื่อแปรค่า β_2 ที่ค่าความถี่ f = ๔.๓๓๖๒ จิกะเฮิรซ์



รูปที่ ๔.๑๓ A เป็นฟังค์ชันของ β_2 ที่ค่าความถี่ ๔.๓๓๖๒ จิกะเฮิทซ์

f(GHz)	λ(cm)	ξ(cm)	θ(°)	β_1(cm^{-1})	β_2(cm^{-1})	$k = \epsilon/\epsilon_0$
๘.๘๒๐๑	๓.๐๕	๑.๖๐๐	๒๒๗.๕๐	๑.๒๔๐๘	๒.๔๒	๒.๒๗
๘.๗๗๓๖	๓.๑๘	๑.๗๐๐	๒๓๖.๓๐	๑.๒๑๓๐	๒.๓๔	๒.๑๘
๙.๒๐๐๕	๓.๖๖	-๐.๙๓๑	-๑๔๓.๘๔	๑.๓๔๘๓	๒.๕๘	๒.๓๐
๙.๒๖๒๑	๓.๖๒	-๐.๙๑๐	-๑๔๑.๘๒	๑.๓๖๐๐	๒.๕๖	๒.๒๔
๙.๓๑๐๙	๓.๕๘	-๐.๙๐๙	-๑๔๒.๙๐	๑.๓๓๑๙	๒.๕๘	๒.๒๕
๙.๓๓๖๒	๓.๕๖	-๐.๙๑๑	-๑๔๓.๗๘	๑.๓๓๗๓	๒.๕๙	๒.๒๕

ตารางที่ ๔.๑๑ ค่าคงที่ไดอิเลคตริกของโพลีเอทธิลีนที่มีความหนา ๑.๐๐ ซ.ม. ที่ค่าความถี่ต่างๆ

จากตารางที่ ๔.๑๑ เราจะได้ค่าคงที่ไดอิเลคตริกโดยเฉลี่ยเท่ากับ ๒.๒๕ ± ๐.๐๔

และสำหรับโพลีเอทธิลีนที่มีความหนา ๓.๓๘๑ ซ.ม. ได้ทำการวัดที่ค่าความถี่ ๓ ค่า และได้ผลออกมาตามตารางที่ ๔.๑๒

f(GHz)	λ(cm)	ξ(cm)	θ(°)	β_1(cm^{-1})	β_2(cm^{-1})	k
๙.๑๖๔๖	๔.๗๔	๑.๕๔๙	๒๔๒.๘๙	๑.๓๒๕๖	๒.๕๓	๒.๒๕
๙.๑๙๙๐	๔.๕๙	๑.๔๒๔	๒๒๓.๓๗	๑.๓๖๘๙	๒.๖๐	๒.๓๓
๙.๒๑๙๒	๔.๕๘	๑.๔๖๙	๒๓๐.๙๔	๑.๓๗๑๙	๒.๕๗	๒.๒๘

ตารางที่ ๔.๑๒ ค่าคงที่ไดอิเลคตริกของโพลีเอทธิลีนที่มีความหนา ๓.๓๘๑ ซ.ม. ที่ค่าความถี่ต่างๆ

จากตารางที่ ๔.๑๒ เราจะได้ค่าคงที่ไดอิเลคตริกโดยเฉลี่ยเท่ากับ ๒.๒๙ ± ๐.๐๓

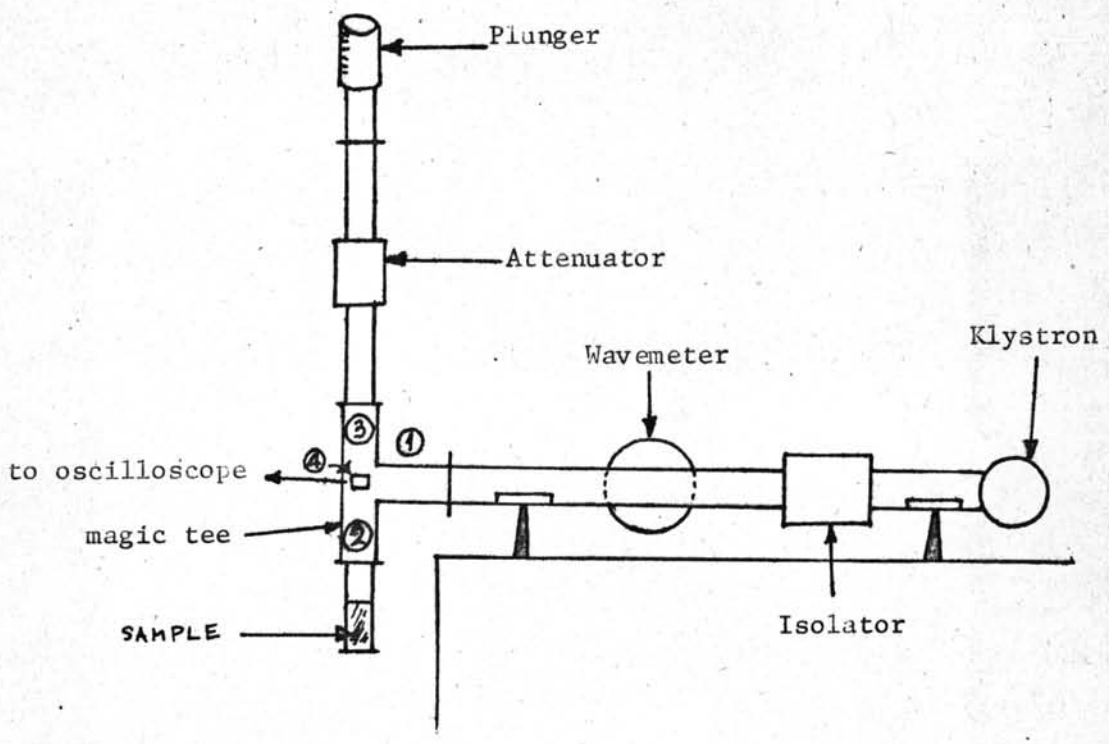
๔.๕ การวัดค่าคงที่ไดอิเลคตริกของสารตัวอย่างที่เป็นของเหลว

เนื่องจากว่าเปอมิตติวิตีของสารอาจเขียนได้เป็น $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$ ค่า ϵ''/ϵ' เป็นค่าที่แสดงถึงคุณสมบัติในการดูดกลืนพลังงานของสาร ในการวิจัยในช่วงนี้เราได้แยกสารที่ทำการทดลองออกเป็นสองประเภท ได้แก่พวกที่มี $(\epsilon''/\epsilon') \approx 0$ เช่นโพลีเอทธิลีนซึ่งได้ทำการวัดไปแล้ว ส่วนของเหลวที่จะทำการวัดคือเฮพเทน(HEPTANE $\approx C_7H_{16}$) และคาร์บอนเทตตระคลอไรด์(CARBONTETRACHLORIDE CCl_4) และอีกประเภทหนึ่งได้แก่พวกที่มี $(\epsilon''/\epsilon') \neq 0$ ตัวอย่างเช่นน้ำเป็นต้น ในการวัดสารตัวอย่างพวกแรกเราจะใช้แมจิกที เพราะมีความไวต่อการจับสัญญาณได้ดีกว่าตัวตรวจวัดคลื่นสถิต แต่แทบจะวัดค่าแอทเทนูเอชันไม่ได้เลยซึ่งก็ไม่มีความจำเป็นสำหรับวิธีนี้ ส่วนพวกหลังเราจะใช้วิธีการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ดังจะได้กล่าวในตอนต่อไป

๔.๕.๑ โดยการใช้แมจิกที

ในการวัดเราจะเทสารที่เป็นของเหลวเช่นเฮพเทนหรือคาร์บอนเทตตระคลอไรด์ใส่ลงไปในท่อสั้นที่ได้เตรียมเอาไว้ให้มีขนาดของความลึก(d)แตกต่างกัน แล้วนำไปติดเข้ากับส่วนอื่นๆของเครื่องมือดังได้แสดงเอาไว้ตามรูปที่ ๔.๑๔ ปริมาณที่เราต้องการคือความถี่ f วัดได้โดยใช้เวฟมิเตอร์ ความลึก d วัดได้โดยใช้เวอร์เนีย คาลิเปอร์ λ และ ξ วัดได้โดยใช้วิธีการปรับแต่งตำแหน่งของพลันเจอร์และแอทเทนูเอเตอร์ ส่วน E_{max}/E_{min} ก็ใช้วิธีวัดเช่นเดียวกัน ในการทดลองเราติดเครื่องจับคลื่น(DETECTOR DIODE)ไว้ที่แขนสี่ จากค่าของปริมาณเหล่านี้จะทำให้เราสามารถคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเลคตริกของเฮพเทนหรือคาร์บอนเทตตระคลอไรด์ได้โดยอาศัยสมการ(๔.๔.๒.๑) และ สมการ(๔.๔.๒.๒)

ในกรณีของเฮพเทน วัดที่ค่าความลึก ๓ ขนาดคือ ๒.๐๖ ซ.ม. ๒.๓๔๒ ซ.ม. และ ๒.๕๔๘ ซ.ม. ให้ผลออกมาตามตารางที่ ๔.๑๓ และในกรณีของคาร์บอนเทตตระคลอไรด์ใช้ความลึก ๔ ขนาดคือ ๑.๕๒๐ ซ.ม. ๑.๕๔๘ ซ.ม. ๑.๗๐๗ ซ.ม. และ ๑.๗๓๐ ซ.ม. จากผลของการวัดแสดงไว้ตามตารางที่ ๔.๑๔



รูปที่ ๔.๑๔ การวัดโดยใช้แมจิกที

การวัดด้วยแมจิกทีแตกต่างจากการวัดโดยใช้ตัววัดคลื่นสถิตเล็กน้อย กล่าวคือเราแต่งพลัน - เจอร์ซึ่งก็คือเป็นการเปลี่ยนตำแหน่งที่คลื่นสะท้อนกลับทางแขนที่สาม จนกระทั่งเฟสของคลื่นที่สะท้อนกลับที่เข้าสู่แมจิกทีเท่ากับเฟสของคลื่นที่สะท้อนจากสารตัวอย่าง ในเวลาเดียวกันเราแต่งแอทเทนูเอเตอร์จนกระทั่งคลื่นที่สะท้อนกลับทางแขนที่สามมีความเข้มเท่ากับคลื่นที่สะท้อนจากสารตัวอย่าง ในกรณีนี้เครื่องจับสัญญาณที่แขนที่สี่จะอ่านสัญญาณเท่ากับศูนย์ จากตำแหน่งของพลันเจอร์และแอทเทนูเอเตอร์ เราสามารถหาค่า ζ และ E_{max}/E_{min} ได้ตามต้องการ เหตุที่เราใช้แมจิกทีแทนตัวตรวจวัดคลื่นสถิตนั้นเพราะว่าในการวัดของเหลวจะต้องตั้งหงายขึ้น ในกรณีนี้ใช้แมจิกทีจะเหมาะกว่า เพราะตัวตรวจวัดคลื่นสถิตมีน้ำหนักมากจึงไม่เหมาะที่จะวางห้อยในแนวดิ่ง ดังนั้นจึงเลี่ยงข้อลำบากนี้โดยใช้แมจิกที อย่างไรก็ตามในบางกรณีถ้าจำเป็น เช่นในกรณีที่คลื่นสะท้อนกลับจากสารมีความเข้มน้อย เราอาจต้องติดตั้งตัวตรวจวัดคลื่นสถิตในแนวดิ่งเหมือนกัน ดังแสดงในหัวข้อ(๔.๕.๒)

$d(cm)$	$f(GHz)$	$\lambda(cm)$	$\xi(cm)$	$\theta(^\circ)$	$\beta_1(cm^{-1})$	$\beta_2(cm^{-1})$	K
๒.๐๖๐	๙.๘๓๑๒	๙.๑๐	๐.๐๘๓	๑๙.๕๖	๑.๕๓๒๕	๒.๕๒	๑.๙๙
๒.๓๙๒	๙.๒๑๒๕	๙.๖๙	๐.๒๖๙๕	๙๑.๓๗	๑.๓๓๙๗	๒.๙๓	๒.๑๑
๒.๕๙๘	๘.๖๕๖๕	๕.๓๑	-๐.๒๓๑๕	-๓๑.๓๙	๑.๑๘๓๓	๒.๐๗	๑.๘๘

ตารางที่ ๔.๑๓ ค่าคงที่ไดอิเลคตริกของเฮพเทนที่ค่าความลึกและค่าความถี่ต่างๆ

จากตารางที่ ๔.๑๓ เราจะได้ค่าคงที่ไดอิเลคตริกของเฮพเทนโดยเฉลี่ยออกมาเป็น

$K = ๑.๙๘ \pm ๐.๑๐$

$d(cm)$	$f(GHz)$	$\lambda(cm)$	$\xi(cm)$	$\theta(^\circ)$	$\beta_1(cm^{-1})$	$\beta_2(cm^{-1})$	K
๑.๕๒๐	๙.๒๑๒๗	๙.๖๓๐	๐.๘๘๙	๑๓๗.๙๗	๑.๓๕๗๑	๒.๙๓	๒.๐๙
๑.๕๙๘	๙.๒๕๒๕	๙.๕๖๘	๐.๗๗๖	๑๒๕.๓๑	๑.๓๗๕๕	๒.๙๕	๒.๑๐
	๙.๘๘๐๕	๙.๐๖๕	๐.๙๕๙	๘๑.๒๗	๑.๕๙๕๗	๒.๖๖	๒.๐๙
	๙.๙๗๙๕	๙.๘๗๒	๐.๘๗๐	๑๒๘.๕๕	๑.๒๘๙๖	๒.๙๓	๒.๒๐
๑.๓๐๗	๘.๖๙๕๙	๕.๒๙๒	๐.๙๑๗	๑๒๙.๙๙	๑.๑๙๘๖	๒.๒๙	๒.๑๕
	๘.๗๑๐๒	๕.๒๒๘	๐.๙๐๙	๑๒๙.๕๑	๑.๒๐๑๘	๒.๓๐	๒.๑๖
	๘.๘๓๓๙	๙.๑๐๐	๑.๘๕๓	๓๒๕.๙๘	๑.๕๓๒๕	๒.๘๖	๒.๓๗
	๙.๒๖๙๓	๙.๕๘๓	๐.๖๕๙	๑๐๒.๗๘	๑.๓๗๑๐	๒.๙๐	๒.๐๓
๑.๗๓๐	๘.๖๖๙๖	๕.๓๐๐	๐.๙๕๙	๖๒.๙๐	๑.๑๘๖๙	๒.๓๙	๒.๓๑
	๙.๘๙๗๑	๙.๐๖๐	๐.๒๒๑	๓๙.๐๗	๑.๕๙๖๙	๒.๖๑	๒.๐๒

ตารางที่ ๔.๑๔ ค่าคงที่ไดอิเลคตริกของคาร์บอนเทตระคลอไรด์ ที่ค่าความลึกและค่าความถี่ต่างๆ

จากตารางที่ ๔.๑๔ เราจะได้ค่าคงที่ไดอิเลคตริกของคาร์บอนเทตระคลอไรด์โดยเฉลี่ยออกมาเป็น $K = ๒.๑๕ \pm ๐.๑๑$

๔.๕.๒ โดยการวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อน

การวัดค่าคงที่ไดอิเลคตริกของสารตัวอย่างพวกที่มี $\epsilon''/\epsilon' \neq 0$ เราได้ทำการวัดโดยใช้สารตัวอย่างที่เป็นของเหลวมีความลึกพอสมควร (d) และมีค่าความลึกต่างๆกัน สารตัวอย่างที่ได้เลือกมาทำการวัดคือเอทธิลีน ไกลคอล (ETHYLENE GLYCOL) เครื่องมือที่ใช้ในการวัดแสดงไว้ตามรูปที่ ๔.๑๕ ตอนแรกเราเทสารตัวอย่างเอทธิลีน ไกลคอลลงไปในท่อสั้นดังรูปที่ ๔.๑๖ แล้วนำไปติดเข้ากับชุดของเครื่องมือ เราจะทำการวัดค่าความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าก่อนอื่นโดยใช้เวฟมิเตอร์ จากนั้นก็ทำการวัดหาตำแหน่งที่จะให้ค่าสูงสุดของสนามไฟฟ้าตามขวางโดยการเลื่อนปุ่มที่ติดอยู่บนตัวตรวจวัดคลื่นสถิตไปมา ก็จะทำให้สามารถวัดหาตำแหน่งต่างๆได้จากมาตราส่วนที่บอกไว้บนตัวตรวจวัดคลื่นสถิต ส่วนที่จะดูว่าค่าของสนามสูงสุดหรือยังนั้นสังเกตได้จากจอของออสซิลโลสโคป จากตำแหน่งต่างๆที่ได้นี้จะนำไปคำนวณหาค่าความยาวคลื่น λ ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและคำนวณหาค่า ξ ได้ ท้ายที่สุดวัดแอทเทนูเอชันได้ ในการวัดค่าอันนี้เราเลื่อนปุ่มที่ติดอยู่บนตัวตรวจวัดคลื่นสถิตไปที่ตำแหน่งที่ให้ค่าของสนามน้อยที่สุด ปรากฏให้เห็นบนจอของออสซิลโลสโคปซึ่งเป็นค่าอันแรกที่อยู่ใกล้กับผิวหน้าของสารตัวอย่าง จำตำแหน่งบนจอเอาไว้ แล้วจึงเลื่อนปุ่มบนตัวตรวจวัดคลื่นสถิตออกไปให้ได้ค่าของสนามที่มากที่สุดบนจอ จากนั้นจึงหมุนปุ่มที่ติดอยู่บนแอทเทนูเอเตอร์เข้าไปจนทำให้ได้ค่าของสนามที่ปรากฏบนจอเลื่อนมาอยู่ที่ตำแหน่งที่ให้ค่าของสนามน้อยที่สุด ตำแหน่งบนจออันนี้คือตำแหน่งอันเดิมที่ได้สังเกตุเอาไว้ครั้งแรก แล้วอ่านค่าของแอทเทนูเอชันจากมาตราส่วนที่เขียนติดเอาไว้บนแกนของปุ่มหมุนซึ่งติดอยู่บนแอทเทนูเอเตอร์ ค่าที่อ่านได้จะเป็นมิลลิเมตร จากค่าที่อ่านได้นำไปเทียบค่าบนแผนภูมิซึ่งติดเอาไว้บนแอทเทนูเอเตอร์ก็จะได้ค่าของแอทเทนูเอชันออกมาเป็นเดซิเบล (DB) ซึ่งจากค่าอันนี้ทำให้เราคำนวณหาค่า ς ได้

วิธีการคำนวณหาค่าของค่าคงที่ไดอิเลคตริกของสารตัวอย่าง มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

(๑) จากค่า ξ ที่ได้เราอาศัยสมการ (๒.๗.๒๒) จะคำนวณหามุม ν ได้ โดยที่ $\nu = 2\beta\xi = \frac{4\pi}{\lambda}\xi$ เรเดียน ทำเป็นองศาได้เป็น $\nu = 720\frac{\xi}{\lambda}$ องศา ซึ่งจะนำไปสู่ค่า $\vartheta = \tan\nu$ และ ϑ^2

(๒) จากค่าแอทเทนูเอชันที่วัดได้ออกมาเป็น DB เราคำนวณหา ς ได้โดยอาศัย $\varsigma = (A-1)/(A+1)$ โดยที่ $A = \log^{-1}(DB/20)$ ซึ่งจะทำให้ได้ค่าของ ς^2

(๓) การคำนวณหา Ω และ Ω^2 เราได้อาศัยสมการ(๒.๘.๒๗)คือ

$$\Omega = (1 + \xi^2)/(1 - \xi^2)$$

(๔) คำนวณหา β_0 และ β_0^2 จากสมการ(๒.๘.๔)ที่ว่า $\beta_0 = \frac{2\pi f}{e}\left[1 - \left(\frac{e}{2af}\right)^2\right]^{1/2}$

(๕) คำนวณ β'' และ β''^2 ได้โดยอาศัยสมการ(๒.๘.๓๐)คือ

$$\left(\frac{1}{\vartheta^2} + \Omega^2\right)\beta''^2 + \frac{2\beta_0}{\vartheta}(\Omega^2 - 1)\beta'' - (\Omega^2 - 1)\beta_0^2 = 0$$

(๖) คำนวณหา β' ได้จากสมการ(๒.๘.๒๙)คือ

$$\beta' = \left(\beta_0^2 - \beta''^2 - \frac{2\beta_0\beta''}{\vartheta}\right)^{1/2}$$

(๗) คำนวณหาค่าของ δ' ได้โดยอาศัยสมการ(๒.๘.๑๘)คือ

$$\frac{\beta''}{\beta'} = \tan\frac{\delta'}{2}$$

(๘) คำนวณหาค่า K' และ K'^2 ได้จากสมการ(๒.๘.๑๗)คือ

$$\beta' = \frac{\cos\delta'/2}{\cos^2\frac{1}{2}\delta'}K' \qquad \text{หรือ} \qquad \beta'' = \frac{\sin\delta'/2}{\cos^2\frac{1}{2}\delta'}K'$$

(๙) จากค่าต่างๆที่ได้ตามขั้นตอนทั้ง ๘ อันนั้น เราจะนำไปแทนลงไปในสมการ(๒.๘.๑๓ก) ซึ่งเมื่อจัดรูปใหม่แล้วหารด้วย ϵ_0 จะเป็น

$$K = \epsilon'/\epsilon_0 = \left(\frac{e}{2\pi f}\right)^2\left[K'^2 + \frac{\pi^2}{a^2}\right]$$

<u>ตัวอย่างการคำนวณ</u>

จากการวัดเราได้ค่าต่างๆดังนี้คือ $f = 9.0405 \times 10^9$ เฮิทซ์ $\lambda = 6.558 \times 10^{-2}$ ม. $\xi = -0.2656 \times 10^{-2}$ ม. $A = 13.7$ DB $a = \frac{1}{2}\left\{\left(\frac{f}{e}\right)^2 - \left(\frac{1}{\lambda}\right)^2\right\}^{-1/2} = 2.2718 \times 10^{-2}$ ม.

(๑) คำนวณได้ $\nu = -148.6665$ เพราะฉะนั้น $\vartheta = -0.0819662$ และ $\vartheta^2 = 0.0066658$

(๒) $\varsigma = 0.657635$ และ $\varsigma^2 = 0.4324837$

(๓) $\Omega = 2.524129$ และ $\Omega^2 = 6.371222$

(๔) $\beta_0 = 129.3364$ และ $\beta_0^2 = 16722.915$

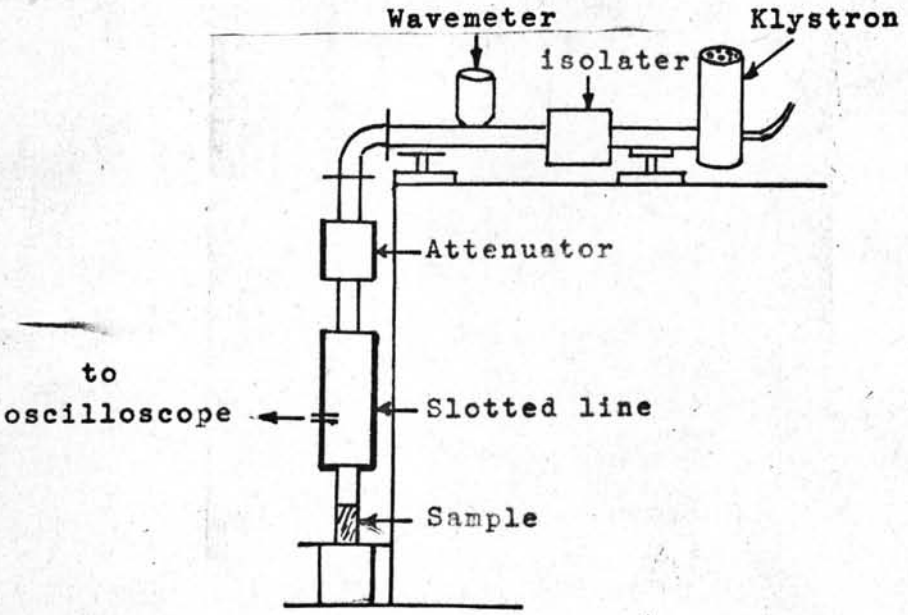
(๕) $\beta'' = 113.8656$ และ $\beta''^2 = 12970.1617$

(๖) $\beta' = 63.73734$

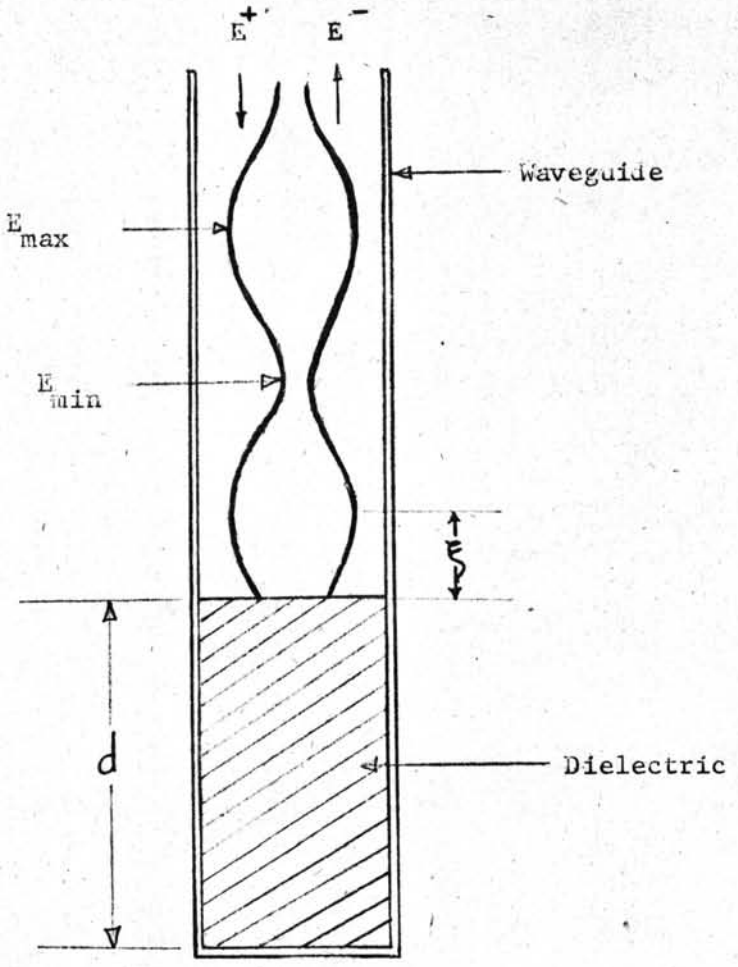
(๗) $\delta'/2 = 10.62662$ และ $\delta' = 21.36485$

(๘) $K' = 542.9033$ และ $K'^2 = 35915.1605$

(๙) เพราะฉะนั้นจะได้ค่าคงที่ไดอิเลคตริกออกมาเป็น 10.34



รูปที่ ๔.๑๕ แสดงการวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อน



หอสมุดกลาง
จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

รูปที่ ๔.๑๖ การสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผิวของไดอิเลคตริกที่ดูดกลืนพลังงาน

จากการวัดค่าความถี่ต่างๆ แล้วนำมาคำนวณตามตัวอย่างการคำนวณที่ได้ให้ไว้ตามข้างต้น จะได้ผลออกมาตามตารางที่ ๔.๑๕

f(GHz)	λ(cm)	A(mm)	ξ(cm)	ρ	$\kappa = \epsilon/\epsilon_0$
๔.๐๔๐๕	๔.๘๕๘	๒.๘๐๐	-๑.๒๔๖	๐.๖๕๗๖๓๕	๑๐.๓๔
๔.๒๐๐๐	๔.๖๖๓	๒.๗๔๓	-๑.๒๐๗	๐.๖๕๔๓๕๖	๔.๗๑
๔.๔๐๐๐	๔.๔๘๗	๒.๗๔๖	-๑.๑๕๒	๐.๖๕๕๖๗๑	๑๐.๔๐
๔.๖๐๐๐	๔.๒๔๗	๒.๗๖๓	-๑.๑๑๒	๐.๖๔๗๗๒๓	๑๐.๐๘
๔.๘๐๔๔	๔.๑๔๕	๒.๗๔๑	-๑.๐๕๗	๐.๖๔๐๔๔๐	๑๑.๒๐

ตารางที่ ๔.๑๕ ค่าคงที่ไดอิเลคตริกของเอทธิลีน ไกลคอล ที่ความถี่ต่างๆกัน

จากตารางที่ ๔.๑๕ เราจะได้ค่าคงที่ไดอิเลคตริกของเอทธิลีน ไกลคอล โดยเฉลี่ยออกมาเป็น ๑๐.๔๕ ± ๐.๕๔