

### บทที่ 3

#### การทดลองวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารโดยวิธีไร้สัมผัสที่ความถี่ไมโครเวฟ

บทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและการสร้างตัวสั้นพ้องไมโครเวฟทรงกระบอก รวมถึงการจัดชุดทดลองด้วยอุปกรณ์ผ่านไมโครเวฟ เพื่อคำนวณค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารตัวอย่างต่างๆ จากการวัดค่า  $Q$  ของตัวสั้นพ้องในสารตัวอย่างนั้นๆ สารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองนี้ได้แก่ แผ่นทองเหลืองแบน แผ่นแก้วกราฟต์แบน แผ่นกราฟต์บริสุทธิ์ 99.9 % และแผ่นกราฟต์บริสุทธิ์ 95 % นอกจากนี้ในบทนี้ยังจะกล่าวถึงปัญหาและอุปสรรคที่เกิดขึ้นในขั้นตอนต่างๆ รวมทั้งการแก้ไขปัญหาและอุปสรรคนั้นด้วย

#### การออกแบบสร้างตัวสั้นพ้องทรงกระบอก

สิ่งที่สำคัญที่สุดของการทดลองเพื่อวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารโดยวิธีไร้สัมผัสที่ความถี่ไมโครเวฟ คือ ตัวสั้นพ้องไมโครเวฟทรงกระบอก ซึ่งในบทที่ผ่านมาได้กล่าวถึงรายละเอียดของทฤษฎีแล้ว ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดในส่วนของการออกแบบเพื่อสร้างตัวสั้นพ้องไมโครเวฟทรงกระบอก ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การออกแบบสร้างตัวสั้นพ้องทรงกระบอก จำเป็นจะต้องพิจารณาจากเงื่อนไขต่างๆ ดังต่อไปนี้

#### ก. ช่วงความถี่ที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองนี้ใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณไมโครเวฟในช่วงความถี่เอกซ์ (X-Band) ซึ่งมีช่วงความถี่อยู่ระหว่าง 8 ถึง 10 จิกะเฮิรตซ์ โดยใช้หลอดโคลสตรอน (Klystron Tube) เป็นอุปกรณ์ผลิตคลื่นไมโครเวฟที่มีเสถียรภาพทางความถี่สูงและสามารถปรับความถี่ได้ง่าย ทั้งการปรับเชิงกล (Mechanical Tuning) และการปรับเชิงไฟฟ้า (Electrical Tuning) ซึ่งการสร้างตัวสั้นพ้องทรงกระบอกจำเป็นต้องสร้างตัวสั้นพ้องให้มีความถี่สั้นพ้องอยู่ในช่วงความถี่ที่ใช้ทดลองด้วย โดยพิจารณาได้จากสมการ (2.20)

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \left[ \left( \frac{3.83}{a} \right)^2 + \left( \frac{\pi}{L} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{-----(2.20)}$$

จากสมการ (2.20) พบว่า เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวสั้นพ้อง  $D = 2a$  และ ความยาวของตัวสั้นพ้อง  $L$  เป็นตัวกำหนดค่าความถี่สั้นพ้อง โดยที่ถ้าความถี่สั้นพ้องต่ำจะได้ว่าขนาดของตัวสั้นพ้องจะใหญ่

ด้วยข้อจำกัดของเครื่องกำเนิด และอุปกรณ์ผ่านไมโครเวฟที่มีในห้องปฏิบัติการ ทำให้ต้องออกแบบตัวสั้นพ้องทรงกระบอกให้มีความถี่สั้นพ้องอยู่ในช่วง 8 ถึง 10 GHz ซึ่งจากการตรวจสอบพบว่า สัญญาณไมโครเวฟที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดมีเสถียรภาพทางความถี่ดี ในช่วงกลางของช่วงความถี่เอกซ์หรือประมาณ 9 GHz

เมื่อพิจารณาถึงขนาดของสารตัวอย่างที่ต้องเป็นแผ่นแบนเรียบพบว่า สารตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยมีขนาดไม่ใหญ่มากนัก และขนาดของแผ่นสารตัวอย่างที่จะนำมาปิดที่ฝาของตัวสั้นพ้องนี้ต้องสัมพันธ์กับเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวสั้นพ้อง  $D$  ซึ่งพื้นที่ของแผ่นสารตัวอย่างที่ว่านี้มีขนาดประมาณ 5 ถึง 10 ตารางเซนติเมตร ดังนั้นจึงควรเลือกเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวสั้นพ้องให้พอเหมาะเพื่อให้ได้ความถี่สั้นพ้องจากสมการ (2.20) ตามต้องการ ในการทดลองนี้ใช้ค่า  $L$  ประมาณ 4 ถึง 5 เซนติเมตร

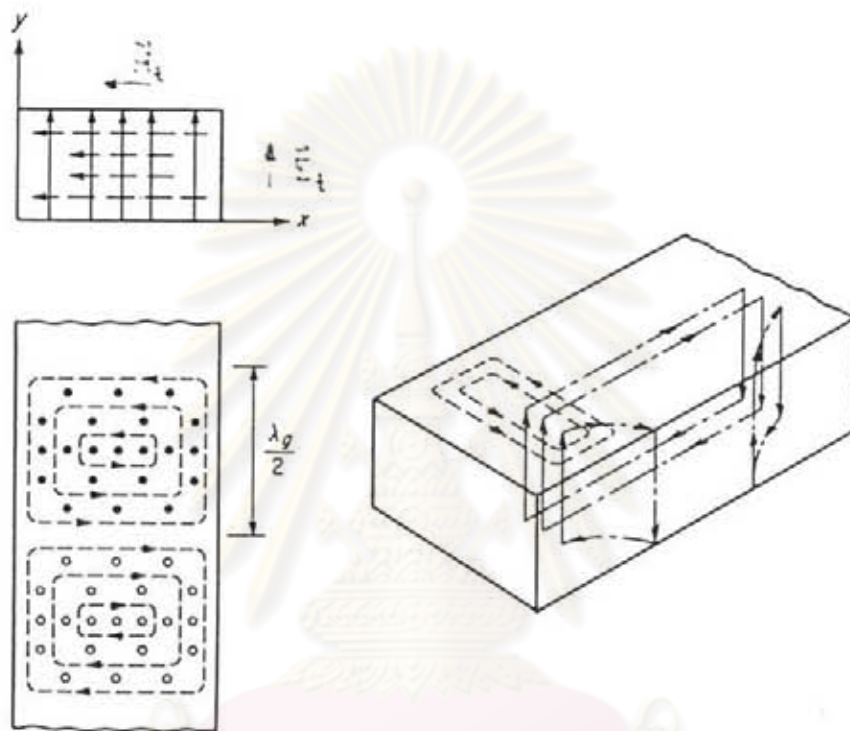
#### ข. วัสดุ และ เครื่องมือ ในการสร้าง

วัสดุที่เหมาะสมที่ใช้ในการสร้างเป็นตัวสั้นพ้องทรงกระบอกนั้น ควรเป็นโลหะที่นำไฟฟ้าได้ดี มีราคาถูก และง่ายต่อการขึ้นรูปโดยสามารถขัดแต่งด้วยเครื่องมือที่ใช้ตามโรงงานทั่วๆ ไปได้ อีกทั้งโลหะที่ใช้ต้องไม่เป็นสนิมง่ายและไม่มีสมบัติทางแม่เหล็ก ซึ่งโลหะที่มีสมบัติดังกล่าวข้างต้นที่นำมาใช้ในการทดลองนี้ คือ ทองเหลือง เพราะทองเหลืองมีสมบัติการนำไฟฟ้าได้ดี ไม่มีสมบัติทางแม่เหล็ก ง่ายต่อการทำตัวสั้นพ้องทรงกระบอก และที่สำคัญคือหาซื้อได้ง่ายและราคาถูก

#### ค. การเจาะช่องคู่ควบ (Coupling Hole)

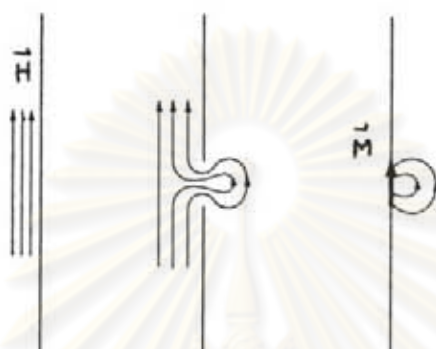
ในการสร้างตัวสั้นพ้องทรงกระบอกจำเป็นต้องสร้างช่องคู่ควบ เพื่อทำหน้าที่คู่ควบสัญญาณไมโครเวฟจากภายนอก โดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กและ

สนามไฟฟ้าในไมโครเวฟเพื่อทำให้เกิดเป็นไดโพลแม่เหล็กขึ้นในช่องคู่ควบ ซึ่งอยู่ที่รอยต่อระหว่างท่อนำคลื่นกับตัวสั้นพ้อง ไดโพลแม่เหล็กนี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดการสั้นพ้องภายในตัวสั้นพ้อง สนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในท่อนำคลื่นที่มีการนำสัญญาณแบบ  $TE_{10}$  มีทิศทางของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าดังแสดงได้ในรูป 3.1



รูป 3.1 แสดงทิศทางของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของการนำสัญญาณแบบ  $TE_{10}$  ภายในท่อนำคลื่น

เมื่อพิจารณาทิศทางของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในท่อนำคลื่นมุมฉาก (Rectangular Waveguide) ที่มีการนำสัญญาณแบบ  $TE_{10}$  พบว่ามีสนามไฟฟ้า  $E_t$  และสนามแม่เหล็ก  $H_t$  ซึ่งตั้งฉากกับแนวแกนของท่อนำคลื่นและสนามแม่เหล็ก  $H_z$  ซึ่งอยู่ในแนวแกน พบว่าสนามแม่เหล็ก  $H_t$  จะเหนี่ยวนำไดโพลแม่เหล็กดังในรูป 3.2 ซึ่งจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามภายในตัวสั้นพ้อง



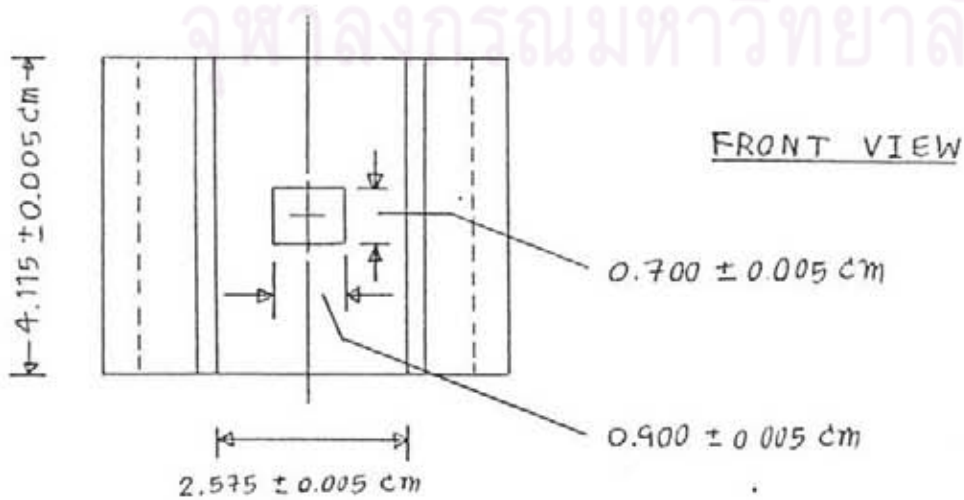
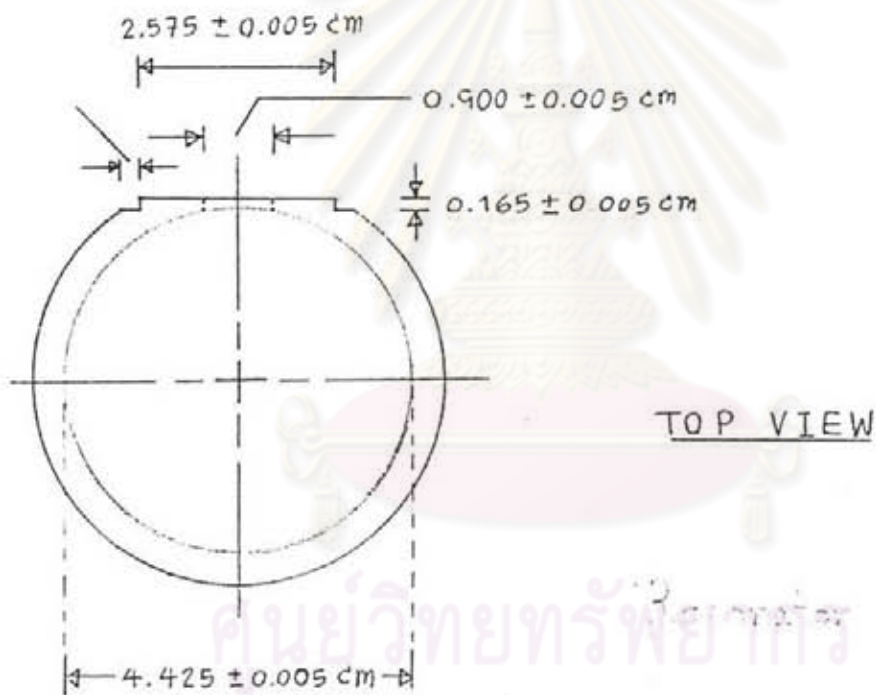
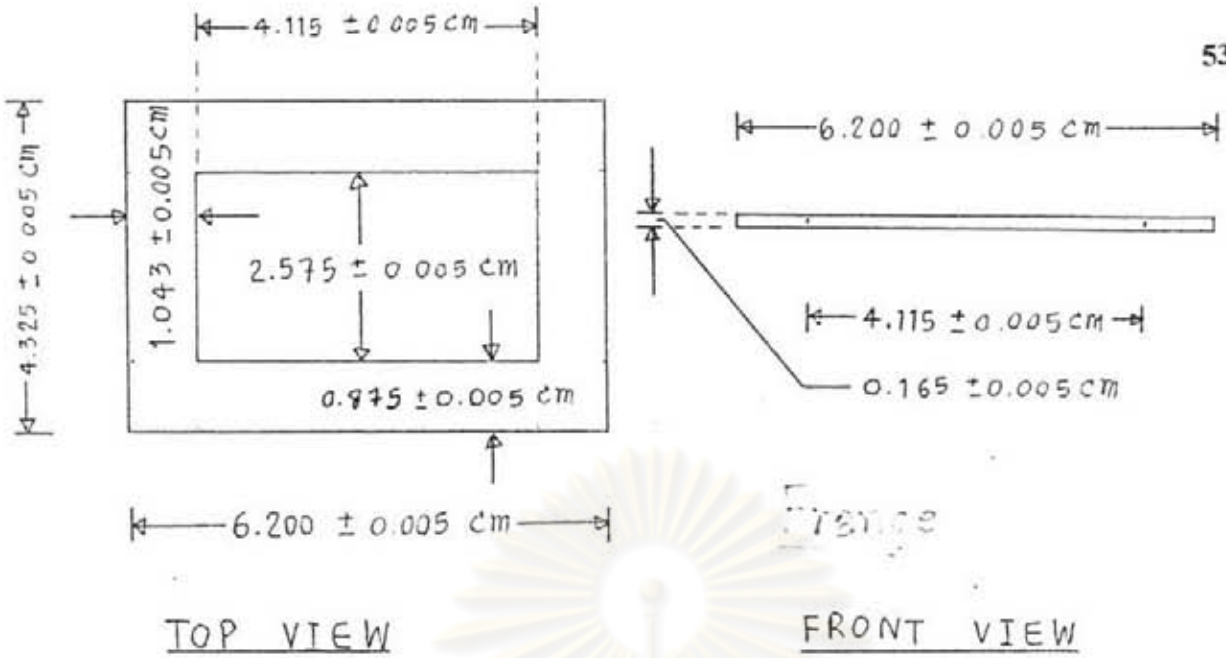
รูป 3.2 แสดงไดโพลแม่เหล็กที่บริเวณช่องคู่ควม

ในทางปฏิบัติพบว่า ขนาดของช่องคู่ควมนี้มีขนาดไม่แน่นอนต้องทำการทดลองหาค่าขนาดของช่องคู่ควมที่เหมาะสม

จากการทดลองพบว่าช่องคู่ควมที่คู่ควมสัญญาณได้พอเหมาะเป็นช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าและมีขนาด  $0.7 \times 0.9$  เซนติเมตร

ปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องทำให้สามารถคำนวณขนาดคร่าวๆ ของตัวสั้นพ้องทรงกระบอกว่าควรมีค่า  $L = 4.090 \pm 0.005$  เซนติเมตร และ  $D = 4.425 \pm 0.005$  เซนติเมตร ซึ่งขนาดที่ว่านี้ทำให้ตัวสั้นพ้องมีความถี่สั้นพ้องประมาณ 9 GHz

จากที่กล่าวมาข้างต้นทำให้สามารถเขียนแบบของตัวสั้นพ้องทรงกระบอกได้  
 ดังรูป 3.3

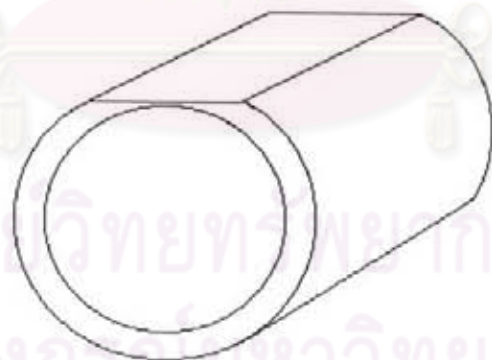


รูป 3.3 แสดงแบบของตัวสั้นห้องทรงระบอ

### การสร้างตัวสันห้องทรงกระบอก

ขั้นตอนในการสร้างตัวสันห้องทรงกระบอก เริ่มจากการนำท่อทองเหลืองหล่อสำเร็จรูปทรงกระบอกกลวงที่หาซื้อได้ตามท้องตลาดทั่วไป มาตัดเป็นวงแหวนทรงกระบอกที่มีความยาวใกล้เคียงกับความยาวของตัวสันห้อง แต่เนื่องจากท่อทองเหลืองที่ซื้อมาเป็นท่อที่เกิดจากกระบวนการหล่อโลหะซึ่งผิวของท่อทองเหลืองจะไม่เรียบ ดังนั้นจึงต้องนำท่อทองเหลืองที่ตัดแล้วมาสังคายเครื่องกลึงให้เป็นวงแหวนทรงกระบอกที่มีผิวในและผิวนอกเรียบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งผิวในต้องทำให้เรียบที่สุด และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของวงแหวนทรงกระบอกที่กลึงได้จะต้องมีขนาดใกล้เคียงกับเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวสันห้องที่ได้ออกแบบไว้

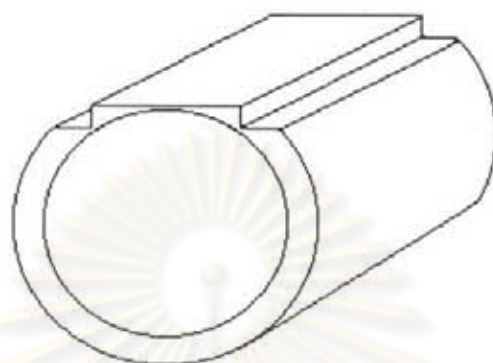
ขั้นตอนถัดไปเป็นการกัดผิวนอกด้านหนึ่งของวงแหวนทรงกระบอก โดยใช้เครื่องกัดโลหะให้เป็นผิวเรียบดังรูป 3.4



รูป 3.4 แสดงผิวเรียบซึ่งเกิดจากการกัดด้วยเครื่องกัดโลหะ

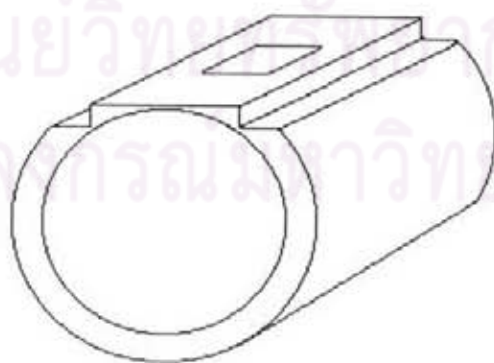
ในการกัดผิวนอกของวงแหวนทรงกระบอกให้เป็นระนาบแบนด้วยเครื่องกัดโลหะจะต้องกัดให้ลึกเกือบถึงผิวด้านในของตัวสันห้อง จากนั้นจะใช้เครื่องกัดโลหะค่อยๆ สร้างเป็น

บารองคังรูป 3.5 เพื่อใช้ในการรองรับฝาประกบ (Flange) ที่จะใช้เป็นฝาสำหรับต่อกับท่อนำ  
คลื่น



รูป 3.5 แสดงการกัดท่อทองเหลืองให้เป็นบ่าเพื่อรองรับฝาประกบ

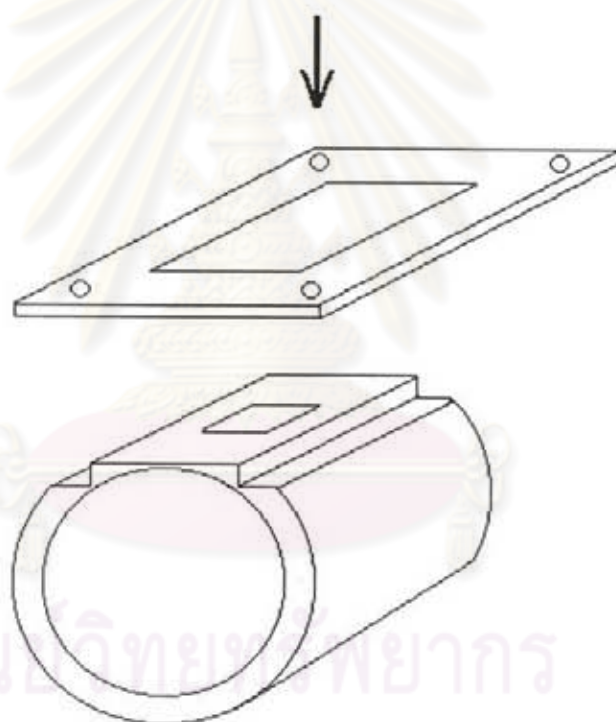
ต่อไปจะเจาะช่องคู่ควบโดยใช้เครื่องเจาะโลหะเจาะให้เป็นรูกลม จากนั้นจึงค่อยๆ แต่ง  
ให้เป็นช่องสี่เหลี่ยม คังรูป 3.6



รูป 3.6 แสดงการเจาะช่องคู่ควบ (Coupling Hole) รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

จากนั้นขัดผิวด้านในด้วยกระดาษทรายเบอร์ละเอียดพิเศษที่ใช้สำหรับขัดแก้ว ในการขัดต้องใช้เครื่องกลึงช่วยในการตั้งศูนย์การขัด โดยจะหุ้มกระดาษทรายบนปากกาจับ แล้วค่อยๆ ขัดผิวด้านในโดยการเดินรอบเครื่องกลึงรอบช้าๆ ซึ่งในการขัดแบบนี้จะยังมีรอยขีด เนื่องจากกระดาษทรายติดอยู่ แต่รอยขีดนี้สามารถลบได้ด้วยการแช่ท่อทองเหลืองลงในกรดซัลฟูริกเจือจางทำให้ได้ผิวด้านในที่มันเรียบและเป็นทรงกระบอกที่ตีสมำเสมอกัน

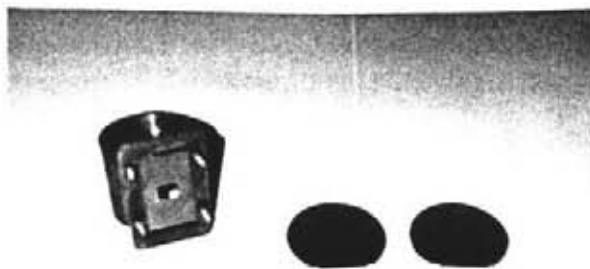
ขั้นตอนนำฝาประกบที่ทำจากแผ่นทองเหลืองแบนตัดเป็นแหวนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามา เชื่อมต่อกับท่อทองเหลืองที่ได้จะ ได้เป็นตัวสันห้องทรงกระบอกดังรูป 3.7



รูป 3.7 แสดงแนวทางการติดฝาประกบกับตัวสันห้องทรงกระบอก

ซึ่งตัวสันห้องที่สร้างเสร็จด้วยวิธีที่กล่าวข้างต้นมีลักษณะดังรูป 3.8



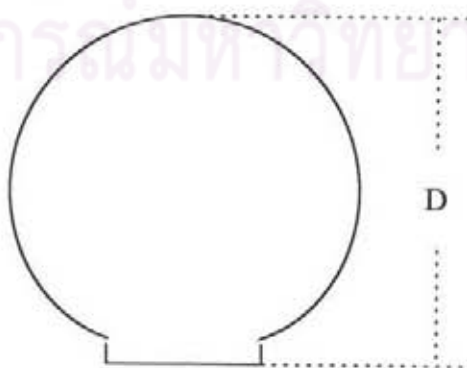


รูป 3.8 แสดงภาพถ่ายของตัวสั้นห้องทรงกระบอกที่สร้างเสร็จแล้ว

### การทดลองวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของแผ่นทองเหลืองจากค่า $Q$ ของตัวสั้นห้อง

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงการทดลองวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของแผ่นทองเหลือง โดยการวัดค่า  $Q$  ของตัวสั้นห้องทรงกระบอกที่ปิดด้วยแผ่นทองเหลืองแบน ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดเกี่ยวกับการเตรียมสารตัวอย่าง การเตรียมการทดลอง ขั้นตอนในการทดลอง และการคำนวณค่า  $Q$  รวมถึงการคำนวณค่าสภาพนำไฟฟ้าของแผ่นทองเหลืองจากค่า  $Q$  ที่วัดได้ ดังมีรายละเอียดตามลำดับดังนี้

1. การเตรียมสารตัวอย่าง ในการทดลองนี้จะใช้สารตัวอย่างเป็นแผ่นทองเหลืองแผ่นเรียบบาง มีสมบัติพิเศษ คือ เป็นแผ่นทองเหลืองหล่อรีดเป็นแผ่นแบนด้วยอุณหภูมิสูงจนทำให้เนื้อทองเหลืองละเอียดไม่มีฟองอากาศ นำแผ่นทองเหลืองดังกล่าวมาตัดโดยการฉลุด้วยเลื่อยฉลุให้เป็นแผ่นกลม 2 แผ่นดังรูป



รูป 3.9 แสดงรูปร่างของการฉลุแผ่นทองเหลือง

จากนั้นนำแผ่นทองเหลืองทั้งสองมาขัดผิวด้วยกระดาษทรายไล่เบอร์ตั้งแต่กระดาษทรายเบอร์หยาบที่สุดจนถึงเบอร์ละเอียดที่สุดได้แก่เบอร์ 2000 ซึ่งเป็นกระดาษทรายที่ใช้ขัดแก้ว แต่เมื่อขัดแล้วจะยังคงมีขอบของกระดาษทรายบนแผ่นทองเหลืองอยู่

จากนั้นล้างผิวของแผ่นทองเหลืองด้วยกรดซัลฟูริกเจือจาง ซึ่งกรดซัลฟูริกดังกล่าวจะทำให้รอยขีดเนื่องจากกระดาษทรายจางลงไปมาก เสร็จแล้วล้างด้วยน้ำสะอาด เป่าให้แห้ง สุดท้ายทำความสะอาดด้วยเมธานอนอีกครั้งหนึ่ง เมื่อเสร็จแล้วแผ่นทองเหลืองที่ได้ก็พร้อมที่จะทำการทดลอง

ในขั้นตอนนี้ก่อนทำการทดลองจะต้องนำเอาแผ่นทองเหลืองที่ผ่านการเตรียมเรียบร้อยแล้วมาปิดบนตัวสั่นพ้องที่ทำความสะอาดด้วยเมธานอนแล้ว โดยปิดลักษณะดังรูป 3.10

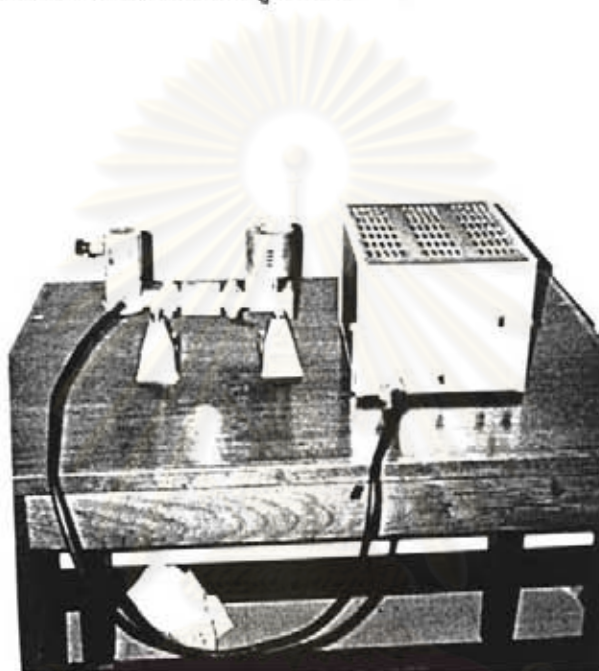


รูป 3.10 แสดงภาพถ่ายการปิดฉนีกแผ่นทองเหลืองกับตัวสั่นพ้อง

โดยจะปิดแผ่นทองเหลืองทั้งสองแผ่นบนตัวสั่นพ้องแล้วใช้เครื่องมือยึดที่ทำขึ้นจากแผ่นพลาสติกหนา เจาะรูร้อยด้วยน๊อต เมื่อยึดแผ่นพลาสติกทับบนแผ่นทองเหลืองด้วยการร้อยน๊อตแล้วขึ้นให้แน่นหนาพอสมควร แผ่นทองเหลืองทั้งสองจะปิดสนิทอยู่กับตัวสั่นพ้องอย่างแน่นหนาตามต้องการเมื่อถึงตอนนี้ก็พร้อมที่จะนำตัวสั่นพ้องไปวัดค่า  $Q$  ได้ต่อไป

2. การเตรียมการทดลอง เริ่มต้นจากการเตรียมอุปกรณ์ผ่านไมโครเวฟที่ต้องใช้ในการทดลองตามแผนผังของการจัดการทดลองที่ได้แสดงไว้ในรูป 2.10 ในบทที่ 2 โดยมีรายการอุปกรณ์ ดังนี้

2.1 เครื่องกำเนิดสัญญาณไมโครเวฟ ซึ่งประกอบด้วยท่อไอกลสตรอน และเครื่องจ่ายพลังงานของท่อไอกลสตรอน ดังรูป 3.11



รูป 3.11 แสดงภาพถ่ายของท่อไอกลสตรอน และเครื่องจ่ายพลังงานของท่อไอกลสตรอน

ท่อไอกลสตรอนเป็นอุปกรณ์ผลิตสัญญาณไมโครเวฟที่มีเสถียรภาพทางความถี่สูง แต่เป็นอุปกรณ์ที่เป็นหลอดสุญญากาศแบบเก่า ดังนั้นเมื่อมีการใช้งานต้องมีการอุ่นเครื่องให้ท่อไอกลสตรอนขยายตัวให้ได้ก่อนซึ่งเสียเวลาพอสมควร นอกจากนี้ท่อไอกลสตรอนสามารถปรับความถี่ของสัญญาณไมโครเวฟ โดยการปรับความยาวของท่อไอกลสตรอนได้เรียกการปรับความถี่แบบนี้ว่า การปรับเชิงกล (Mechanical Tuning)

ส่วนเครื่องจ่ายพลังงานของท่อไอกลสตรอนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับท่อไอกลสตรอน ประกอบด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าและอุปกรณ์ในการปรับความต่างศักย์สะท้อน (Reflecting Voltage) ของท่อไอกลสตรอนซึ่งสามารถใช้ในการปรับความ

ต่างศักย์สะท้อนมาปรับความถี่ของสัญญาณไมโครเวฟได้ ซึ่งการปรับแบบนี้จะปรับความถี่ได้ละเอียดกว่าเรียกการปรับแบบนี้ว่า การปรับเชิงไฟฟ้า (*Electrical Tuning*)

2.2 ไมโครเวฟไอโซเลเตอร์ (Microwave Isolator) ทำหน้าที่ป้องกันสัญญาณไมโครเวฟที่สะท้อนกลับเข้าสู่ท่อไคลสตรอนเป็นท่อที่ประกอบด้วยแม่เหล็กสถิตย์ ซึ่งมีสมบัติพิเศษในการยอมให้สัญญาณผ่านได้ทางเดียวมีรูปร่างดังรูป 3.12



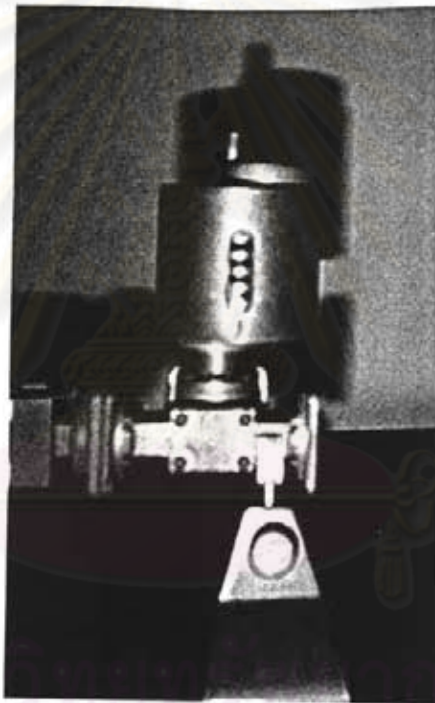
รูป 3.12 แสดงภาพถ่ายของไมโครเวฟไอโซเลเตอร์

2.3 แมจิก ที เป็นอุปกรณ์ 4 พอร์ตทำหน้าที่ในการแมทซ์สัญญาณไมโครเวฟ ดังรายละเอียดในบทก่อนหน้านี้ ลักษณะเป็นดังรูป 3.13



รูป 3.13 แสดงภาพถ่ายของแมจิก ที

2.4 เวฟมิเตอร์ เป็นอุปกรณ์วัดความถี่ไมโครเวฟโดยใช้หลักการของตัวสั่นพ้อง ในการวัดความถี่ ซึ่งเวฟมิเตอร์จะเป็นตัวสั่นพ้องที่ปรับขนาดความยาวได้ จากบทที่แล้วสรุปได้ว่า ความยาวของตัวสั่นพ้องมีผลกับความถี่ของตัวสั่นพ้อง ดังนั้นในการใช้งานจะต้องปรับความยาวของตัวสั่นพ้องจนกว่าความยาวนั้นจะให้ความถี่สั่นพ้องตรงกับความถี่ของสัญญาณที่จะวัด เมื่อความถี่นั้นตรงกับเวฟมิเตอร์จะดูพลังงานส่วนหนึ่งของสัญญาณไมโครเวฟเอาไว้ ซึ่งความเข้มของพลังงานของไมโครเวฟจะลดลง โดยสังเกตได้จากการลดลงของความต่างศักย์ของสัญญาณที่วัดได้จากหัววัดสัญญาณแสดงผลที่ออสซิลโลสโคป เวฟมิเตอร์มีลักษณะดังรูป 3.14



รูป 3.14 แสดงเวฟมิเตอร์

ความละเอียดของเวฟมิเตอร์จะอ่านได้ในหน่วยเมกะเฮิรตซ์ โดยอ่านได้ในหลักพัน หลักร้อย หลักสิบและหลักหน่วยของเมกะเฮิรตซ์ แสดงเป็นสเกลไว้ทำให้สามารถอ่านได้อย่างแม่นยำถึง 1 ใน 10 ของเมกะเฮิรตซ์

2.5 ตัวลดไมโครเวฟ (Microwave Attenuator) ทำหน้าที่ลดความเข้มสัญญาณไมโครเวฟ โดยอ่านค่าเป็นค่า dB ของอัตราส่วนของความเข้มสัญญาณก่อนลดและหลังจากผ่านการลดสัญญาณแล้ว มีลักษณะดังรูป 3.15



รูป 3.15 แสดงภาพถ่ายของตัวลัดไมโครเวฟ

2.6 ปลันเจอร์ (Plunger) ทำหน้าที่ในการสะท้อนสัญญาณไมโครเวฟ โดยเป็นท่อนำคลื่นที่ปรับความสั้นยาวได้โดยอาศัยหลักการของไมโครมิเตอร์ ใช้งานร่วมกับตัวลัดสัญญาณไมโครเวฟในการแมทซ์สัญญาณกับตัวส่งห้องไมโครเวฟ มีลักษณะดังรูป 3.16



รูป 3.16 แสดงภาพถ่ายของปลันเจอร์

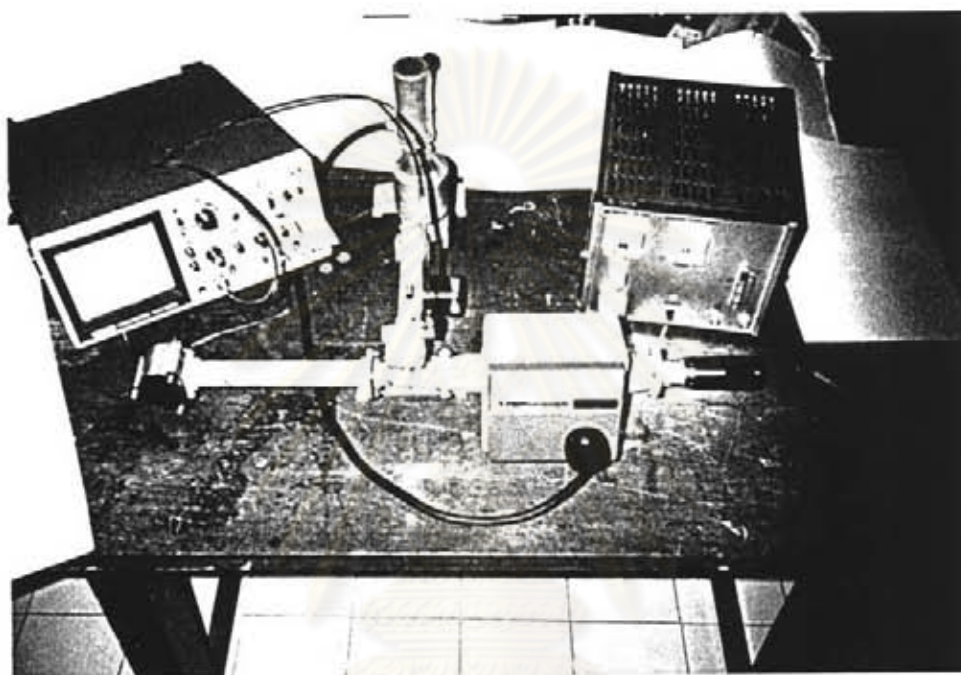
2.7 หัววัดสัญญาณไมโครเวฟ เป็นอุปกรณ์โซลิตสแตตที่ใช้วัดความเข้มของสัญญาณไมโครเวฟ ใช้หลักการของไดโอดวัดความต่างศักย์ของสัญญาณไมโครเวฟ ในการใช้งานจะใช้หัววัดสัญญาณไมโครเวฟนี้ร่วมกับออสซิลโลสโคป ดังรูป 3.17



รูป 3.17 แสดงรูปถ่ายของหัววัดสัญญาณไมโครเวฟ และออสซิลโลสโคป

นอกจากอุปกรณ์ผ่านไมโครเวฟและเครื่องกำเนิดสัญญาณไมโครเวฟดังที่ได้เสนอไว้แล้วนั้น ในการทดลองจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ควบคุมสัญญาณไฟฟ้า หรือ UPS ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการจ่ายพลังงานไฟฟ้าและตัดสัญญาณรบกวนที่มาจากสัญญาณไฟฟ้า

จากอุปกรณ์ดังกล่าวทั้งหมดเมื่อนำมาประกอบขึ้นโดยอาศัยแผนผังจากรูป 2.10 จะประกอบเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ได้ในลักษณะดังรูป 3.18 ซึ่งเครื่องมือที่ประกอบเรียบร้อยแล้วจะพร้อมสำหรับทำการทดลองวัดค่า  $Q$  ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นทองเหลือง ดังรายละเอียดในบทต่อไป



รูป 3.18 แสดงการประกอบเครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อทำการทดลอง

3. การทดลองวัดค่า  $Q$  ของตัวสั้นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นทองเหลือง มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

3.1 จัดการทดลองตามข้อ 2 เมื่อจัดการทดลองเรียบร้อยแล้ว เปิดสวิตซ์ให้เครื่องควบคุมสัญญาณไฟฟ้า UPS ทำงานรอสักครู่ เมื่อเครื่องทำงานดีแล้วให้เปิดสวิตซ์เครื่องจ่ายพลังงานของท่อไคลสตรอน เปิดเครื่องออสซิลโลสโคป ทำการทดสอบว่ามีสัญญาณออกหรือไม่

3.2 ทิ้งเครื่องให้จ่ายพลังงานของท่อไคลสตรอน ทำงานสักครู่จากนั้นเปิดสวิตซ์ให้เครื่องจ่ายพลังงานให้กับท่อไคลสตรอน เมื่อทดสอบสัญญาณแล้วจะสามารถอ่านค่าความ



ต่างศักย์ของสัญญาณได้ที่จอของออสซิลโลสโคป แต่ถ้าไม่พบสัญญาณอาจหมุนพลาตเจอร์ ไปเล็กน้อยก็จะพบสัญญาณออกมา จากนั้นทิ้งไว้ให้ระบบทำงานสักครึ่งชั่วโมงเป็นการอุ่นเครื่องและรอให้ท่อโคลสตรอนขยายตัวได้เต็มที่

3.3 ปรับความถี่ให้ใกล้เคียงกับความถี่สั่นพ้องโดยการปรับเชิงกล จากนั้นทิ้งไว้ นานประมาณ 15 นาที ระบบก็พร้อมที่จะทำการทดลองได้

3.4 ปรับความถี่ให้เปลี่ยนไปเล็กน้อยโดยการปรับเชิงไฟฟ้า จากนั้นทำการวัด ความถี่ บันทึกความถี่นั้นหลายๆ ครั้ง จากนั้นจึงเริ่มทำการแมทซ์ตัวสั่นพ้องโดยการปรับ พลาตเจอร์ และตัวลไมโครเวฟ ถ้าสัญญาณแมทซ์กันภาพบนจอออสซิลโลสโคปจะอ่าน สัญญาณศูนย์หรือไม่มีความต่างศักย์ จากนั้นบันทึกค่า dB ที่อ่านได้จากตัวล

3.5 ปรับความถี่โดยการปรับเชิงไฟฟ้า แล้วทำตามข้อ 3.4 บันทึกผลระหว่าง ความถี่กับค่า dB ( $f, dB$ ) โดยทำทั้งหมด 9 ชุด

3.6 เมื่อได้ข้อมูลครบแล้ว ปิดเครื่องจ่ายพลังงานของโคลสตรอนปิด ออสซิลโลสโคป และปิด UPS

3.7 นำข้อมูล ( $f, dB$ ) ที่ได้ไปคำนวณหาค่า  $Q$  โดยอาศัยโปรแกรม TUNE9DX.CPP ซึ่งแสดงรายละเอียดในภาคผนวก

3.8 จากค่า  $Q$  ที่ได้นำไปคำนวณหาค่าสภาพนำไฟฟ้าของทองเหลืองจาก โปรแกรม ZIGMA\_S.CPP ซึ่งแสดงรายละเอียดในภาคผนวก

4. ผลการทดลองวัดค่า  $Q$  ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นทองเหลืองมีดังนี้

ศูนย์วิทยุทั่วไป  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดลองที่ 1 การทดลองวัดค่า Q ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นทองเหลือง

สารตัวอย่าง แผ่นทองเหลืองบางชนิดมัน

วัน - เวลาที่ทำการทดลอง 12 พฤศจิกายน 2539

เวลา 23.00 น.

ผลการทดลอง

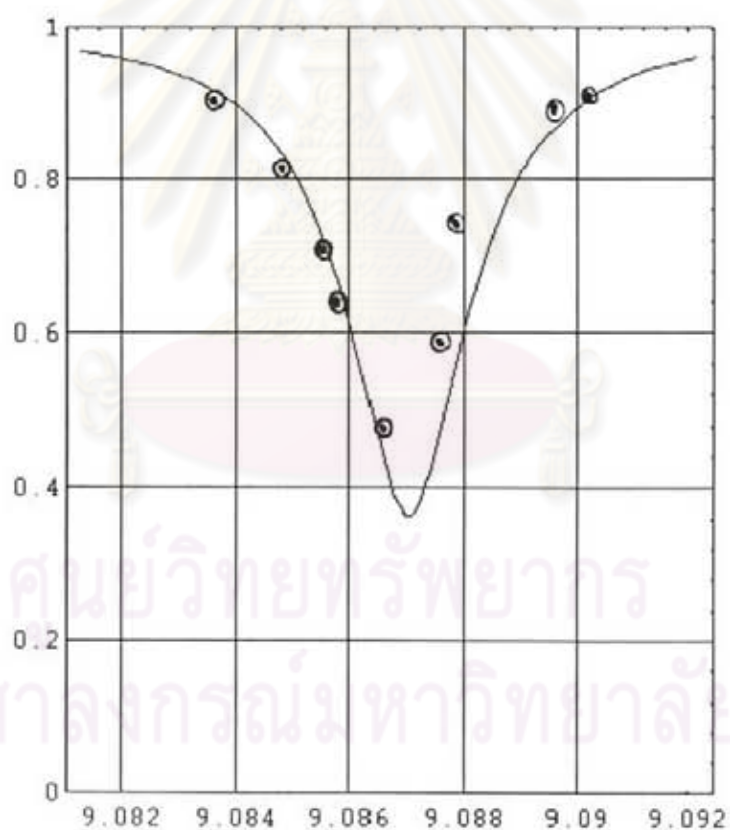
ตารางที่ 3.1 แสดงผลการวัดชุดข้อมูล ( $f$ , dB) ชุดที่ 1 เพื่อคำนวณค่า Q ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นทองเหลือง

$f$ (GHz)	dB	$\omega$ ( $s^{-1}$ )	$\rho$	$\rho$ (least)
9.08364	0.37	57.0742	0.9183	0.9140
9.08471	0.98	57.0809	0.8147	0.8429
9.08530	1.50	57.0846	0.7079	0.7669
9.08555	2.04	57.0862	0.6252	0.7213
9.08654	3.23	57.0924	0.4753	0.4491
9.08740	2.26	57.0978	0.5943	0.4215
9.08779	1.35	57.1002	0.7328	0.5391
9.08955	0.45	57.1133	0.9016	0.8629
9.09080	0.41	57.1154	0.9099	0.9292

ตารางที่ 3.2 แสดงผลการคำนวณค่า  $Q$  จากชุดข้อมูลชุดที่ 1 โดยโปรแกรม TUNE9DX.CPP

$f_0$ (GHz)	$Q$	$\xi$
9.08702	8747.8	4070.7

รูป 3.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า  $\rho$  และ  $\rho(\text{least})$



หมายเหตุ    ⊙    แสดงค่า  $\rho$

—    แสดงค่า  $\rho(\text{least})$

การทดลองที่ 2 การทดลองวัดค่า Q ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นทองเหลือง

สารตัวอย่าง แผ่นทองเหลืองบางชนิดมัน

วัน - เวลาที่ทำการทดลอง 13 พฤศจิกายน 2539

เวลา 21.00 น.

ผลการทดลอง

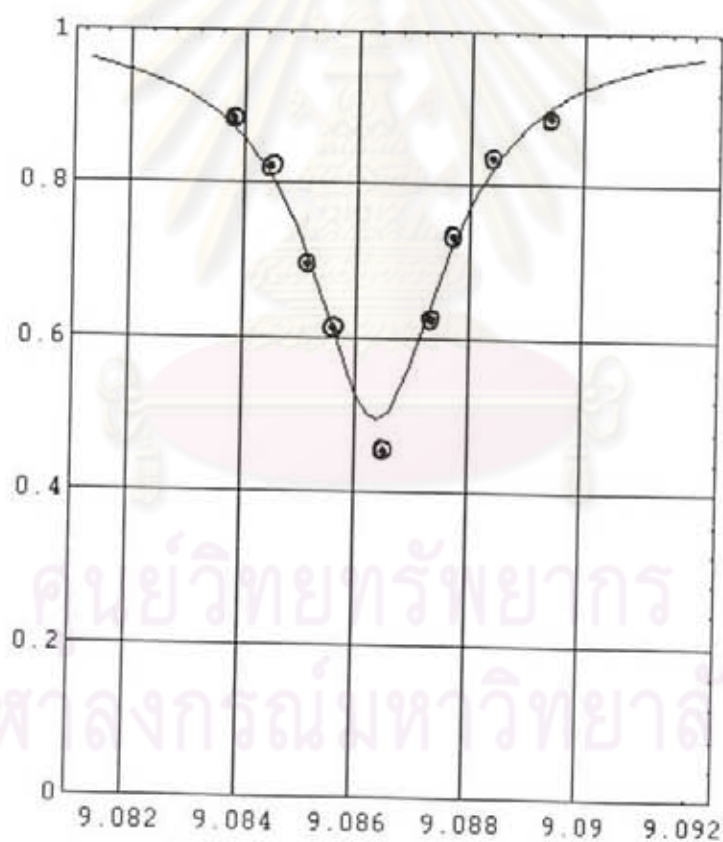
ตารางที่ 3.3 แสดงผลการวัดชุดข้อมูล ( $f$ , dB) ชุดที่ 2 เพื่อคำนวณค่า Q ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นทองเหลือง

$f$ (GHz)	dB	$\omega$ ( $s^{-1}$ )	$\rho$	$\rho$ (least)
9.08372	0.55	57.0747	0.8810	0.8799
9.08447	0.81	57.0794	0.8299	0.8117
9.08508	1.56	57.0832	0.6982	0.7197
9.08563	2.16	57.0877	0.6081	0.6054
9.08650	3.42	57.0922	0.4550	0.4988
9.08737	2.08	57.0976	0.6194	0.6526
9.08778	1.34	57.1002	0.7345	0.7334
9.08832	0.79	57.1036	0.8337	0.8125
9.08932	0.52	57.1099	0.8871	0.8956

ตารางที่ 3.4 แสดงผลการคำนวณค่า  $Q$  จากชุดข้อมูลชุดที่ 2 โดยโปรแกรม TUNE9DX.CPP

$f_0$ (GHz)	$Q$	$\xi$
9.08639	10321.2	3478.3

รูป 3.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า  $p$  และ  $p(\text{least})$



หมายเหตุ    ⊙    แสดงค่า  $p$

—    แสดงค่า  $p(\text{least})$

การทดลองที่ 3 การทดลองวัดค่า  $Q$  ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นทองเหลือง  
 สารตัวอย่าง แผ่นทองเหลืองบางชนิดมัน

วัน - เวลาที่ทำการทดลอง 13 พฤศจิกายน 2539 เวลา 24.00 น.

ผลการทดลอง

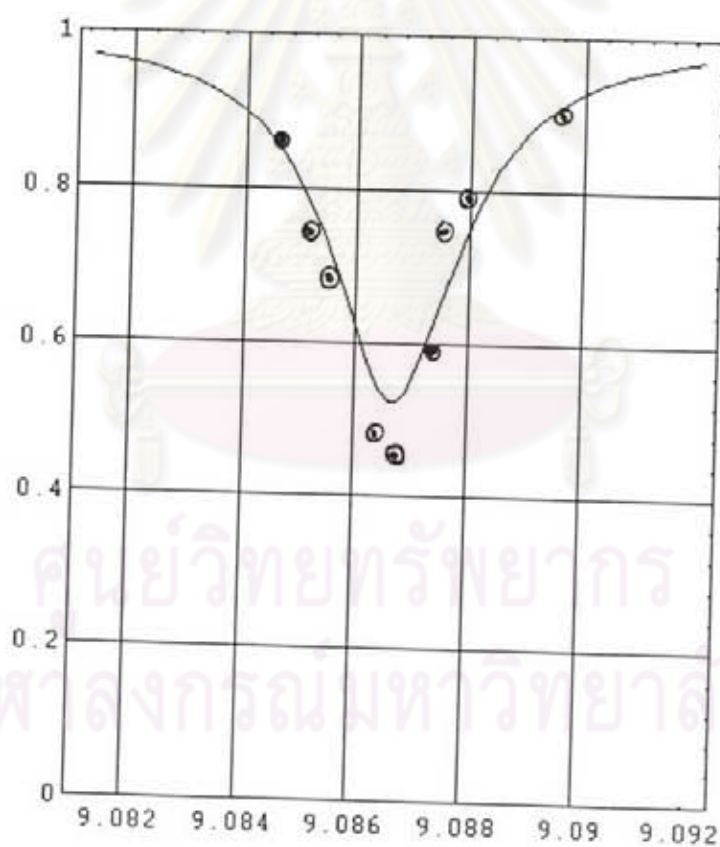
ตารางที่ 3.5 แสดงผลการวัดหาค่าข้อมูล ( $f$ , dB) ชุดที่ 3 เพื่อคำนวณค่า  $Q$  ของตัว  
 สั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นทองเหลือง

$f$ (GHz)	dB	$\omega$ ( $s^{-1}$ )	$\rho$	$\rho$ (least)
9.08455	0.61	57.0799	0.8690	0.8587
9.08517	1.32	57.0838	0.7379	0.7845
9.08548	1.56	57.0857	0.6982	0.7315
9.08626	3.14	57.0907	0.4853	0.5667
9.08673	3.44	57.0936	0.4529	0.5238
9.08726	2.28	57.0969	0.5915	0.5971
9.08753	1.22	57.0986	0.7551	0.6569
9.08799	1.00	57.1015	0.7943	0.7502
9.08953	0.45	57.1112	0.9016	0.9080

ตารางที่ 3.6 แสดงผลการคำนวณค่า  $Q$  จากชุดข้อมูลชุดที่ 3 โดยโปรแกรม TUNE9DX.CPP

$f_0$ (GHz)	$Q$	$\xi$
9.08668	11867.8	3714.2

รูป 3.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า  $\rho$  และ  $\rho(\text{least})$



หมายเหตุ     $\odot$     แสดงค่า  $\rho$

—    แสดงค่า  $\rho(\text{least})$

การทดลองที่ 4 การทดลองวัดค่า  $Q$  ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นทองเหลือง

สารตัวอย่าง แผ่นทองเหลืองบางขัดมัน

วัน - เวลาที่ทำการทดลอง 14 พฤศจิกายน 2539

เวลา 22.00 น.

ผลการทดลอง

ตารางที่ 3.7 แสดงผลการวัดชุดข้อมูล ( $f$ , dB) ชุดที่ 4 เพื่อคำนวณค่า  $Q$  ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นทองเหลือง

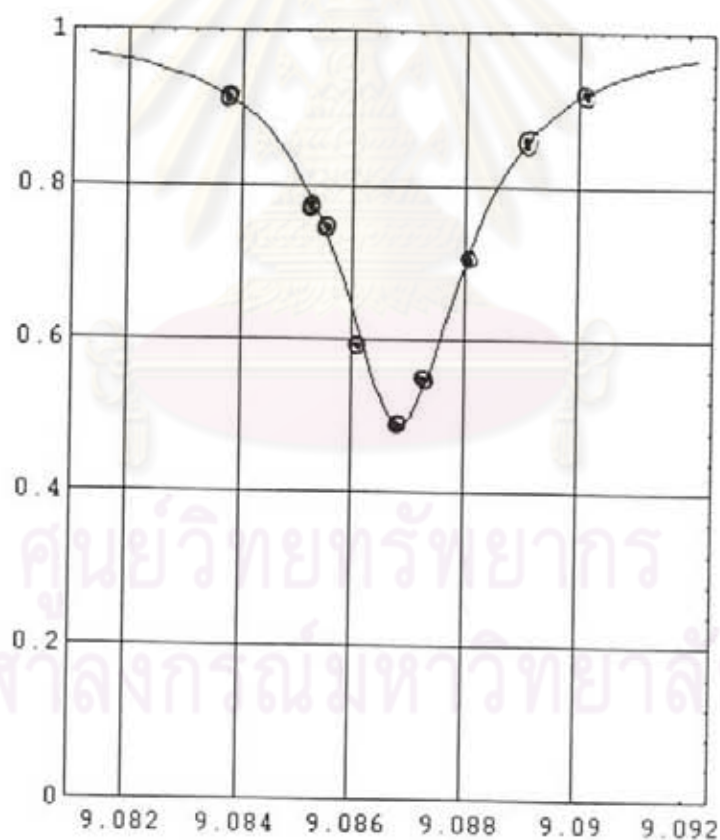
$f$ (GHz)	dB	$\omega$ ( $s^{-1}$ )	$\rho$	$\rho$ (least)
9.08371	0.38	57.0746	0.9162	0.9167
9.08526	1.08	57.0843	0.7798	0.7836
9.08545	1.22	57.0855	0.7551	0.7526
9.08617	2.26	57.0901	0.5943	0.5967
9.08674	3.14	57.0937	0.4853	0.4943
9.08724	2.66	57.0968	0.5420	0.5291
9.08805	1.60	57.1019	0.6918	0.7112
9.08912	0.61	57.1086	0.8689	0.8610
9.09017	0.35	57.1152	0.9226	0.9233



ตารางที่ 3.8 แสดงผลการคำนวณค่า  $Q$  จากชุดข้อมูลชุดที่ 4 โดยโปรแกรม TUNE9DX.CPP

$f_0$ (GHz)	$Q$	$\xi$
9.08686	10971.1	3753.0

รูป 3.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า  $\rho$  และ  $\rho(\text{least})$



หมายเหตุ     $\odot$     แสดงค่า  $\rho$

—    แสดงค่า  $\rho$  (least)

การทดลองที่ 5 การทดลองวัดค่า Q ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นทองเหลือง

สารตัวอย่าง แผ่นทองเหลืองบางชนิดมัน

วัน - เวลาที่ทำการทดลอง 21 พฤศจิกายน 2539

เวลา 18.30 น.

ผลการทดลอง

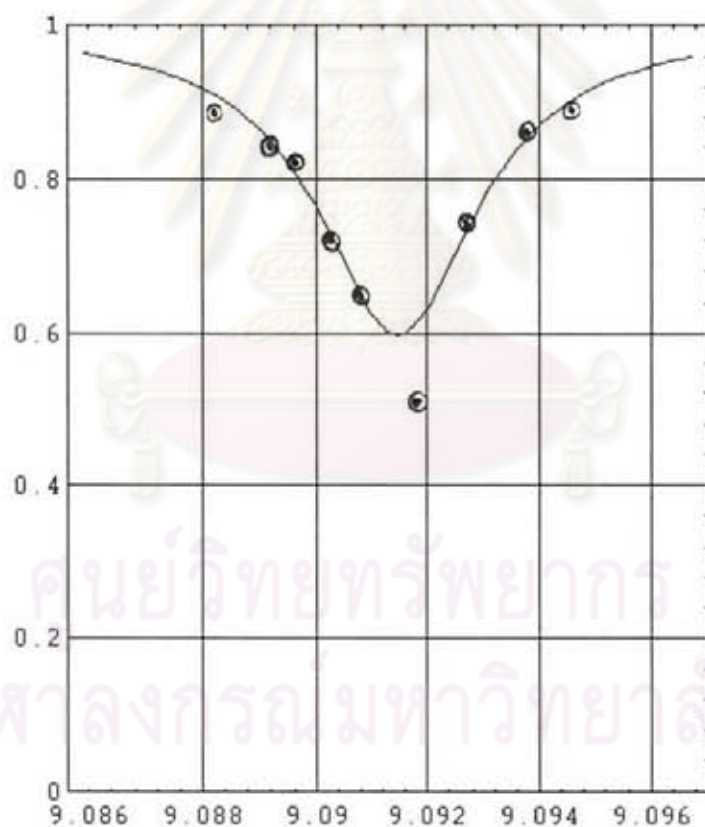
ตารางที่ 3.9 แสดงผลการวัดชุดข้อมูล ( $f$ , dB) ชุดที่ 5 เพื่อคำนวณค่า Q ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นทองเหลือง

$f$ (GHz)	dB	$\omega$ ( $s^{-1}$ )	$\rho$	$\rho$ (least)
9.08828	0.44	57.1034	0.9036	0.9066
9.08924	0.69	57.1094	0.8531	0.8473
9.08960	0.82	57.1116	0.8279	0.8134
9.09024	1.42	57.1156	0.7211	0.7334
9.09080	1.94	57.1191	0.6397	0.6518
9.09189	2.94	57.1260	0.5081	0.6205
9.09266	1.27	57.1308	0.7464	0.7262
9.09377	0.60	57.1378	0.8709	0.8522
9.09453	0.50	57.1426	0.8912	0.9001

ตารางที่ 3.10 แสดงผลการคำนวณค่า  $Q$  จากชุดข้อมูลชุดที่ 1 โดยโปรแกรม TUNE9DX.CPP

$f_0$ (GHz)	$Q$	$\xi$
9.09147	11439.6	2875.1

รูป 3.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า  $p$  และ  $p(\text{least})$



หมายเหตุ     $\odot$     แสดงค่า  $p$

—    แสดงค่า  $p(\text{least})$

การทดลองที่ 6 การทดลองวัดค่า  $Q$  ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นทองเหลือง

สารตัวอย่าง แผ่นทองเหลืองบางขัดมัน

วัน - เวลาที่ทำการทดลอง 21 พฤศจิกายน 2539

เวลา 24.00 น.

ผลการทดลอง

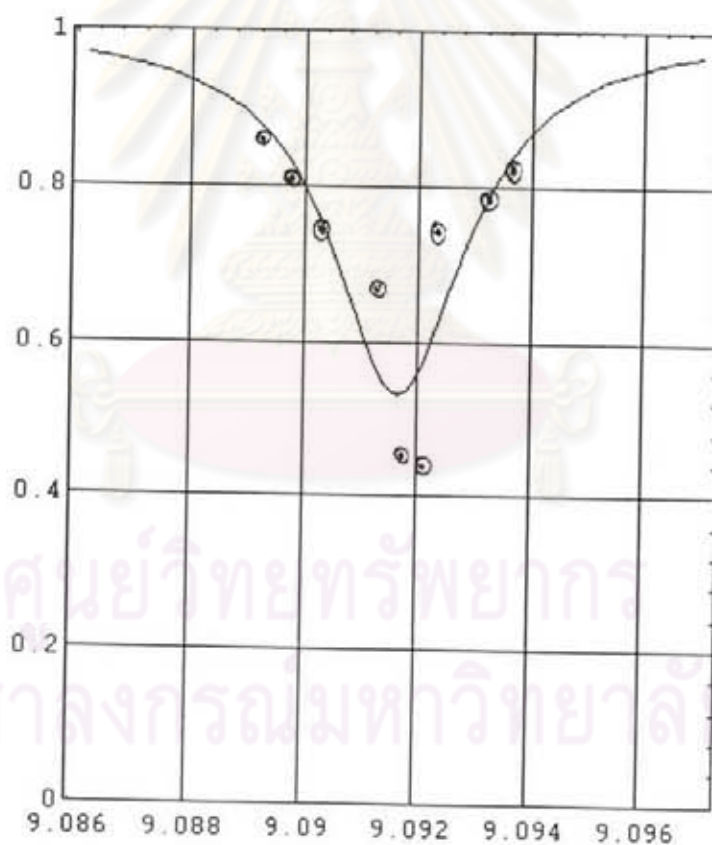
ตารางที่ 3.11 แสดงผลการวัดชุดข้อมูล ( $f$ , dB) ชุดที่ 6 เพื่อคำนวณค่า  $Q$  ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นทองเหลือง

$f$ (GHz)	dB	$\omega$ ( $s^{-1}$ )	$\rho$	$\rho$ (least)
9.08929	0.59	57.1096	0.8729	0.8731
9.08974	0.92	57.1125	0.8090	0.8315
9.09021	1.10	57.1154	0.7762	0.7690
9.09124	1.60	57.1219	0.6918	0.5708
9.09177	3.28	57.1252	0.4698	0.5355
9.09213	3.50	57.1275	0.4466	0.5802
9.09286	1.16	57.1321	0.7655	0.7268
9.09325	1.03	57.1345	0.7888	0.7905
9.09364	0.78	57.1370	0.8386	0.8383

ตารางที่ 3.12 แสดงผลการคำนวณค่า  $Q$  จากชุดข้อมูลชุดที่ 6 โดยโปรแกรม TUNE9DX.CPP

$f_0$ (GHz)	$Q$	$\xi$
9.09166	11657.8	3556.1

รูป 3.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า  $\rho$  และ  $\rho(\text{least})$



หมายเหตุ     $\odot$     แสดงค่า  $\rho$   
                   —    แสดงค่า  $\rho(\text{least})$

การทดลองที่ 7 การทดลองวัดค่า Q ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นทองเหลือง

สารตัวอย่าง แผ่นทองเหลืองบางชนิดมัน

วัน - เวลาที่ทำการทดลอง 26 มีนาคม 2540 เวลา 22.00 น.

ผลการทดลอง

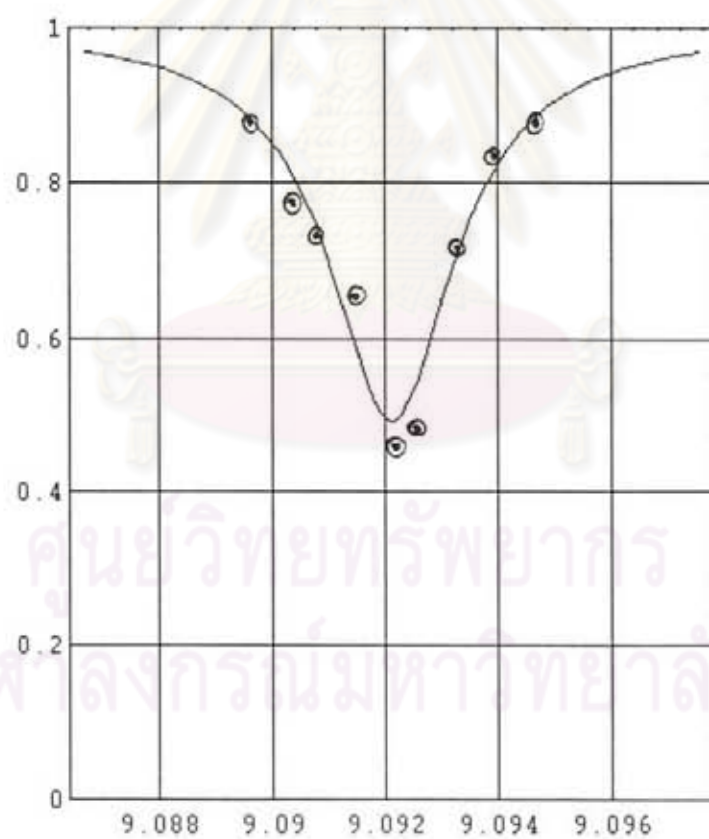
ตารางที่ 3.13 แสดงผลการวัดชุดข้อมูล ( $f$ , dB) ชุดที่ 7 เพื่อคำนวณค่า Q ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นทองเหลือง

$f$ (GHz)	dB	$\omega$ ( $s^{-1}$ )	$\rho$	$\rho$ (least)
9.08964	0.52	57.1096	0.8871	0.8809
9.09033	1.08	57.1125	0.7798	0.8135
9.09082	1.28	57.1154	0.7447	0.7360
9.01430	1.70	57.1219	0.6760	0.5998
9.09223	3.38	57.1252	0.4591	0.4967
9.09262	3.10	57.1275	0.4897	0.5576
9.09320	1.42	57.1321	0.7211	0.6930
9.09408	0.73	57.1345	0.8452	0.8349
9.09472	0.55	57.1370	0.8810	0.8898

ตารางที่ 3.14 แสดงผลการคำนวณค่า  $Q$  จากชุดข้อมูลชุดที่ 7 โดยโปรแกรม TUNE9DX.CPP

$f_0$ (GHz)	$Q$	$\xi$
9.09212	11174.5	3796.4

รูป 3.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า  $p$  และ  $p(\text{least})$



หมายเหตุ     $\odot$     แสดงค่า  $p$   
                   —    แสดงค่า  $p(\text{least})$

จากการทดลองทั้ง 7 การทดลอง เราสามารถหาค่าเฉลี่ยของค่า Q และส่วนเบี่ยงเบนได้ ดังนี้

ตารางที่ 3.15 แสดงค่าความถี่สั้นห้อง ค่า Q ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนของค่า Q ของแผ่นทองเหลืองขัดมัน

$f_0$ (GHz)	Q	$\xi$	$ Q-\bar{Q} $	%	
9.08702	8747.8	4070.7	2135.0	24.4	
9.08639	10321.2	3478.3	561.6	5.4	
9.08668	11867.8	3714.2	985.0	8.3	
9.08686	10971.1	3753.0	88.3	0.8	
9.09147	11439.6	2875.1	556.8	4.9	
9.09166	11657.8	3556.1	775.0	6.6	
9.09212	11174.5	3796.4	291.7	2.6	
ค่าเฉลี่ย	9.08888	10882.8	3606.2	776.2	7.0

5. การคำนวณค่าสภาพนำไฟฟ้าของแผ่นทองเหลืองจากค่า Q ที่วัดได้ สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.77)



$$\sigma_m = \frac{1}{\left[ \frac{\epsilon_0 \omega_0^{\frac{5}{2}} \mu_0^{\frac{3}{2}} D^3}{16\alpha_{11}^2 Q \left[ 1 + \left( \frac{\pi}{2\alpha_{11}} \right)^2 \left( \frac{D}{L} \right)^3 \right]} \right]^2} \quad \text{-----(2.77)}$$

เพื่อความสะดวก ผู้วิจัยได้เขียนโปรแกรม Sigma\_S.CPP ช่วยในการคำนวณค่าสภาพนำไฟฟ้าซึ่งรายละเอียดโปรแกรมอยู่ในภาคผนวก ได้ผลการคำนวณดังนี้

ตาราง 3.16 แสดงการคำนวณค่าสภาพนำไฟฟ้าของแผ่นทองเหลือง

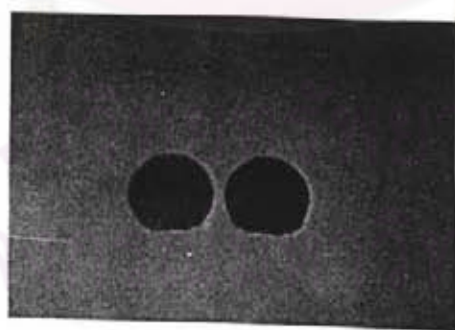
$f_0$ (GHz)	Q	$\sigma$ ( $\Omega\text{-m}$ ) <sup>-1</sup>
9.08888	10882.8	1.69 X 10 <sup>6</sup>

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดลองวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของแผ่นกราฟต์บริสุทธิ์ 99.9% และแผ่นกราฟต์บริสุทธิ์ 95 %

ในตอนนี้จะกล่าวถึงการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของแผ่นกราฟต์ความบริสุทธิ์สูง 2 ชนิด คือ แผ่นกราฟต์บริสุทธิ์ 99.9 % และแผ่นกราฟต์บริสุทธิ์ 95 % ซึ่งมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. การเตรียมสารตัวอย่าง สารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นแผ่นกราฟต์บางที่มีความบริสุทธิ์ 99.9 % ยี่ห้อ Alfa ซึ่งเป็นแผ่นกราฟต์ออคบางชนิด Metal Basis ที่มีความหนาสม่ำเสมอ 0.254 มิลลิเมตร และแผ่นกราฟต์บางที่มีความบริสุทธิ์ 95 % ผสมซีดี 5 % ยี่ห้อ Alfa มีความหนา 0.25 มิลลิเมตร ในการเตรียมสารตัวอย่างจะตัดแผ่นกราฟต์ให้ได้รูปร่างแบบเดียวกับแผ่นทองเหลืองขัดมัน จากนั้นจะนำแผ่นกราฟต์ที่ได้ปิดลงบนแผ่นอลูมิเนียมที่ได้ตัดขึ้นรูปให้มีรูปร่างแบบเดียวกันซึ่งแผ่นสารตัวอย่างที่ได้มีลักษณะดังรูป 3.26



รูป 3.26 แสดงภาพถ่ายแผ่นกราฟต์ที่ปิดบนแผ่นโลหะ

จากนั้นจึงนำแผ่นกราฟต์ที่ได้ไปปิดไว้ที่ฝาของตัวสันห้องแบบเดียวกับการทดลองกับแผ่นทองเหลือง โดยก่อนปิดทำความสะอาดผิวของแผ่นกราฟต์ด้วยเมธานอนก่อน เมื่อปิดแผ่นสารตัวอย่างบนตัวสันห้องแล้วนำตัวสันห้องไปประกอบกับอุปกรณ์ผ่านไมโครเวฟอื่นๆ เพื่อทำการทดลองต่อไป

2. ผลการทดลองวัดค่า  $Q$  ของตัวสันห้องที่ปิดด้วยแผ่นกราฟต์ 99.9 % มีดังนี้



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดลองที่ 8 การทดลองวัดค่า Q ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นกราฟต์ 99.9%

สารตัวอย่าง แผ่นกราฟต์บางความบริสุทธิ์ 99.9%

วัน - เวลาที่ทำการทดลอง 14 ธันวาคม 2539 เวลา 12.00 น.

ผลการทดลอง

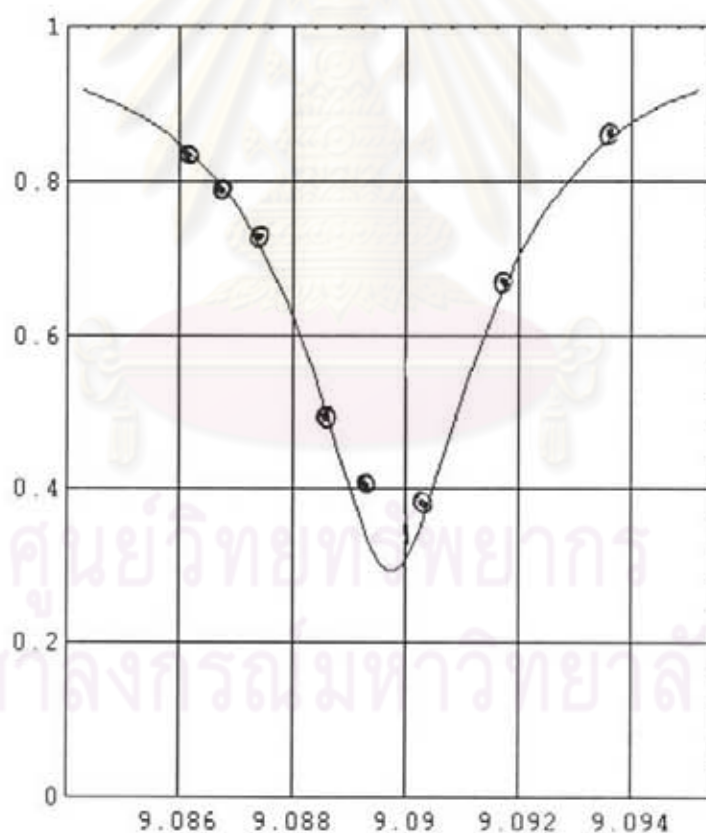
ตารางที่ 3.17 แสดงผลการวัดชุดข้อมูล ( $f$ , dB) ชุดที่ 1 เพื่อคำนวณค่า Q ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นกราฟต์ 99.9%

$f$ (GHz)	dB	$\omega$ ( $s^{-1}$ )	$\rho$	$\rho$ (least)
9.08614	0.70	57.0899	0.8511	0.8401
9.08669	1.02	57.0934	0.7907	0.7977
9.08736	1.40	57.0976	0.7244	0.7245
9.08855	3.02	57.1050	0.4989	0.5089
9.08920	3.94	57.1091	0.4036	0.3593
9.09047	4.36	57.1171	0.3664	0.3961
9.09117	2.42	57.1215	0.5728	0.5574
9.09177	1.70	57.1253	0.6761	0.6702
9.09354	0.75	57.1364	0.8414	0.8513

ตารางที่ 3.18 แสดงผลการคำนวณค่า  $Q$  จากชุดข้อมูลชุดที่ 1 โดยโปรแกรม TUNE9DX.CPP

$f_0$ (GHz)	$Q$	$\xi$
9.08975	5173.9	2822.6

รูป 3.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า  $\rho$  และ  $\rho(\text{least})$



การทดลองที่ 9 การทดลองวัดค่า Q ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นกราฟต์บริสุทธิ 99.9%

สารตัวอย่าง แผ่นกราฟต์บริสุทธิ 99.9%

วัน - เวลาที่ทำการทดลอง 15 ธันวาคม 2539 เวลา 14.00 น.

ผลการทดลอง

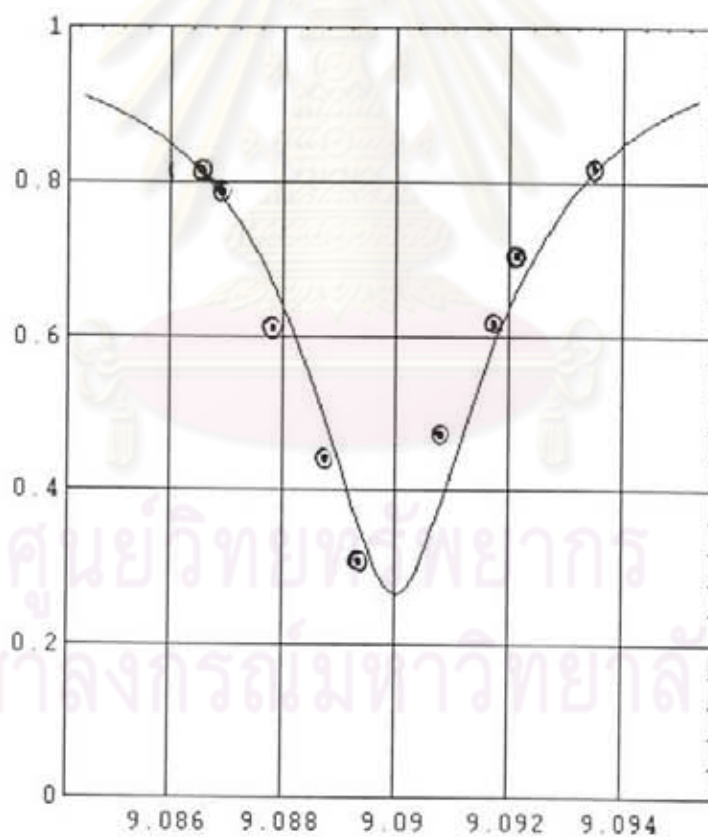
ตารางที่ 3.19 แสดงผลการวัดชุดข้อมูล ( $f$ , dB) ชุดที่ 2 เพื่อคำนวณค่า Q ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นกราฟต์บริสุทธิ 99.9%

$f$ (GHz)	dB	$\omega$ ( $s^{-1}$ )	$\rho$	$\rho$ (least)
9.08658	0.90	57.0927	0.8128	0.8085
9.08684	1.01	57.0943	0.7925	0.7867
9.08780	2.18	57.1003	0.6053	0.6730
9.8877	3.46	57.1064	0.4508	0.4881
9.08920	5.12	57.1091	0.3076	0.3880
9.09075	3.06	57.1189	0.4943	0.3735
9.09172	2.10	57.1250	0.6166	0.5884
9.09210	1.56	57.1273	0.6982	0.6554
9.09359	0.93	57.1367	0.8072	0.8203

ตารางที่ 3.20 แสดงผลการคำนวณค่า  $Q$  จากชุดข้อมูลชุดที่ 2 โดยโปรแกรม TUNE9DX.CPP

$f_0$ (GHz)	$Q$	$\xi$
9.09001	4694.9	2714.9

รูป 3.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า  $p$  และ  $p(\text{least})$



การทดลองที่ 10 การทดลองวัดค่า Q ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นกราฟต์บริสุทธ์ 99.9%

สารตัวอย่าง แผ่นกราฟต์บริสุทธ์ 99.9%

วัน - เวลาที่ทำการทดลอง 15 ธันวาคม 2539 เวลา 22.00 น.

ผลการทดลอง

ตารางที่ 3.21 แสดงผลการวัดชุดข้อมูล ( $f$ , dB) ชุดที่ 3 เพื่อคำนวณค่า Q ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นกราฟต์บริสุทธ์ 99.9%

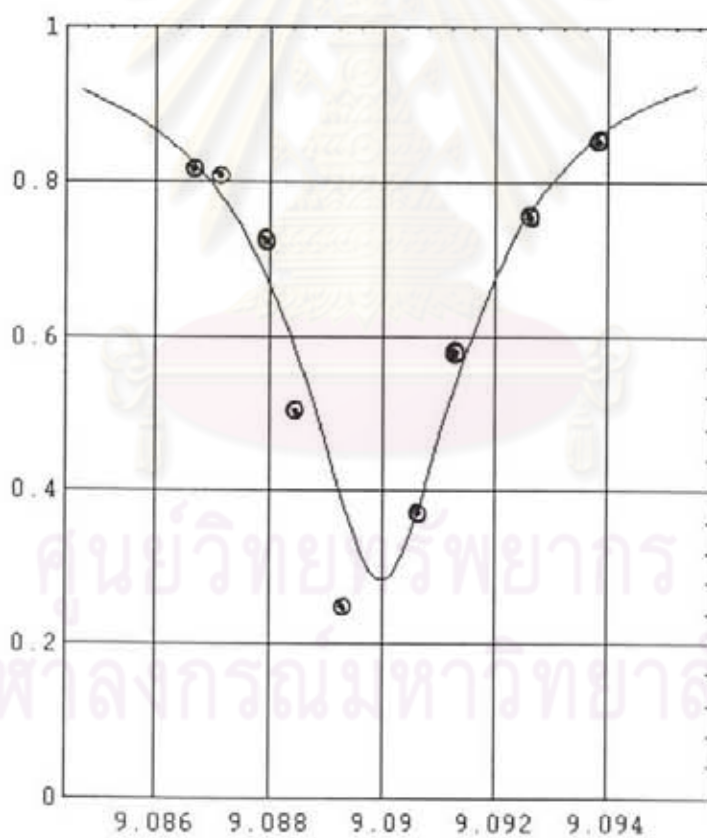
$f$ (GHz)	dB	$\omega$ ( $s^{-1}$ )	$\rho$	$\rho$ (least)
9.08666	0.88	57.0932	0.8165	0.8245
9.08709	0.90	57.0959	0.8128	0.7871
9.08790	1.40	57.1010	0.7244	0.6851
9.08842	2.96	57.1042	0.5058	0.5904
9.08919	6.16	57.1091	0.2421	0.4099
9.09064	4.26	57.1118	0.3750	0.3820
9.09122	2.36	57.1218	0.5808	0.5231
9.09252	1.20	57.1300	0.7586	0.7507
9.09381	0.72	57.1381	0.8472	0.8591



ตารางที่ 3.22 แสดงผลการคำนวณค่า  $Q$  จากชุดข้อมูลชุดที่ 3 โดยโปรแกรม TUNE9DX.CPP

$f_0$ (GHz)	$Q$	$\xi$
9.08997	5246.6	2919.4

รูป 3.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับ  $\rho$  และ  $\rho(\text{least})$



การทดลองที่ 11 การทดลองวัดค่า Q ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นกราฟต์บริสุทธิ์ 99.9%

สารตัวอย่าง แผ่นกราฟต์บริสุทธิ์ 99.9%

วัน - เวลาที่ทำการทดลอง 17 ธันวาคม 2539 เวลา 21.30 น.

ผลการทดลอง

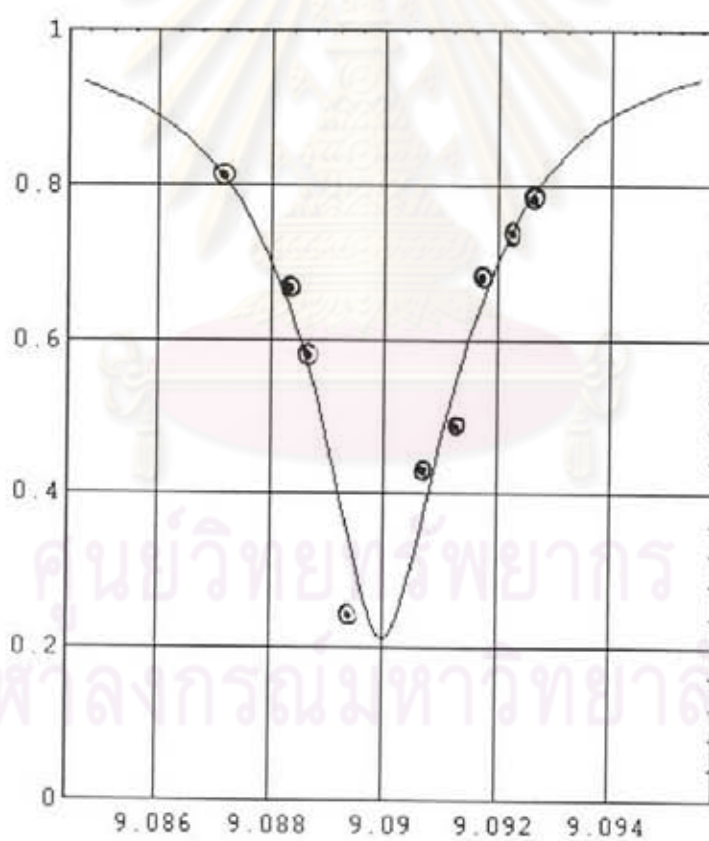
ตารางที่ 3.23 แสดงผลการวัดชุดข้อมูล ( $f$ , dB) ชุดที่ 4 เพื่อคำนวณค่า Q ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นกราฟต์บริสุทธิ์ 99.9%

$f$ (GHz)	dB	$\omega$ ( $s^{-1}$ )	$\rho$	$\rho$ (least)
9.08717	0.91	57.0964	0.8109	0.8107
9.08827	1.72	57.1033	0.6729	0.6539
9.08860	2.28	57.1054	0.5915	0.5795
9.08925	6.16	57.1094	0.2421	0.3898
9.09070	3.66	57.1185	0.4305	0.3723
9.09122	3.06	57.1218	0.4943	0.5313
9.09178	1.62	57.1253	0.6886	0.6630
9.09221	1.31	57.1280	0.7396	0.7363
9.09264	1.09	57.1307	0.7780	0.7908

ตารางที่ 3.24 แสดงผลการคำนวณค่า  $Q$  จากชุดข้อมูลที่ 4 โดยโปรแกรม TUNE9DX.CPP

$f_0$ (GHz)	$Q$	$\xi$
9.09000	5448.0	3537.3

รูป 3.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า  $p$  และ  $p(\text{least})$



การทดลองที่ 12 การทดลองวัดค่า  $Q$  ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นกราฟไฟต์บริสุทธิ์ 99.9%

สารตัวอย่าง แผ่นกราฟไฟต์บริสุทธิ์ 99.9%

วัน - เวลาที่ทำการทดลอง 18 ธันวาคม 2539 เวลา 22.00 น.

ผลการทดลอง

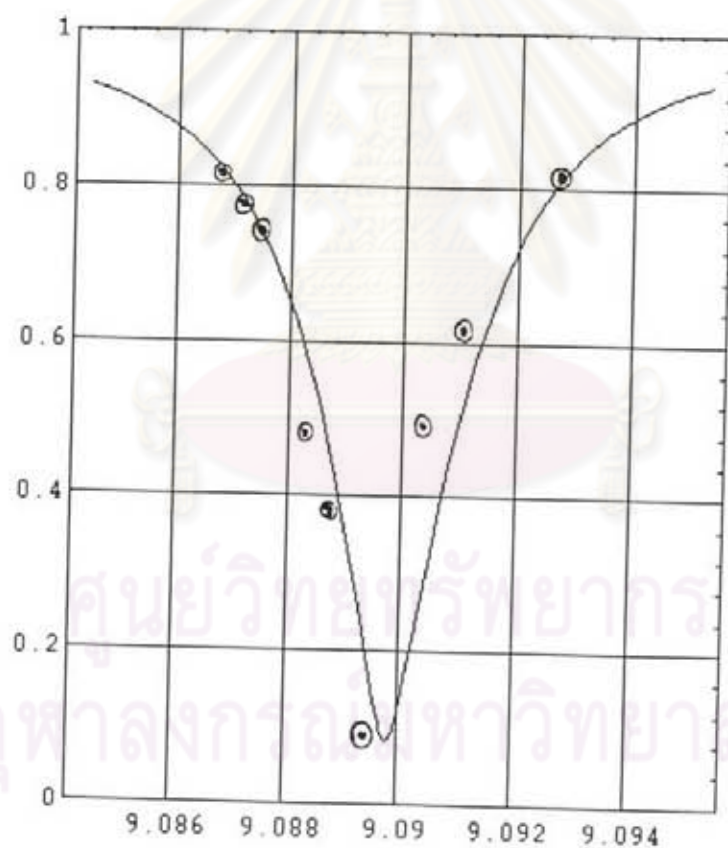
ตารางที่ 3.25 แสดงผลการวัดชุดข้อมูล ( $f$ , dB) ชุดที่ 5 เพื่อคำนวณค่า  $Q$  ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นกราฟไฟต์บริสุทธิ์ 99.9%

$f$ (GHz)	dB	$\omega$ ( $s^{-1}$ )	$\rho$	$\rho$ (least)
9.08669	0.85	57.0993	0.8222	0.8289
9.08714	1.06	57.0961	0.7834	0.7852
9.08752	1.20	57.0985	0.7585	0.7360
9.08818	3.12	57.1027	0.4875	0.6117
9.08872	4.14	57.1061	0.3854	0.4579
9.08930	10.56	57.1097	0.0879	0.2265
9.09037	3.00	57.1164	0.5011	0.2399
9.09129	2.12	57.1222	0.6137	0.5689
9.09269	0.95	57.1310	0.8035	0.8052

ตารางที่ 3.26 แสดงผลการคำนวณค่า  $Q$  จากชุดข้อมูลที่ชุดที่ 5 โดยโปรแกรม TUNE9DX.CPP

$f_0$ (GHz)	$Q$	$\xi$
9.08982	4714.0	3993.8

รูป 3.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า  $\rho$  และ  $\rho(\text{least})$



จากการทดลองทั้ง 5 การทดลองเราสามารถหาค่าเฉลี่ยของค่า Q และส่วนเบี่ยงเบนได้ดังนี้

ตารางที่ 3.27 แสดงค่าความถี่สั่นพ้อง ค่า Q ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนของค่า Q ของแผ่นกราไฟต์บริสุทธิ์ 99.9 %

$f_0$ (GHz)	Q	$\xi$	$ Q-\bar{Q} $	%
9.08975	5173.9	2822.6	118.4	2.3
9.09001	4694.9	2714.9	360.6	7.7
9.08997	5246.6	2919.4	191.1	3.6
9.09000	5448.0	3537.3	393.3	7.2
9.08982	4714.0	3993.8	341.5	7.2
ค่าเฉลี่ย	5055.5	3209.6	280.9	5.6

3. การคำนวณค่าสภาพนำไฟฟ้าของแผ่นกราไฟต์บริสุทธิ์ 99.9 % จากค่า Q ที่วัดได้ ซึ่งคำนวณได้โดยใช้สมการ (2.81) และใช้ค่า Q และค่าสภาพนำไฟฟ้าของแผ่นทองเหลืองที่วัดได้จากตอนที่แล้วมาประกอบการคำนวณด้วย

$$\sigma_g = \frac{1}{\left[ \frac{1}{\sqrt{\sigma_m}} + \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{\epsilon_0 \omega_0^{\frac{1}{2}} \mu_0^{\frac{1}{2}} L^3}{\pi^2} \left( \frac{1}{Q_g} - \frac{1}{Q_m} \right) \right]^2} \quad \text{-----}(2.81)$$

เพื่อความสะดวก ผู้วิจัยได้เขียนโปรแกรม ZigmaG.CPP เพื่อช่วยในการคำนวณค่าสภาพนำไฟฟ้าของแผ่นสารตัวอย่าง โดยได้ผลการคำนวณดังตาราง

ตาราง 3.28 แสดงการคำนวณค่าสภาพนำไฟฟ้าของแผ่นกราฟต์บริสุทธิ์ 99.9 %

$f_0$ (GHz)	Q	$\sigma$ ( $\Omega\text{-m}$ ) <sup>-1</sup>
9.08991	5055.5	$2.96 \times 10^4$

4. ผลการทดลองวัดค่า Q ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นกราฟต์บริสุทธิ์ 95 %

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดลองที่ 13 การทดลองวัดค่า  $Q$  ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นกราฟไฟต์ 95%

สารตัวอย่าง แผ่นกราฟไฟต์ บริสุทธิ์ 95%

วัน - เวลาที่ทำการทดลอง 2 เมษายน 2540 เวลา 21.00 น.

ผลการทดลอง

ตารางที่ 3.29 แสดงผลการวัดชุดข้อมูล ( $f$ , dB) ชุดที่ 1 เพื่อคำนวณค่า  $Q$  ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นกราฟไฟต์บริสุทธิ์ 95 %

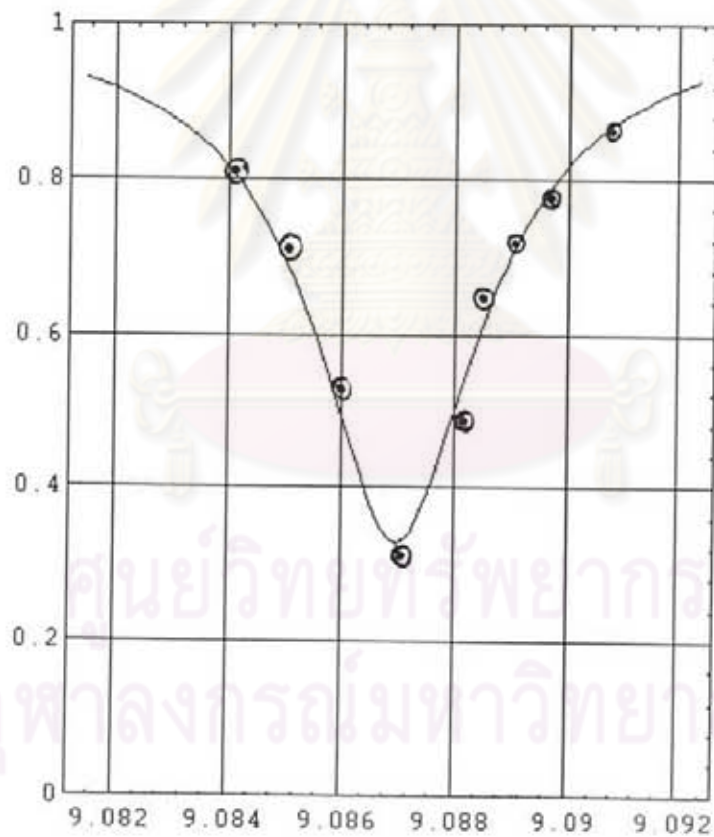
$f$ (GHz)	dB	$\omega$ ( $s^{-1}$ )	$\rho$	$\rho$ (least)
9.08419	0.93	57.0776	0.8072	0.7993
9.08489	1.44	57.0820	0.7177	0.7158
9.08599	2.76	57.0889	0.5296	0.5005
9.08709	5.14	57.0958	0.3061	0.3310
9.08822	3.18	57.1029	0.4808	0.5493
9.08855	1.85	57.1050	0.6531	0.6196
9.08910	1.44	57.1084	0.7177	0.7144
9.08973	1.08	57.1124	0.7798	0.7915
9.09075	0.62	57.1188	0.8669	0.8680



ตารางที่ 3.30 แสดงผลการคำนวณค่า  $Q$  จากชุดข้อมูลชุดที่ 1 โดยโปรแกรม TUNE9DX.CPP

$f_0$ (GHz)	$Q$	$\xi$
9.08700	5844.1	2950.3

รูป 3.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า  $\rho$  และ  $\rho(\text{least})$



การทดลองที่ 14 การทดลองวัดค่า Q ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นกราฟต์ 95%

สารตัวอย่าง แผ่นกราฟต์บริสุทธิ์ 95%

วัน - เวลาที่ทำการทดลอง 4 เมษายน 2540 เวลา 20.00 น.

ผลการทดลอง

ตารางที่ 3.31 แสดงผลการวัดชุดข้อมูล ( $f$ , dB) ชุดที่ 2 เพื่อคำนวณค่า Q ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นกราฟต์ 95 %

$f$ (GHz)	dB	$\omega$ ( $s^{-1}$ )	$\rho$	$\rho$ (least)
9.08420	0.82	57.0777	0.8279	0.7929
9.08461	1.48	57.0802	0.7112	0.7464
9.08517	1.84	57.0838	0.6546	0.6586
9.08549	2.20	57.0858	0.6025	0.5916
9.08634	4.60	57.0911	0.3467	0.3304
9.08820	3.70	57.1028	0.4265	0.3800
9.08978	1.34	57.1127	0.7345	0.7439
9.09026	1.02	57.1157	0.7906	0.7979
9.09156	0.56	57.1239	0.8790	0.8841

ตารางที่ 3.32 แสดงผลการคำนวณค่า  $Q$  จากชุดข้อมูลชุดที่ 2 โดยโปรแกรม TUNE9DX.CPP

$f_0$ (GHz)	$Q$	$\xi$
9.08720	4648.6	3506.0

รูป 3.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า  $\rho$  และ  $\rho(\text{least})$



การทดลองที่ 15 การทดลองวัดค่า Q ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นกราฟไฟต์ 95%

สารตัวอย่าง แผ่นกราฟไฟต์ 95%

วัน - เวลาที่ทำการทดลอง 5 เมษายน 2540 เวลา 22.00 น.

ผลการทดลอง

ตารางที่ 3.33 แสดงผลการวัดชุดข้อมูล ( $f$ , dB) ชุดที่ 3 เพื่อคำนวณค่า Q ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นกราฟไฟต์ 95 %

$f$ (GHz)	dB	$\omega$ ( $s^{-1}$ )	$\rho$	$\rho$ (least)
9.08359	0.87	57.0738	0.8184	0.8427
9.08426	0.97	57.0780	0.7998	0.7901
9.08510	1.34	57.0833	0.7345	0.6907
9.08553	2.32	57.0860	0.5861	0.6223
9.08616	3.36	57.0900	0.4613	0.5080
9.08803	2.58	57.1017	0.5520	0.5286
9.08895	1.64	57.1075	0.6854	0.6868
9.08917	1.46	57.1089	0.7144	0.7175
9.08999	0.86	57.1140	0.8203	0.8056

ตารางที่ 3.34 แสดงผลการคำนวณค่า  $Q$  จากชุดข้อมูลชุดที่ 3 โดยโปรแกรม TUNE9DX.CPP

$f_0$ (GHz)	$Q$	$\xi$
9.08704	6107.9	2556.4

รูป 3.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า  $\rho$  และ  $\rho(\text{least})$



การทดลองที่ 16 การทดลองวัดค่า Q ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นกราฟไฟต์ 95%

สารตัวอย่าง แผ่นกราฟไฟต์ บริสุทธิ์ 95%

วัน - เวลาที่ทำการทดลอง 14 เมษายน 2540 เวลา 21.00 น.

ผลการทดลอง

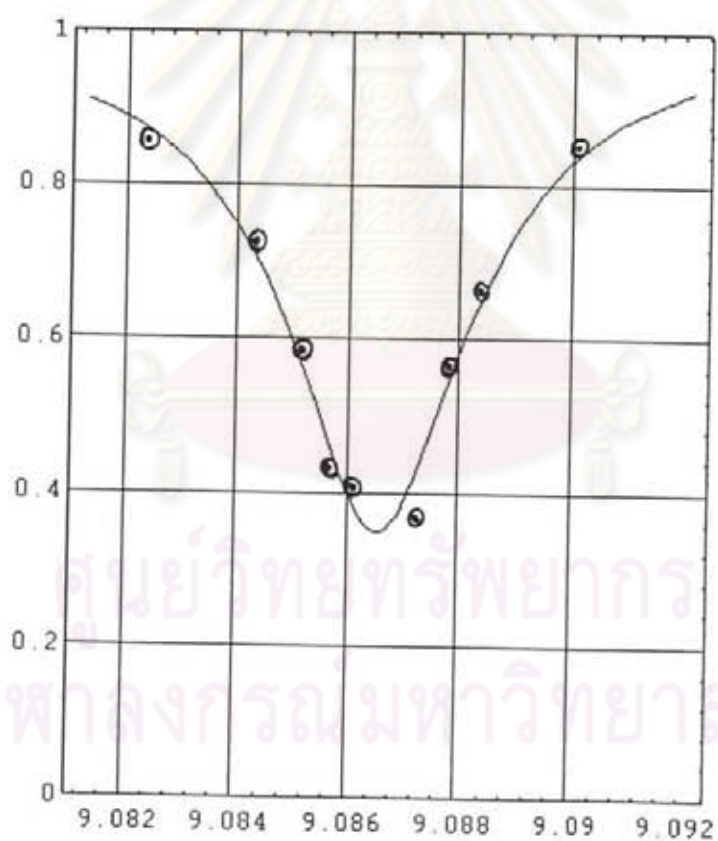
ตารางที่ 3.35 แสดงผลการวัดชุดข้อมูล ( $f$ , dB) ชุดที่ 4 เพื่อคำนวณค่า Q ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นกราฟไฟต์ 95%

$f$ (GHz)	dB	$\omega$ ( $s^{-1}$ )	$\rho$	$\rho$ (least)
9.08235	0.60	57.0660	0.8709	0.8744
9.08420	1.34	57.0777	0.7345	0.7246
9.08509	2.36	57.0833	0.5807	0.5805
9.08564	3.60	57.0867	0.4365	0.4675
9.08602	3.84	57.0891	0.4130	0.3949
9.08725	4.42	57.0968	0.3614	0.4321
9.08789	2.48	57.1008	0.5649	0.5637
9.08837	1.78	57.1039	0.6637	0.6518
9.09017	0.71	57.1152	0.8491	0.8447

ตารางที่ 3.36 แสดงผลการคำนวณค่า  $Q$  จากชุดข้อมูลชุดที่ 4 โดยโปรแกรม TUNE9DX.CPP

$f_0$ (GHz)	$Q$	$\xi$
9.08653	5512.9	2664.6

รูป 3.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า  $p$  และ  $p(\text{least})$



การทดลองที่ 17 การทดลองวัดค่า Q ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นกราฟไฟต์ 95%

สารตัวอย่าง แผ่นกราฟไฟต์ 95%

วัน - เวลาที่ทำการทดลอง 15 เมษายน 2540 เวลา 22.00 น.

ผลการทดลอง

ตารางที่ 3.37 แสดงผลการวัดชุดข้อมูล ( $f$ , dB) ชุดที่ 5 เพื่อคำนวณค่า Q ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นกราฟไฟต์ 95%

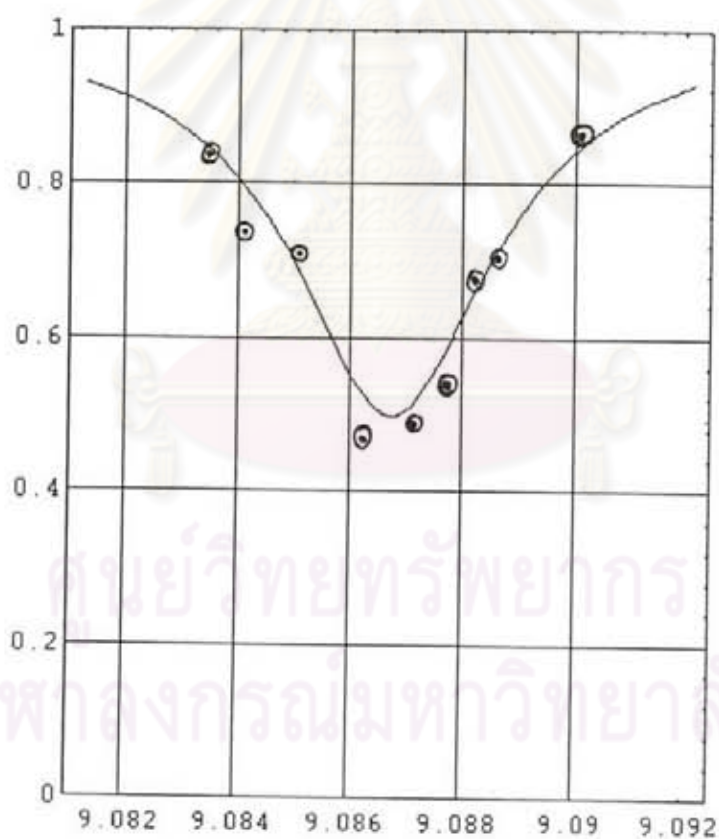
f (GHz)	dB	$\omega$ (s <sup>-1</sup> )	P	p (least)
9.08353	0.71	57.0735	0.8491	0.8414
9.08454	1.26	57.0798	0.7481	0.7542
9.08508	1.42	57.0832	0.7211	0.6876
9.08625	3.38	57.0905	0.4591	0.5257
9.08722	3.04	57.0966	0.4965	0.5204
9.08771	2.68	57.0997	0.5395	0.5810
9.08819	1.64	57.1027	0.6854	0.6517
9.08856	1.50	57.1051	0.7079	0.7031
9.09050	0.64	57.1172	0.8629	0.8706



ตารางที่ 3.38 แสดงผลการคำนวณค่า  $Q$  จากชุดข้อมูลชุดที่ 5 โดยโปรแกรม TUNE9DX.CPP

$f_0$ (GHz)	$Q$	$\xi$
9.08676	7028.6	2356.8

รูป 3.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า  $p$  และ  $p(\text{least})$



จากการทดลองทั้ง 5 การทดลองเราสามารถหาค่าเฉลี่ยของค่า Q และส่วนเบี่ยงเบนได้ดังนี้

ตารางที่ 3.39 แสดงค่าความถี่สั้นพ้อง ค่า Q ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนของค่า Q ของแผ่นกราฟต์บริสุทธิ 95 %

$f_0$ (GHz)	Q	$\xi$	$ Q-\bar{Q} $	%
9.08700	5844.1	2950.4	15.7	0.3
9.08720	4648.6	3506.0	1179.8	25.4
9.08704	6107.9	2556.4	279.5	4.6
9.08653	5512.9	2664.6	315.8	5.2
9.08676	7028.6	2356.8	1200.2	17.1
<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>5828.4</b>	<b>2806.8</b>	<b>598.2</b>	<b>10.26</b>

3. การคำนวณค่าสภาพนำไฟฟ้าของแผ่นกราฟต์บริสุทธิ 95 % จากค่า Q ที่วัดได้ ซึ่งคำนวณได้โดยใช้สมการ (2.81) และใช้ค่า Q และค่าสภาพนำไฟฟ้าของแผ่นทองเหลืองที่วัดได้จากตอนที่แล้วมาประกอบการคำนวณด้วย

$$\sigma_g = \frac{1}{\left[ \frac{1}{\sqrt{\sigma_m}} + \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{\epsilon_0 \omega_0^2 \mu_0^{\frac{1}{2}} L^3}{\pi^2} \left( \frac{1}{Q_g} - \frac{1}{Q_m} \right) \right]^2} \quad \text{-----(2.81)}$$

เพื่อความสะดวก ผู้วิจัยได้เขียนโปรแกรม ZigmaG.CPP เพื่อช่วยในการคำนวณค่าสภาพนำไฟฟ้าของแผ่นสารตัวอย่าง โดยได้ผลการคำนวณดังตาราง

ตาราง 3.40 แสดงการคำนวณค่าสภาพนำไฟฟ้าของแผ่นกราฟต์บริสุทธิ์ 95 %

$f_0$ (GHz)	Q	$\sigma$ ( $\Omega\text{-m}$ ) <sup>-1</sup>
9.08691	5828.4	$4.81 \times 10^4$

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## การทดลองวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของแผ่นแก้วกราไฟต์

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของแผ่นแก้วกราไฟต์ที่ใช้ในงานทางอุตสาหกรรมเพื่อนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองก่อนหน้านี ซึ่งมีวิธีการดังนี้

1. การเตรียมสารตัวอย่าง สารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นแผ่นแก้วกราไฟต์ (Glassy Graphite) ซึ่งเป็นแผ่นกราไฟต์อีกรูปแบบหนึ่งที่เกิดจากกระบวนการอัดให้เป็นแผ่นกับวัสดุประสานออกมาเป็นแผ่นแบนเรียบสม่ำเสมอที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐานเหมือนแก้ว โดยก่อนทดลองจะต้องตัดแผ่นแก้วกราไฟต์ให้มีลักษณะเหมือนฝาปิดตัวสั้นพ้องดังรูป 3.37 แล้วล้างทำความสะอาดด้วยเมธานอนเพื่อเตรียมพร้อมที่จะทำการทดลองต่อไป



รูป 3.37 แสดงภาพถ่ายแผ่นแก้วกราไฟต์ที่ตัดขึ้นรูปพร้อมที่จะทำการทดลอง

2. ผลการทดลองวัดค่า  $Q$  ของตัวสั้นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นแก้วกราไฟต์มีดังนี้

การทดลองที่ 18 การทดลองวัดค่า Q ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นแก้วกราไฟต์

สารตัวอย่าง แผ่นแก้วกราไฟต์

วัน - เวลาที่ทำการทดลอง 5 พฤศจิกายน 2539

เวลา 10.30 น.

ผลการทดลอง

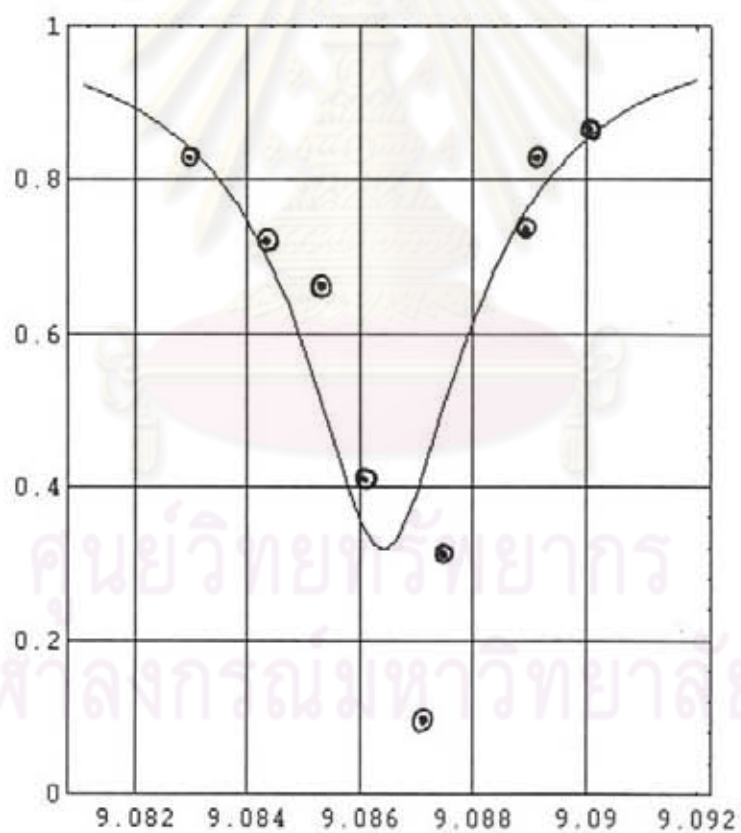
ตารางที่ 3.41 แสดงผลการวัดชุดข้อมูล ( $f$ , dB) ชุดที่ 1 เพื่อคำนวณค่า Q ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นแก้วกราไฟต์

$f$ (GHz)	dB	$\omega$ ( $s^{-1}$ )	$\rho$	$\rho$ (least)
9.08297	0.78	57.0699	0.8356	0.8427
9.08420	1.32	57.0777	0.7373	0.7202
9.08528	1.76	57.0844	0.6668	0.5173
9.08604	3.89	57.0892	0.4083	0.3509
9.08718	10.52	57.0964	0.0887	0.4333
9.08750	5.52	57.0984	0.2805	0.5086
9.08893	1.12	57.1074	0.7726	0.7603
9.08958	0.83	57.1115	0.8260	0.8231
9.09027	0.64	57.1158	0.8629	0.8682

ตารางที่ 3.42 แสดงผลการคำนวณค่า  $Q$  จากชุดข้อมูลชุดที่ 1 โดยโปรแกรม TUNE9DX.CPP

$f_0$ (GHz)	$Q$	$\xi$
9.08641	5625.6	2901.8

รูป 3.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า  $p$  และ  $p(\text{least})$



การทดลองที่ 19 การทดลองวัดค่า  $Q$  ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นแก้วกราไฟต์

สารตัวอย่าง แผ่นแก้วกราไฟต์

วัน - เวลาที่ทำการทดลอง 6 พฤศจิกายน 2539

เวลา 16.00 น.

ผลการทดลอง

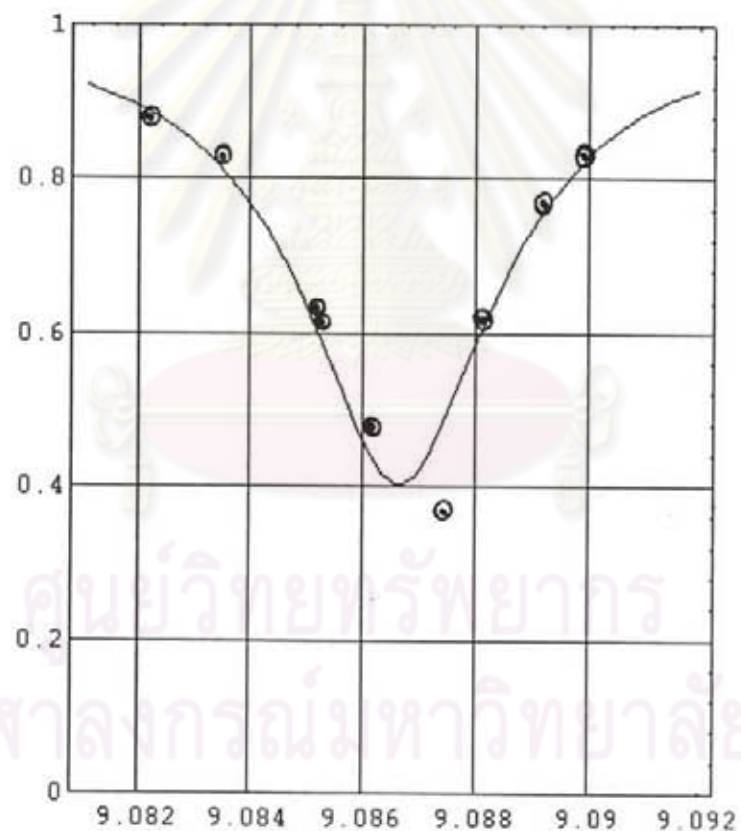
ตารางที่ 3.43 แสดงผลการวัดชุดข้อมูล ( $f$ , dB) ชุดที่ 2 เพื่อคำนวณค่า  $Q$  ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นแก้วกราไฟต์

$f$ (GHz)	dB	$\omega$ ( $s^{-1}$ )	$\rho$	$\rho$ (least)
9.08222	0.55	57.0652	0.8810	0.8861
9.08346	0.80	57.0730	0.8317	0.8156
9.08459	1.90	57.0801	0.6456	0.6958
9.08518	2.03	57.0837	0.6266	0.6030
9.08616	3.14	57.0900	0.4852	0.4361
9.08732	4.29	57.0973	0.3723	0.4656
9.08815	2.13	57.1025	0.6123	0.6124
9.08925	1.09	57.1094	0.7780	0.7643
9.08996	0.83	57.1139	0.8260	0.8263

ตารางที่ 3.44 แสดงผลการคำนวณค่า  $Q$  จากชุดข้อมูลชุดที่ 2 โดยโปรแกรม TUNE9DX.CPP

$f_0$ (GHz)	$Q$	$\xi$
9.08664	5871.2	2496.1

รูป 3.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า  $\rho$  และ  $\rho(\text{least})$





การทดลองที่ 20 การทดลองวัดค่า  $Q$  ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นแก้วกราไฟต์

สารตัวอย่าง แผ่นแก้วกราไฟต์

วัน - เวลาที่ทำการทดลอง 6 พฤศจิกายน 2539

เวลา 23.00 น.

ผลการทดลอง

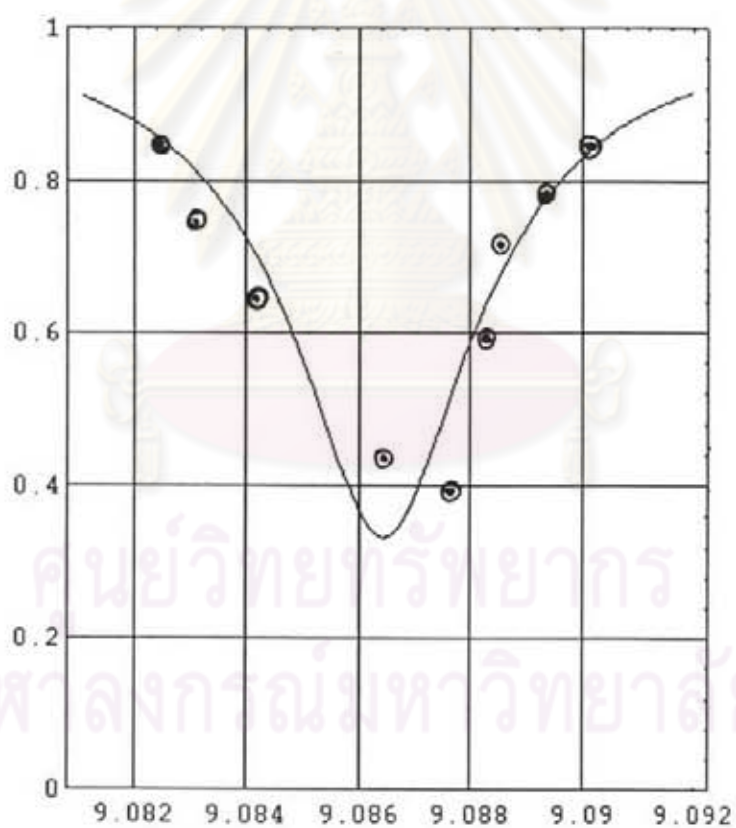
ตารางที่ 3.45 แสดงผลการวัดชุดข้อมูล ( $f$ , dB) ชุดที่ 3 เพื่อคำนวณค่า  $Q$  ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นแก้วกราไฟต์

$f$ (GHz)	dB	$\omega$ ( $s^{-1}$ )	$\rho$	$\rho$ (least)
9.08247	0.68	57.0668	0.8550	0.8560
9.08352	1.30	57.0734	0.7413	0.7787
9.08491	1.86	57.0821	0.6576	0.5823
9.08647	3.46	57.0919	0.4508	0.3329
9.08771	4.04	57.0997	0.3944	0.5311
9.08825	2.26	57.1031	0.5942	0.6332
9.08858	1.42	57.1052	0.7211	0.6854
9.08932	1.03	57.1098	0.7888	0.7705
9.09032	0.71	57.1161	0.8491	0.8510

ตารางที่ 3.46 แสดงผลการคำนวณค่า  $Q$  จากชุดข้อมูลชุดที่ 3 โดยโปรแกรม TUNE9DX.CPP

$f_0$ (GHz)	$Q$	$\xi$
9.08644	5235.8	2621.3

รูป 3.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า  $p$  และ  $p(\text{least})$



การทดลองที่ 21 การทดลองวัดค่า Q ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นแก้วกราไฟต์

สารตัวอย่าง แผ่นแก้วกราไฟต์

วัน - เวลาที่ทำการทดลอง 7 พฤศจิกายน 2539

เวลา 22.00 น.

ผลการทดลอง

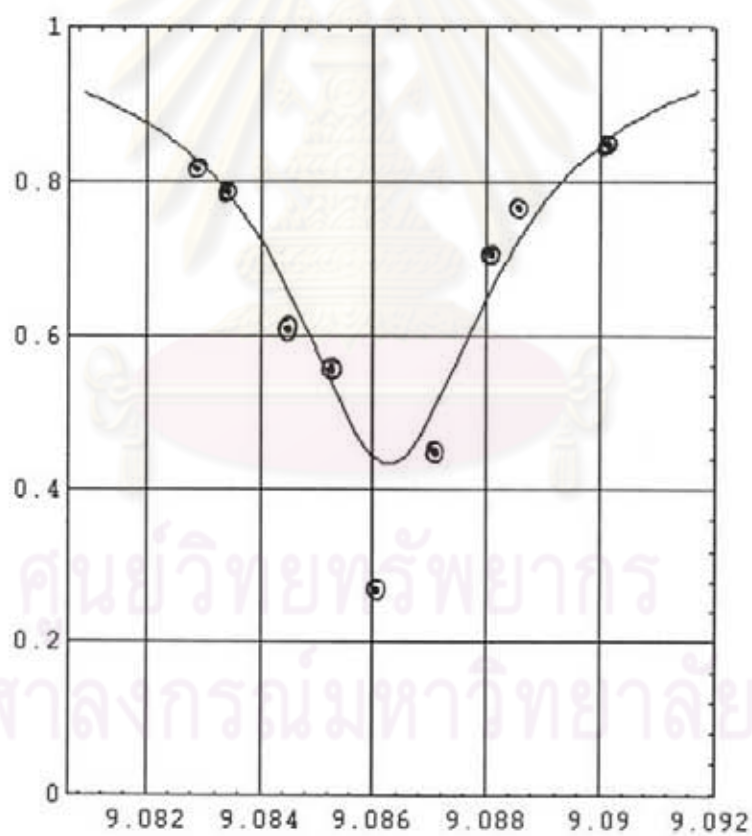
ตารางที่ 3.47 แสดงผลการวัดชุดข้อมูล ( $f$ , dB) ชุดที่ 4 เพื่อคำนวณค่า Q ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นแก้วกราไฟต์

$f$ (GHz)	dB	$\omega$ ( $s^{-1}$ )	$\rho$	$\rho$ (least)
9.08291	0.88	57.0696	0.8165	0.8252
9.08342	1.02	57.0728	0.7906	0.7847
9.08444	2.20	57.0792	0.6025	0.6666
9.08525	2.46	57.0843	0.5675	0.5392
9.08600	5.56	57.0890	0.2779	0.4433
9.08703	3.50	57.0954	0.4466	0.4948
9.08808	1.42	57.1020	0.7211	0.6598
9.08858	1.12	57.1052	0.7726	0.7258
9.09037	0.66	57.1164	0.8590	0.8669

ตารางที่ 3.48 แสดงผลการคำนวณค่า  $Q$  จากชุดข้อมูลที่ 4 โดยโปรแกรม TUNE9DX.CPP

$f_0$ (GHz)	$Q$	$\xi$
9.08628	5911.2	2336.9

รูป 3.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า  $\rho$  และ  $\rho(\text{least})$



การทดลองที่ 22 การทดลองวัดค่า Q ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นแก้วกราไฟต์

สารตัวอย่าง แผ่นแก้วกราไฟต์

วัน - เวลาที่ทำการทดลอง 9 พฤศจิกายน 2539

เวลา 10.30 น.

ผลการทดลอง

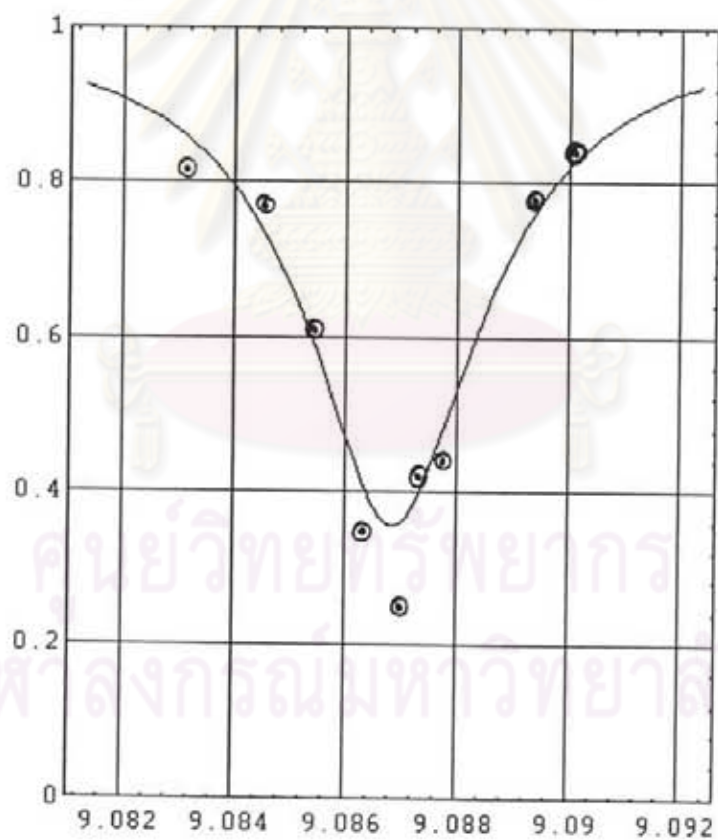
ตารางที่ 3.49 แสดงผลการวัดชุดข้อมูล ( $f$ , dB) ชุดที่ 5 เพื่อคำนวณค่า Q ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นแก้วกราไฟต์

$f$ (GHz)	dB	$\omega$ ( $s^{-1}$ )	$\rho$	$\rho$ (least)
9.08371	0.89	57.0746	0.8147	0.8190
9.08447	1.13	57.0794	0.7709	0.7427
9.08535	2.17	57.0849	0.6067	0.6040
9.08631	4.51	57.0909	0.3539	0.4080
9.08703	5.94	57.0954	0.2546	0.3634
9.08733	4.83	57.0973	0.3288	0.4008
9.08777	3.00	57.1001	0.5011	0.4875
9.08934	1.06	57.1100	0.7834	0.7580
9.09053	0.72	57.1174	0.8472	0.8572

ตารางที่ 3.50 แสดงผลการคำนวณค่า  $Q$  จากชุดข้อมูลชุดที่ 5 โดยโปรแกรม TUNE9DX.CPP

$f_0$ (GHz)	$Q$	$\xi$
9.08684	5795.2	2751.3

รูป 3.42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า  $\rho$  และ  $\rho(\text{least})$



การทดลองที่ 23 การทดลองวัดค่า  $Q$  ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นแก้วกราไฟต์

สารตัวอย่าง แผ่นแก้วกราไฟต์

วัน - เวลาที่ทำการทดลอง 9 พฤศจิกายน 2539

เวลา 13.00 น.

ผลการทดลอง

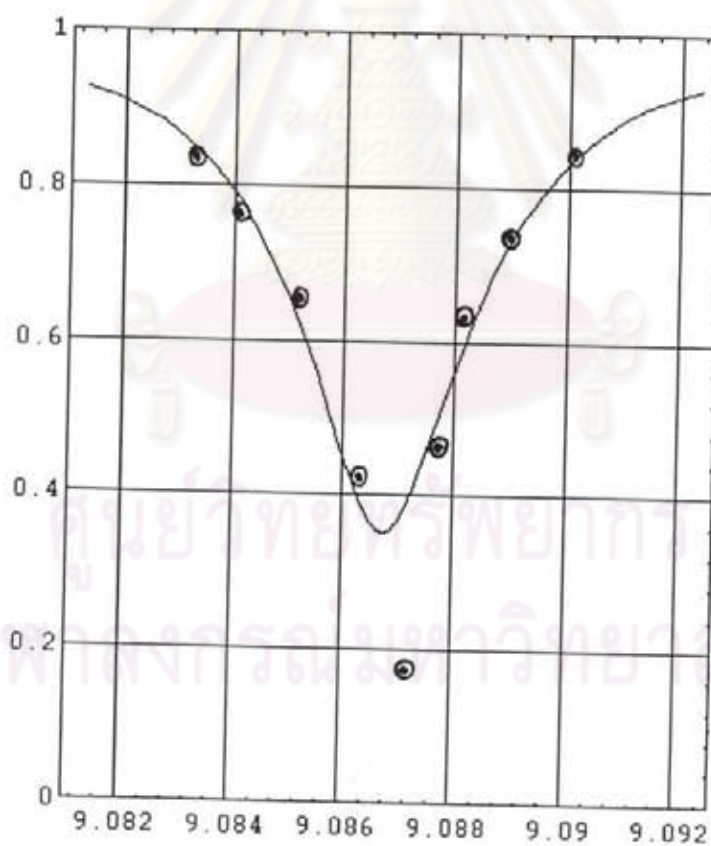
ตารางที่ 3.51 แสดงผลการวัดชุดข้อมูล ( $f$ , dB) ชุดที่ 6 เพื่อคำนวณค่า  $Q$  ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นแก้วกราไฟต์

$f$ (GHz)	dB	$\omega$ ( $s^{-1}$ )	$\rho$	$\rho$ (least)
9.08325	0.70	57.0717	0.8511	0.8495
9.08408	1.11	57.0769	0.7744	0.7809
9.08514	1.78	57.0836	0.6637	0.6282
9.08625	3.78	57.0905	0.4187	0.3972
9.08719	7.71	57.0965	0.1694	0.3950
9.08770	3.28	57.0997	0.4698	0.5002
9.08818	2.00	57.1027	0.6309	0.6026
9.08895	1.30	57.1075	0.7413	0.7306
9.09029	0.70	57.1159	0.8511	0.8550

ตารางที่ 3.52 แสดงผลการคำนวณค่า  $Q$  จากชุดข้อมูลชุดที่ 6 โดยโปรแกรม TUNE9DX.CPP

$f_0$ (GHz)	$Q$	$\xi$
9.08673	5913.1	2834.8

รูป 3.43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า  $\rho$  และ  $\rho(\text{least})$





การทดลองที่ 24 การทดลองวัดค่า  $Q$  ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นแก้วกราไฟต์

สารตัวอย่าง แผ่นแก้วกราไฟต์

วัน - เวลาที่ทำการทดลอง 10 พฤศจิกายน 2539

เวลา 13.00 น.

ผลการทดลอง

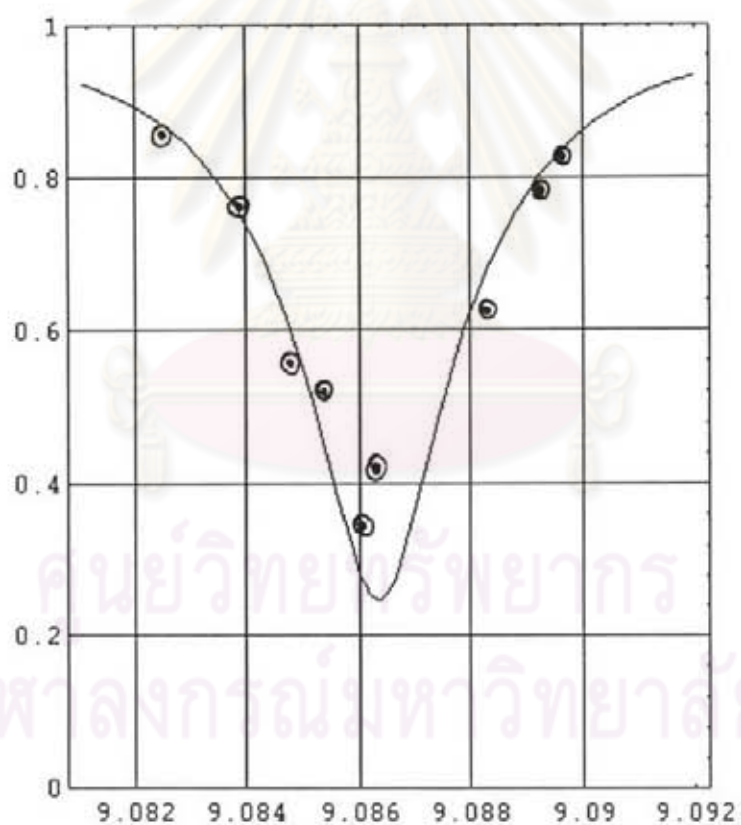
ตารางที่ 3.53 แสดงผลการวัดชุดข้อมูล ( $f$ , dB) ชุดที่ 7 เพื่อคำนวณค่า  $Q$  ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นแก้วกราไฟต์

$f$ (GHz)	dB	$\omega$ ( $s^{-1}$ )	$\rho$	$\rho$ (least)
9.08257	0.60	57.0674	0.8709	0.8674
9.08397	1.15	57.0762	0.7673	0.7442
9.08472	2.52	57.0809	0.5597	0.6173
9.08522	2.68	57.0842	0.5395	0.4974
9.08604	4.35	57.0892	0.3672	0.2794
9.08623	3.73	57.0904	0.4236	0.2526
9.08825	2.04	57.1031	0.6251	0.6726
9.08927	1.00	57.1095	0.7943	0.8062
9.08960	0.82	57.1116	0.8279	0.8339

ตารางที่ 3.54 แสดงผลการคำนวณค่า  $Q$  จากชุดข้อมูลชุดที่ 7 โดยโปรแกรม TUNE9DX.CPP

$f_0$ (GHz)	$Q$	$\xi$
9.08634	5351.9	3224.5

รูป 3.44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า  $p$  และ  $p(\text{least})$



การทดลองที่ 25 การทดลองวัดค่า Q ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นแก้วกราไฟต์

สารตัวอย่าง แผ่นแก้วกราไฟต์

วัน - เวลาที่ทำการทดลอง 11 พฤศจิกายน 2539

เวลา 21.30 น.

ผลการทดลอง

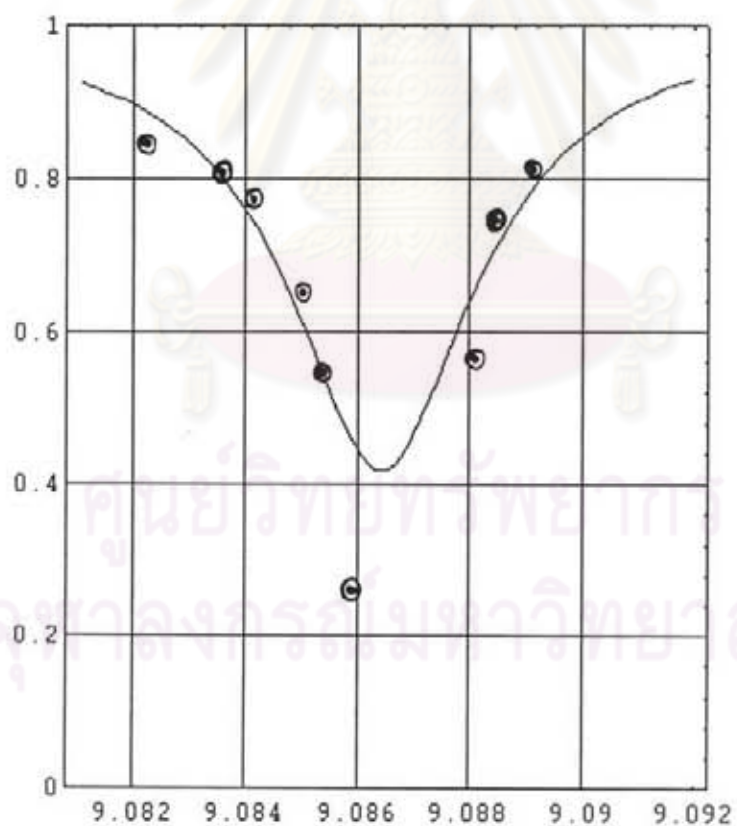
ตารางที่ 3.55 แสดงผลการวัดชุดข้อมูล ( $f$ , dB) ชุดที่ 8 เพื่อคำนวณค่า Q ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นแก้วกราไฟต์

$f$ (GHz)	dB	$\omega$ ( $s^{-1}$ )	$\rho$	$\rho$ (least)
9.08278	0.73	57.0687	0.8452	0.8595
9.08355	0.90	57.0736	0.8128	0.8049
9.08418	1.10	57.0775	0.7762	0.7394
9.08502	1.81	57.0828	0.6591	0.6131
9.08538	2.56	57.0851	0.5546	0.5476
9.08596	5.78	57.0887	0.2642	0.4506
9.08804	2.42	57.1018	0.5727	0.6462
9.08857	1.22	57.1051	0.7550	0.7247
9.08948	0.90	57.1189	0.8128	0.8185

ตารางที่ 3.56 แสดงผลการคำนวณค่า  $Q$  จากชุดข้อมูลชุดที่ 8 โดยโปรแกรม TUNE9DX.CPP

$f_0$ (GHz)	$Q$	$\xi$
9.08643	6275.3	2579.9

รูป 3.45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า  $\rho$  และ  $\rho(\text{least})$



จากการทดลองทั้ง 8 การทดลองสามารถหาค่าเฉลี่ยของค่า  $Q$  และส่วนเบี่ยงเบนได้  
ดังนี้

ตารางที่ 3.57 แสดงค่าความถี่สั่นพ้อง ค่า  $Q$  ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนของค่า  $Q$   
ของแผ่นแก้วกราไฟต์

$f_0$ (GHz)	$Q$	$\xi$	$ Q-\bar{Q} $	%
9.08641	5625.6	2901.8	121.8	2.2
9.08664	5871.2	2496.1	123.8	2.1
9.08644	5235.8	2621.3	551.6	10.5
9.08628	5911.2	2336.9	163.8	2.8
9.08684	5795.2	2751.3	47.8	0.8
9.08673	5913.1	2834.8	165.7	2.8
9.08634	5351.9	3224.5	365.5	6.8
9.08643	6275.3	2579.9	527.9	8.4
ค่าเฉลี่ย	5747.4	2718.3	258.5	4.5

3. การคำนวณค่าสภาพนำไฟฟ้าของแผ่นแก้วกราไฟต์ ทำได้ในลักษณะเดียวกับการ  
หาค่าสภาพนำไฟฟ้าของแผ่นกราไฟต์บริสุทธิ์ ซึ่งได้ผลการคำนวณดังนี้

ตาราง 3.58 แสดงการคำนวณค่าสภาพนำไฟฟ้าของแผ่นแก้วกราไฟต์

$f_0$ (GHz)	Q	$\sigma$ ( $\Omega\text{-m}$ ) <sup>-1</sup>
9.08888	5747.4	$4.58 \times 10^4$



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย