



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

023103

-8.ค. 2532

ปริญญาโท ประจำปีการศึกษา 2531

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เตาอบไมโครเวฟ

ผู้จัดทำ

1. นาย คีรีศักดิ์ เจริญด้วยศิริ
2. นาย สราวุธ กิจศิริ



## เตาอบไมโครเวฟ

ศิริศักดิ์ เจริญด้วยศิริ

สราวุธ กิจศิริ

อ. สมผล โกศลย์วิตร์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2531

### บทคัดย่อ

ปริณญาณิพนธ์ฉบับนี้เรียบเรียงขึ้นมาเพื่อเสนอผลงานวิจัยเกี่ยวกับเตาอบไมโครเวฟ โดยจะทำการออกแบบควาวิตี้ (CAVITY) และออกแบบเครื่องมือวัดที่จำเป็นในการวัดคุณสมบัติของเตาอบไมโครเวฟ โดยทำการสร้างสล็อตไลน์เพื่อวัดค่า แสตนด์แควเรจ (SWR) ซึ่งใช้พิจารณาว่าควาวิตี้ที่ออกแบบมาแมตช์ (MATCH) กับแหล่งกำเนิดเพียงใด ถ้าค่าแสตนด์แควเรจ มีค่าประมาณ 1 แสดงว่าควาวิตี้ที่ออกแบบมาแมตช์กับแหล่งกำเนิด แต่ถ้ามากกว่า 1 มากๆ แล้วแสดงว่าควาวิตี้ไม่แมตช์กับแหล่งกำเนิด ดังนั้นจึงมีคลื่นสะท้อนมายังแหล่งกำเนิด ซึ่งอาจเป็นผลทำให้แหล่งกำเนิดคลื่น (หลอดแมกนีตรอน) เสียหายได้ และทำให้ประสิทธิภาพของเตาอบไมโครเวฟต่ำ เนื่องจากไม่สามารถส่งพลังงานไปให้ควาวิตี้หมด , สร้างไดเรคชันแนล คัปเปิลเลอร์ เพื่อวัดพลังงานที่หลอดแมกนีตรอนส่งมา การวัดพลังงานโดยการคัปปลิงสัญญาณมาประมาณ -27 dB, สร้าง สกรู จูนเนอร์ เพื่อช่วยปรับการแมตช์ซึ่งของเตาอบไมโครเวฟ , สร้างตัวมี โหลด มาเทอร์มิเนตที่ปลายด้านหนึ่งของท่อรองของไดเรคชันแนล คัปเปิลเลอร์ เพื่อดูดซับพลังงานของคลื่นที่เข้ามา

## MICROWAVE OVEN

Sirisak charoenduysiri

Sarawut kitsiri

Sompol Gosallwit Advisor

1988

### Abstract

This thesis is the research in microwave oven , consists of microwave oven design and the equipment that use in measure the property of microwave oven. To measure the oven, Slotted line is used to measure the Standing Wave Ratio ( SWR ) of the designed cavity.

If SWR is about 1, cavity and system are almost perfectly matched. But if SWR has value more than 1 so much ,It shows that the cavity and system are mismatched. This can damage magnetron tube because of reflected wave from the cavity and cause the microwave oven has low efficiency.

## สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎี	2
2.1 ท่อนำคลื่น (Wave Guide)	2
2.2 ไดเรคชันแนล คัปเปิลเลอร์ (Directional Coupler)	9
2.3 สล็อตไลน์ (Slotted Line)	12
2.4 คลื่นนิ่ง (Standing Wave)	13
2.5 สตัมป์ จูนเนอร์ (Stub Tunner)	18
2.6 การเชื่อมต่อท่อนำคลื่น (Flange)	19
2.7 คาวิตี (Cavity)	20
2.8 เทอร์มิเนเตอร์ (Terminator)	29
2.9 หลอดแมกนีตรอน (Magnetron Tube)	31
บทที่ 3 การคำนวณและการสร้าง	39
3.1 การสร้างท่อนำคลื่น	39
3.2 การสร้างไดเรคชันแนล คัปเปิลเลอร์	40
3.3 การสร้างสล็อตไลน์	43
3.4 การสร้างคาวิตี	44
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	46
4.1 การวัด คัตออฟเฟรควเอนซี ของท่อนำคลื่น	46
4.2 การวัดพลังงานสะท้อนกลับที่ เพอร์เวอร์ต่ำ	46
4.3 การวัดค่าต่าง ๆ ที่ เพอร์เวอร์สูง	47
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	51
ภาคผนวก	
กิตติกรรมประกาศ	
หนังสืออ้างอิง	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

ในปัจจุบันนี้เตาอบไมโครเวฟมีบทบาทอย่างมากในการประกอบอาหาร ตลอดจนการประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งส่วนประกอบสำคัญของเตาอบไมโครเวฟจะประกอบด้วย คาวิตี (Cavity), ท่อนำคลื่น, หลอดแมกนีตรอน, แหล่งจ่ายไฟ และ ส่วนประกอบอื่นๆ เป็นต้น โครงงานของปริญญาโทฉบับนี้ จะทำการศึกษาการออกแบบระบบเตาอบไมโครเวฟ โดยจะออกแบบเครื่องมือวัดที่จะใช้เป็นอุปกรณ์วัด เช่น วัดค่าแอสแตตติ้งเวฟเรโซของระบบเพื่อที่จะได้ตัดสินใจได้ว่าระบบนี้เหมาะสมเพียงใด ถ้าไม่เหมาะสมแล้วจะทำการแก้ไขได้อย่างไร เพื่อให้ระบบเหมาะสมที่สุด การตัดสินใจว่าระบบนี้เหมาะสมหรือไม่สามารถทำได้โดยจะทำการวัดค่าแอสแตตติ้งเวฟเรโซ โดยใช้สลอตไลน์ (Slotted Line) ช่วยในการวัด โดยที่สลอตไลน์ จะมีไพโรดีเทคเตอร์ที่เคลื่อนที่ได้ (Traveling Detector) เป็นตัววัดพลังงานในแต่ละจุด แล้วนำค่าที่ได้มาใช้คำนวณหาค่า แอสแตตติ้งเวฟเรโซ ส่วนการวัดพลังงานที่ออกมาจากหลอดแมกนีตรอน โดยจะใช้ไดเรคชันนัลคัปเปิลเลอร์ เป็นตัวคัปปลิงพลังงานบางส่วนออกมา ซึ่งจะใช้ค่าคัปปลิงแฟคเตอร์ (Coupling Factor) เป็นตัวบอกอัตราส่วนของพลังงานที่ออกกับพลังงานที่เข้ามา ดังนั้นเมื่อเทียบอัตราส่วนกลับก็จะหาพลังงานที่คลื่นส่งออกมาได้ และได้ออกแบบคาวิตี เพื่อใช้ในการทดลองวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบเตาอบไมโครเวฟ ว่ามีคุณสมบัติอย่างไร นอกจากนั้นได้สร้างดัมมี่ โหลดมาเทอร์มิเนตที่ปลายด้านหนึ่งของท่อรองของไดเรคชันนัล คัปเปิลเลอร์

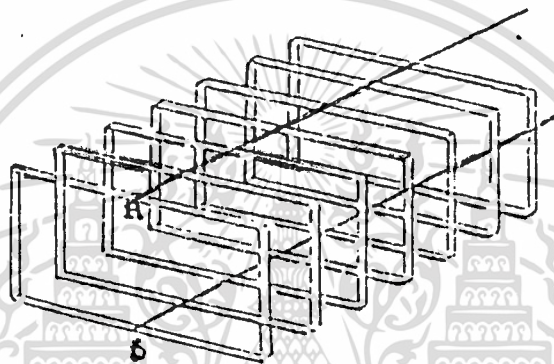
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎี

### 2.1 ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม

2.1.1 ความหมายของท่อนำคลื่น จะหมายถึง โลหะตัวนำที่มีลักษณะแกลวงซึ่งจะนำมาใช้งานย่านความถี่สูงๆ แทนสายแแกนร่วม เนื่องจากจะมีค่าการสูญเสียน้อยกว่าในสายแแกนร่วม โดยในทางปฏิบัติแล้วท่อนำคลื่นจะมีได้หลายรูปแบบ แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม (RECTANGULAR WAVEGUIDE)

#### 2.1.2 การพัฒนาท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมจากสายส่งแบบคู่ขนาน



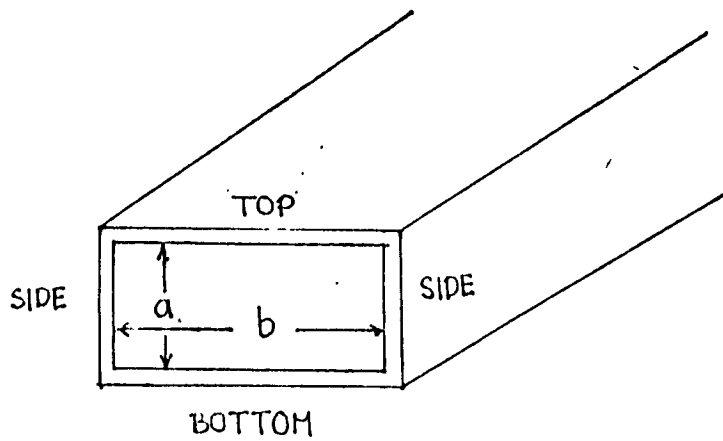
รูปที่ 1 แสดงการพัฒนาท่อนำคลื่น

จากรูป พิจารณาเฉพาะสายส่งชนิดคู่ขนาน เมื่อป้อนสัญญาณความถี่วิทยุระหว่างจุด A และจุด B จะทำให้เกิดค่าสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้าขึ้นบนสายคู่ขนาน ซึ่งจะก่อให้เกิดเป็นการสูญเสียเนื่องจากการกระจายของคลื่น ถ้าเรานำเอาควอเตอร์เวฟ สตัมป์ แบบปิดปลายสาย 2 ชุดมาต่อทั้งด้านซ้ายและด้านขวาของสายส่งชนิดคู่ขนาน จะทำให้จุดต่อมีค่าอิมพีแดนซ์สูงขึ้น ซึ่งจะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสายส่งชนิดคู่ขนาน เมื่อนำเอาควอเตอร์เวฟ สตัมป์ จำนวนมากๆ มาต่อเข้ากับสายส่งชนิดคู่ขนานก็จะดูเหมือนเป็นท่อนำคลื่น จะทำให้การสูญเสียเนื่องจากการแผ่กระจายของคลื่นที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าสายส่งแบบคู่ขนาน

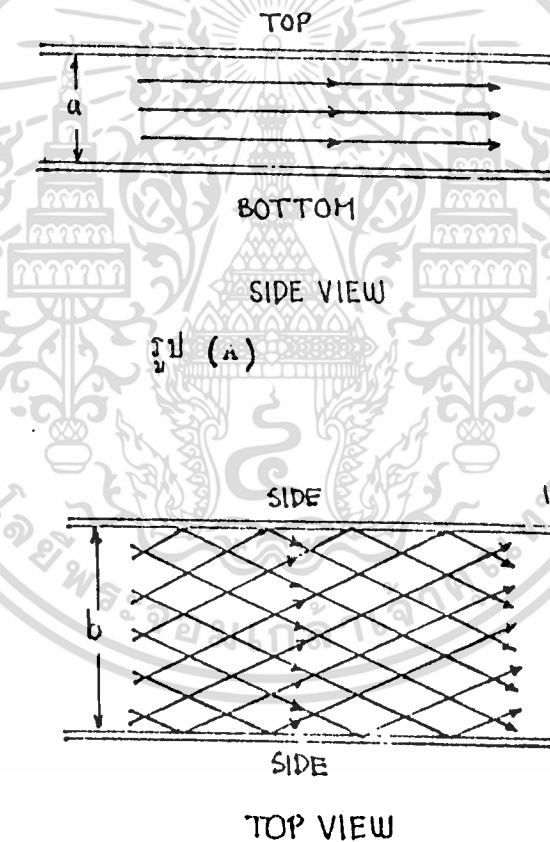
#### 2.1.3. การเดินทางของคลื่นในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม

##### ก. ขนาดของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม จะถูกกำหนดโดยขนาดภายในในตัวนำดังแสดงในรูปที่ 2



รูป 2 แสดงขนาดของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม  
 จากรูปจะเห็นว่า ใช้ a แทนความสูง และ b แทนความกว้าง  
 ข. ทิศทางการเดินของคลื่น จะเป็นดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม

รูป A เมื่อมองด้านข้างจะเห็นคลื่นเดินทางขนานกับผนังบน และล่างของท่อนำคลื่น

รูป B เมื่อมองจากทางด้านบน ทางเดินของคลื่นทุกเส้นทางจะทำมุมกับผนังด้านข้าง

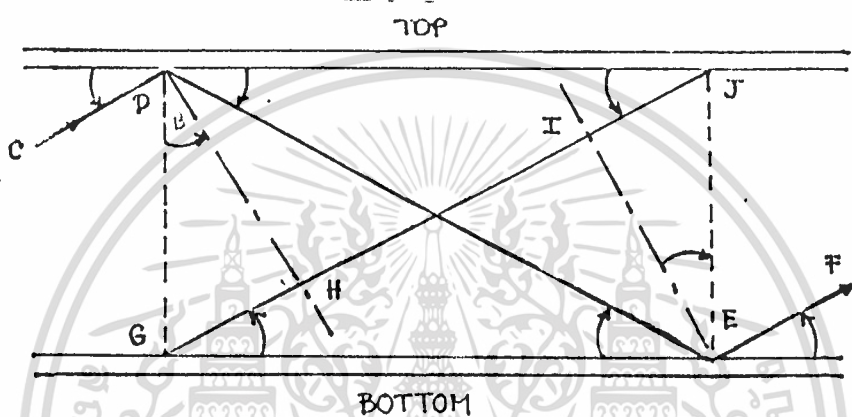
ด้วยมุม B เท่ากัน

ค. การกำหนดขนาดของมุม B

ค่ามุม B จะขึ้นอยู่กับความกว้างของท่อนำคลื่น และความยาวคลื่น ความสัมพันธ์โดยเขียนได้เป็น

$$\sin B = \lambda / 2b$$

ซึ่งสมการนี้จะเป็นจริง ก็ต่อเมื่อสัญญาณที่เคลื่อนที่ไปในท่อนำคลื่น จะต้องเสริมกันและกัน และสมการนี้หาได้จากรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงการกำหนดค่าของมุม B

สมมติสัญญาณผ่านจุด C เคลื่อนไปทางขวาผ่านจุด D และจุด E เคลื่อนไปในทิศทาง EF ซึ่งขนานกับทิศ CD โดย DH จะตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่เสมอ (CD) และเฟสของสัญญาณ ณ จุดใดๆ บนหน้าคลื่นจะมีค่าเท่ากันด้วย ดังนั้น สัญญาณที่กำลังเคลื่อนที่ไปทางซ้ายผ่านจุด H ก็จะมีเฟสตรงกับสัญญาณที่กระจาย ณ จุด D และทำนองเดียวกัน สัญญาณสะท้อน ณ จุด E ก็จะมีเฟสตรงกับสัญญาณที่กำลังเคลื่อนที่ไปทางด้านซ้ายผ่านจุด I เพราะว่า เป็นสัญญาณบนหน้าคลื่นเดียวกันกับที่ตั้งฉากกับ EF มิฉะนั้นแล้วสัญญาณก็คงหักล้างกันหมด

เมื่อต้องการให้เกิดความสัมพันธ์ด้านเฟสขึ้น มุม B จะต้องมามีค่าซึ่งก่อให้เกิดทางเดิน DE เป็นเลขจำนวนเต็มของความยาวคลื่น ซึ่งยาวกว่าทางเดิน HI

$$GJ = DE$$

ต้องการให้สัญญาณเคลื่อนที่ ผลต่างของ HI และ GJ จะต้องเป็นเลขจำนวนเต็มของความยาวคลื่น จากรูปที่ 4 จะได้

$$GJ - HI = GH + IJ$$

แต่ 
$$GH = IJ = b \sin B$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ  $2b \sin B$  เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sin \theta = n \lambda / 2b \quad ; \quad n = 1, 2, \dots$$

กรณีง่ายที่สุดให้  $n=1$

$$\sin \theta = \lambda / 2b$$

นั่นคือ ท่อนำคลื่นจะนำพลังงานผ่านไปได้เมื่อมีมุม  $\theta$  ที่เหมาะสม

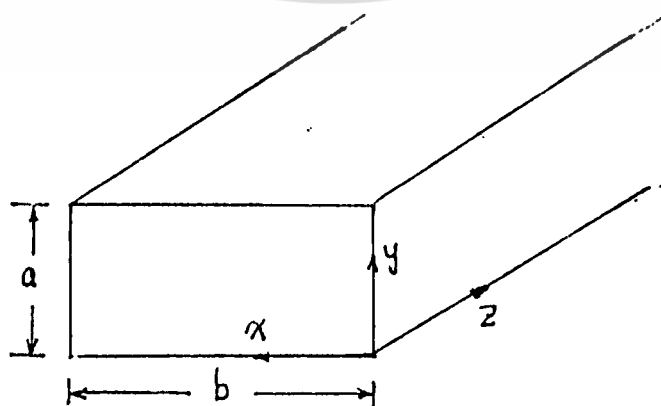
#### 2.1.4 โหมดการทำงานของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม

การเคลื่อนที่ของคลื่นในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมนี้สามารถกระทำได้หลายโหมด เช่น "ทรานสเวอร์ส อิเล็กตริก โหมด" (Transverse Electric Mode: TE MODE) หมายถึง เกิดสนามไฟฟ้าในแนวขวาง (Transverse) กับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นโดยจะไม่เกิดสนามไฟฟ้าตามแนวนอน (longitudinal) หรือในแนวการเคลื่อนที่ แต่จะเกิดสนามแม่เหล็กตามแนวนอน ส่วนอีกโหมดหนึ่งนั้นเรียกว่า "ทรานสเวอร์ส แมกเนติก โหมด" (Transverse Magnetic Mode: TM MODE) ซึ่งจะตรงข้ามกับ ทรานสเวอร์ส อิเล็กตริก โหมด แต่ละโหมดก็จะมีค่าคัตออฟเวฟเลนจ์ (Cut Off Wavelength), คัตออฟฟริควเอนซี (Cut Off Frequency), ความเร็วของเฟสและกรุป (Phase Velocity and Group Velocity) และการเปลี่ยนแปลงของครึ่งคลื่นจะกำหนดด้วยค่า  $m$  และ  $n$  ห้อยท้าย

เมื่อ  $m$  : จำนวนการเปลี่ยนแปลงของครึ่งคลื่นในด้านกว้าง แทนด้วยจำนวนเต็ม

$n$  : จำนวนการเปลี่ยนแปลงของครึ่งคลื่นในด้านสูง แทนด้วยจำนวนเต็ม

ขนาดของสนาม (Field Strength) และพารามิเตอร์ (Parameter) อื่นๆ จะสามารถหาได้จากสมการของแมกซ์เวลล์พร้อมกับเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ที่กำหนดที่เหมาะสมกับโหมดนั้นๆ โดยใช้ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมดังรูป



รูปที่ 5 แสดงระบบโคออร์ดิเนต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณจะพบว่า มีโหมดจำนวนมาก แต่จะสนใจเฉพาะโดมิแนนท์ โหมด (Dominant Mode) ซึ่งจะมีค่าคutoff frequency ที่ต่ำสุด คือ  $TE_{1,0}$  ซึ่งจะหมายถึงมีสนามไฟฟ้าในแนวแกน Y โดยเลข 1 หมายถึง มีการเปลี่ยนแปลงของคลื่นในแนวแกน X ส่วนเลข 0 หมายถึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงของคลื่นในแนวแกน Y  $TE_{1,0}$  มีคุณสมบัติที่น่าสนใจคือ

- 1) คutoff frequency ที่ต่ำสุด และยิ่งขึ้นกับความกว้างอย่างเดียว
- 2) เกิดโพลาไรซ์เฉพาะแนวตั้ง (Vertical Polarization) เท่านั้น
- 3) ค่าคอปเปอร์ลอส (Copper Loss) น้อยกว่าโหมดอื่นๆ

ผลลัพธ์เกี่ยวกับสนาม และพารามิเตอร์อื่นๆ ที่ได้จากการแก้สมการของแมกซ์เวลล์มี ดังนี้คือ

$$\begin{aligned}
 E_y &= E_0 \sin \pi x/b \\
 H_x &= (-E_0 / Z_{TE}) \sin \pi x/b \\
 H_z &= j (E_0 / \eta) (\lambda/2b) \cos \pi x/b \\
 H_y &= 0 = E_x \\
 Z_{TE} &= \eta / \sqrt{1 - (\lambda/2b)^2} \\
 v_p &= 1 / (\sqrt{\mu\epsilon} \sqrt{1 - (\lambda/2b)^2}) \\
 v_g &= (1 / \sqrt{\mu\epsilon}) \sqrt{1 - (\lambda/2b)^2} \\
 \lambda_c &= 2b \\
 f_c &= 1 / 2b \\
 \lambda_g &= \lambda / \sqrt{1 - (\lambda/\lambda_c)^2}
 \end{aligned}$$

ค่าการสูญเสียเนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของไดอิเล็กตริก

$$\alpha_d = G\eta / 2\sqrt{1 - (f_c/f)^2} = (k''/E') / 2\sqrt{1 - (f_c/f)^2}$$

ค่าการสูญเสียเนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของคอนดักเตอร์

$$\alpha_c = R_s / \eta \sqrt{1 - (f_c/f)^2} = [1 + (2a/b)(f_c/f)^2]$$

$Z_{TE}$  = เวฟ อิมพีแดนซ์ (WAVE IMPEDANCE) ของคลื่นทรานสเวอร์สอิเล็กตริก

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

$$\eta = 377 \ \Omega$$

$R_s$  = ความต้านทานที่พื้นผิว (SURFACE RESISTIVITY) ( $\Omega/\text{square}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\delta$  = ค่าไดอิเล็กตริก ลอส แทนเจนต์ (DIELECTRIC LOSS TANGENT)

$\delta_s$  = ค่าความลึกผิว (SKIN DEPTH) (m)

G = คอนดักแตนซ์ (CONDUCTANCE)

$\sigma$  = คอนดักติวิตี (CONDUCTIVITY)

### 2.1.5 ความยาวคลื่นคัตออฟของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม

จาก  $\sin B = \lambda_c / 2b$

ซึ่งจะทำให้รูปคลื่นแบบง่ายที่สุดที่สามารถนำพลังงานไปในท่อนำคลื่นได้ จากสมการ ถ้ากำหนดให้  $B=90$  องศา จะได้  $\lambda_c = 2b$ ,  $B=90$  องศา แสดงว่าคลื่นสองชุดเดินทางไปมา ระหว่างด้านข้างของท่อนำคลื่น ดังนั้นคลื่นก็จะไม่สามารถเดินทางผ่านท่อนำคลื่นไปได้ หรือถ้า ความยาวคลื่นมีค่ามากกว่า  $2b$  จะทำให้  $\sin B$  มีค่ามากกว่า 1 ซึ่งจะเป็นไปไม่ได้ ดังนั้น คลื่นจะไม่สามารถเดินทางผ่านท่อนำคลื่นได้เช่นกัน

ค่าความยาวคลื่นที่  $B = 90$  องศา เรียกว่า คัตออฟเวฟเลนธ์ ( $\lambda_c$ ) ซึ่ง  $\lambda_c = 2b$  ดังนั้นถ้าต้องการส่งพลังงานผ่านท่อนำคลื่นจะต้องให้  $\lambda < \lambda_c$  จึงจะส่งพลังงานไปได้

ค่าคัตออฟเวฟเลนธ์ หาได้จากสมการ

$$\lambda_c = 2b/m$$

m = จำนวน half wavelength ของสนามด้าน b

### 2.1.6 ความยาวคลื่นภายในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม

นอกจากค่า  $\lambda_c$  แล้วยังมีค่า  $\lambda_g$  ซึ่ง  $\lambda_g$  จะหมายถึงความยาวคลื่นของแพทเทิร์น ในท่อนำคลื่น โดย  $\lambda_g$  หาได้จากรูปที่ 6





ซึ่ง ความลึกพื้นผิวของสายส่งจะน้อยกว่าได้

$$\delta = (1/2\pi) \sqrt{6.4 \times 10^{-8} / 2.45} = 2.57 \times 10^{-4} \text{ cm}$$

ข. การสูญเสียเนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของไดอิเล็กตริก

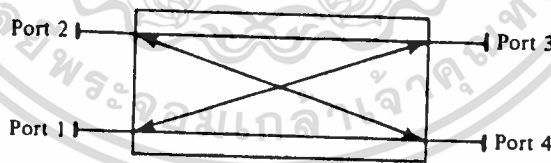
ค. การสูญเสียเนื่องจากความไม่เหมาะสมของสายส่งและจากการเรดิเอชัน

เกิดจากโหนดที่มาต่อกับสายส่งกำลัง (Transmission Line) นั้น มีค่าอิมพีแดนซ์ไม่เท่ากับแคแรคเตอร์ิสติกอิมพีแดนซ์ของสายส่ง หรือเกิดจากความไม่ต่อเนื่องบนสายส่ง ส่วนเรดิเอชันแอลส (Radiation Loss) นั้นจะเหมือนการส่งคลื่นที่ความถี่สูงๆ โดยสายส่งจะเหมือนกับสายอากาศ

ง. การสูญเสียเนื่องจากสาเหตุอื่น

### 2.2 ไดรেকชันแนล คัปเปิลอร์ (DIRECTIONAL COUPLER)

ในบางครั้งที่เราต้องการวัดพลังงานจากท่อนำคลื่นที่ส่งไปยังโหนดเพื่อดูว่าสภาพของแหล่งกำเนิดนั้นเป็นอย่างไร กำลังทำงานอยู่หรือไม่ หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรนั้น เราจำเป็นต้องคัปปลิงพลังงานส่วนหนึ่งออกไปยังเครื่องมือวัด อุปกรณ์ที่ใช้คัปปลิงพลังงานส่วนหนึ่งก็คือ ไดเรกชันแนล คัปเปิลอร์ ซึ่งประกอบด้วยท่อหลัก (MAIN GUIDE) และท่อรอง (AUXILLARY GUIDE) โดยมีพอร์ท (PORT) ทั้งหมด 4 พอร์ทดังรูป 7



รูปที่ 7 แสดงพอร์ทของไดเรกชันแนล คัปเปิลอร์

คุณสมบัติของแต่ละพอร์ท

1. เมื่อคลื่นเดินทางสู่พอร์ทที่ 1 แล้วเดินทางสู่พอร์ทที่ 4 โดยจะมีการคัปปลิงผ่านพอร์ทที่ 3 แต่จะไม่มีคลื่นเดินทางออกจากพอร์ทที่ 2
2. เมื่อคลื่นเดินทางจากพอร์ทที่ 4 ก็จะออกพอร์ทที่ 1 และคัปปลิงสู่พอร์ทที่ 2 แต่จะไม่มีการคัปปลิงสู่พอร์ทที่ 3
3. เช่นเดียวกันถ้าคลื่นเดินทางสู่พอร์ทที่ 2 จะเดินทางสู่พอร์ทที่ 3 และคัปปลิงสู่พอร์ทที่ 4 และถ้าเดินทางสู่พอร์ทที่ 3 ก็จะออกพอร์ทที่ 2 และคัปปลิงสู่พอร์ทที่ 1

เอกสารนี้ออกสารนี้ไว้เพื่อช่วยในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## พารามิเตอร์ของไดเร็คชั่นแนล คัปเปิลเลอร์

1. คัปปลิ่ง แฟ็คเตอร์ (coupling factor) เป็นค่าที่บอกถึงอัตราส่วนระหว่างพลังงานที่เข้ามากับพลังงานที่คัปปลิ่งได้ มีสูตรคือ

$$\text{คัปปลิ่ง แฟ็คเตอร์ [dB]} = 10 \log(P_1 / P_2)$$

$P_1$  = พลังงานของคลื่นที่เดินทางสู่ไดเร็คชั่นแนล คัปเปิลเลอร์

$P_2$  = พลังงานของคลื่นที่คัปปลิ่งได้

2. ไดเร็คติวิตี (Directivity) เป็นค่าอัตราส่วนระหว่างพลังงานที่คัปปลิ่งเข้าสู่พอร์ทที่ต้องการ กับพลังงานที่คัปปลิ่งเข้าสู่พอร์ทที่ไม่ต้องการ

$$\text{ไดเร็คติวิตี (dB)} = 10 \log(P_4 / P_3)$$

$P_4$  = พลังงานของคลื่นที่เข้าสู่พอร์ทที่ไม่ต้องการ

ตัวอย่างเช่น เราให้คลื่นเดินทางสู่พอร์ทที่ 1 เดินทางออกสู่พอร์ทที่ 4 และคัปปลิ่งสู่พอร์ทที่ 3 ซึ่งจะนำไปวัด แต่ในทางปฏิบัติจะมีคลื่นคัปปลิ่งสู่พอร์ทที่ 2 ด้วย ดังนั้น

$$\text{คัปปลิ่ง แฟ็คเตอร์ [dB]} = 10 \log(P_1 / P_3)$$

$$\text{ไดเร็คติวิตี (dB)} = 10 \log(P_4 / P_2)$$

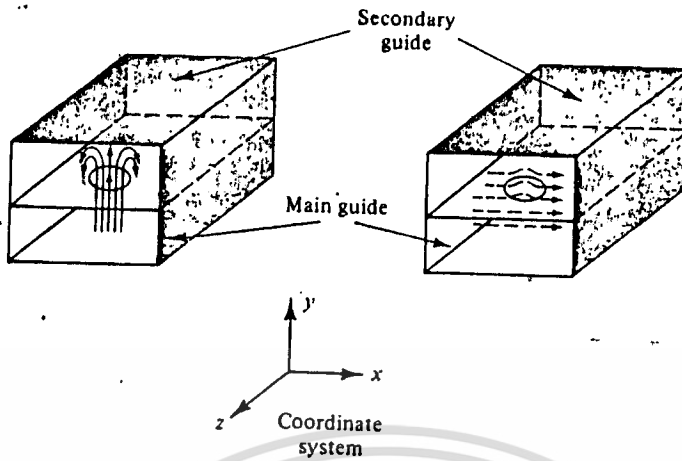
$P_1$  = พลังงานที่เข้าสู่พอร์ทที่ 1

$P_2$  = พลังงานที่เข้าสู่พอร์ทที่ 2

$P_3$  = พลังงานที่เข้าสู่พอร์ทที่ 3

สำหรับพอร์ทที่ 2 จะใส่เทอร์มิเนตโวลต์ไว้เพื่อดูดพลังงานของคลื่นให้หมดไปจะได้วัดค่าได้แม่นยำยิ่งขึ้น

โครงสร้างของส่วนที่ใช้คัปปลิ่งของ ไดเร็คชั่นแนล คัปเปิลเลอร์ นั้น จะใช้ลักษณะของอาเปอร์เจอร์กับผนังของท่อ โดยมีอยู่ 2 ลักษณะด้วยกัน คือ อิเล็กตริกคัปปลิ่ง และแมคเนติกคัปปลิ่ง โดยลักษณะฟิลด์แพทเทิร์นของ อิเล็กตริก คัปปลิ่งนั้น สนามไฟฟ้าจะตั้งฉากกับระนาบของอาเปอร์เจอร์ ( $E_y$ ) ส่วนลักษณะฟิลด์แพทเทิร์นของ แมคเนติก คัปปลิ่ง สนามแม่เหล็กจะขนานกับระนาบของอาเปอร์เจอร์ ( $H_x$ ) ดังรูป 8



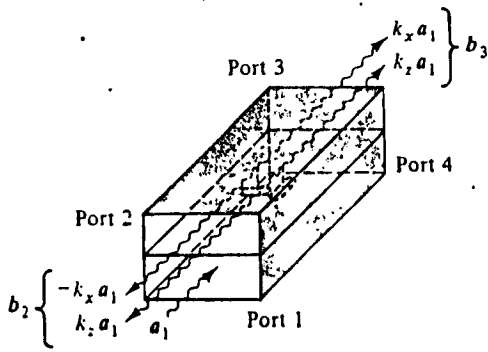
(a) Electric coupling

(b) Magnetic coupling

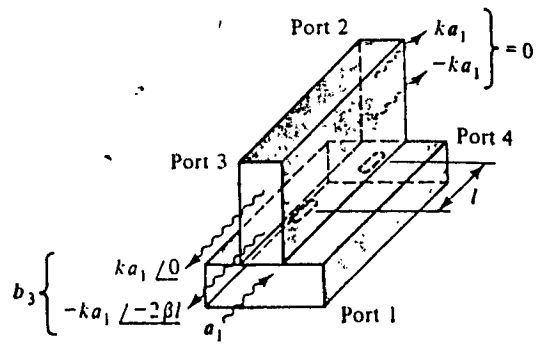
รูปที่ 8 แสดงการคัปปลิงของไดเร็คชั่นแนล คัปเปอเรอร์

โดยทั่วๆ ไปลักษณะของไดเร็คชั่นแนล คัปเปอเรอร์นั้น จะมีอยู่หลายรูปแบบด้วยกันเช่น โรเบลท-แซบ คัปเปอเรอร์ (RIBLET-SAAB COUPLER), ชวิงเกอร์ รีเวอร์ส-เฟส คัปเปอเรอร์ (SCHWINGER REVERSE-PHASE COUPLER), โมเรโน ครอส-ไกด์ คัปเปอเรอร์ (MORENO CROSS-GUIDE COUPLER) และเบท-โฮล คัปเปอเรอร์ (BETHE-HOLE COUPLER) ดังรูป 9

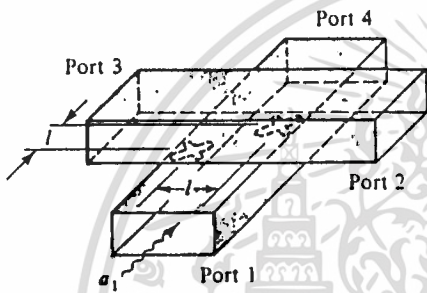
สำหรับไดเร็คชั่นแนล คัปเปอเรอร์แบบ โมเรโน ครอส-ไกด์ นั้นจะมีระยะห่างระหว่างสล๊อต (SLOT) คือค่า  $l$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\lambda_g / 4$  ตามความถี่ของคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ ซึ่งจะทำให้ค่าสนามแม่เหล็กที่สล๊อตทั้งสองนั้นมีเฟสต่างกัน สำหรับระยะทางของคลื่นที่เดินทางเข้าสู่พอร์ทที่ 2 ผ่านสล๊อตทั้งสองจะมีค่าเท่ากับ  $\lambda_g / 4$  แต่เนื่องจากว่าสนามแม่เหล็กนั้นมีเฟสต่างกันอยู่ 180 องศา ดังนั้นจะทำให้คลื่นที่พอร์ทที่ 2 เกิดการหักล้างกันจนหมด ทำให้ไม่มีพลังงานของคลื่นออกจากพอร์ทที่ 2 ส่วนระยะห่างของคลื่นที่เดินทางเข้าสู่พอร์ทที่ 3 โดยผ่านสล๊อตทั้งสองนั้นจะมีระยะต่างกันอยู่  $\lambda_g / 4$  และเนื่องจากสนามแม่เหล็กนั้นมีเฟสต่างกันอยู่แล้วเท่ากับ 180 องศา ดังนั้นก็จะทำให้เฟสของการเคลื่อนที่ผ่านสล๊อตทั้งสองต่างกันอยู่ 360 องศา จึงมีพลังงานของคลื่นออกสู่พอร์ทที่ 3



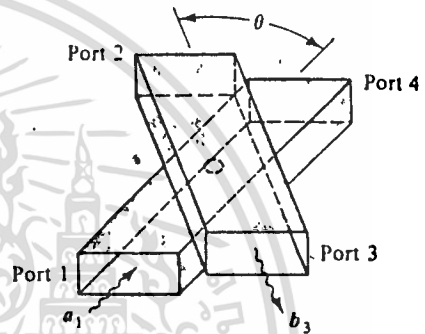
(a) Riblet-Saad coupler



(b) Schwinger reverse-phase coupler



(c) Moreno cross-guide coupler

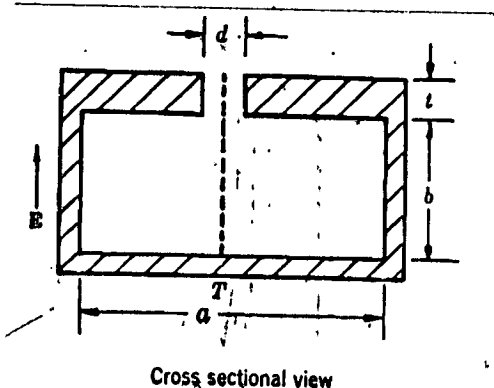


(d) Bethe-hole coupler

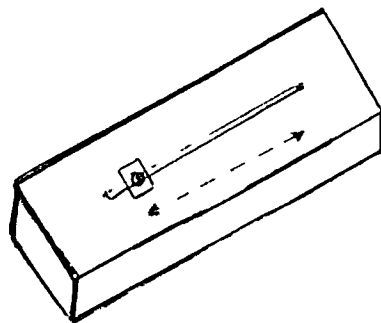
รูปที่ 9 แสดงการคัปปลิงแบบต่างๆ

### 2.3 สล็อตไลน์ (SLOTTED LINE)

เป็นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเพื่อช่วยในการวัด โวลท์เตจแอสแตนด์เวฟเรโซ (VOLTAGE STANDING WAVE RATIO : VSWR) ของระบบทิ่งในที่นี่จะใช้วัดค่าแอสแตนด์เวฟเรโซของคาวิตี (CAVITY) ว่าเหมาะสมกับระบบเพียงใด รูปร่างของสล็อตไลน์ จะมีลักษณะเป็นท่อนำคลื่นที่เจาะช่อง (slot) ตรงกลางเพื่อที่จะสามารถให้โพรบเลื่อนไปมาระหว่างช่องได้ดังรูป



Cross sectional view



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบความกว้างของช่องสลีต (d) ควรออกแบบให้มีความกว้างน้อยที่สุด เพราะถ้าให้ d กว้างเกินไปแล้วจะมีการกระจายคลื่นออกมาจากช่องสลีต จากวงจรสมมูลย์ภายในสลีต โวลท์ จะมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ ( ) ซึ่งเป็นผลมาจากการเจาะช่องสลีต ถ้ากรณี

$$T = 0 ; \Delta\lambda_g/\lambda_g \neq (\pi d^2/16ab)(\lambda_g/2a)^2 ; d/b \ll 1$$

$$T \gg d ; \Delta\lambda_g/\lambda_g = (d^2/2\pi ab)(\lambda_g/2a)^2 ; d/b \ll 1$$

การวัดสแตนด์แวลูเรโซจากสลีตไลน์นั้น จะต้องอาศัย โพรบ คัปปลิ่ง (Probe Coupling) เป็นตัวคัปปลิ่งสัญญาณจากสลีตไลน์ ซึ่งทฤษฎีเกี่ยวกับ แสตนดิ่งแวลูเรโซ จะได้ อธิบายต่อไป

#### 2.4 คลื่นนิ่ง (STANDING WAVE)

เมื่อส่งสัญญาณผ่านสายส่งที่มีความยาวไม่จำกัด สายส่งจะนำสัญญาณไปไม่มีที่สิ้นสุด หากไม่มีการสูญเสียพลังงาน แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติในสายส่งจะมีความยาวจำกัด และมีการสูญเสียพลังงานด้วย ถ้าพิจารณาความยาวของสายส่งจำกัด และไม่คำนึงถึงการสูญเสียของสัญญาณของสายส่งแล้ว จะพิจารณาได้ว่าเมื่อสัญญาณเดินทางไปถึงปลายอีกด้านหนึ่งแล้วจะเกิดอะไรขึ้นเมื่อ

ก. เปิดวงจร (OPEN CIRCUIT).

สัญญาณ เมื่อเดินทางถึงจุดปลาย จะไม่มีการสูญเสียพลังงานแต่จะมีสัญญาณสะท้อน (REFLECTED WAVE) กลับมายังแหล่งกำเนิด อินซิเดนต์ เวล (INCIDENT WAVE) รวมตัวกับสัญญาณสะท้อนกลับแล้วความแรงของสัญญาณก็จะเพิ่มขึ้น ซึ่งถ้าเครื่องส่งส่งด้วยกำลังมากแล้ว คลื่นที่สะท้อนกลับอาจจะทำให้เครื่องส่งเสียหายได้

กำหนดสมการของสายส่งที่ไม่มีมีการสูญเสียพลังงาน

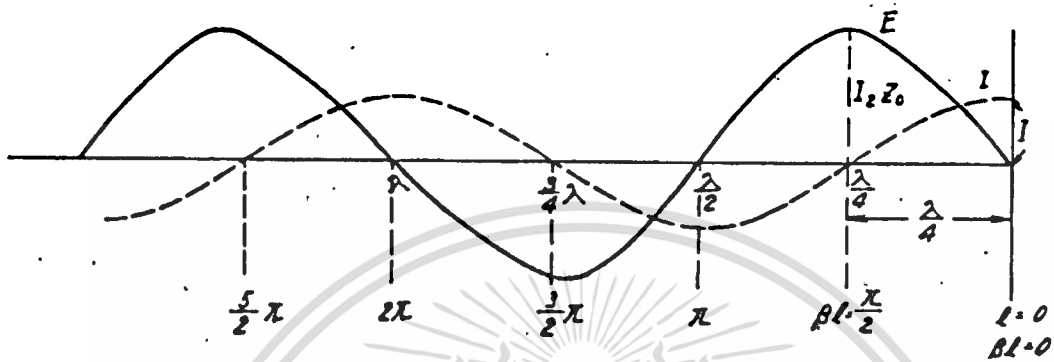
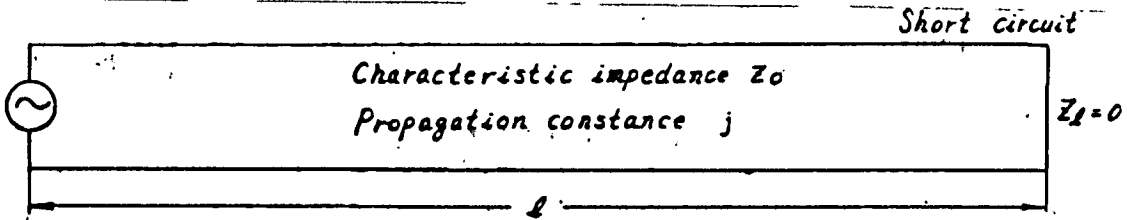
$$E = E_r \cos \beta l + j I_r Z_0 \sin \beta l$$

$$I = I_r \cos \beta l + j E_r \sin \beta l$$

เมื่อเปิดวงจร  $I_r = 0$  ดังนั้น

$$E = E_r \cos \beta l$$

$$I = j E_r \sin \beta l$$



รูปที่ 13 แสดงโวลต์เตจ และ กระแส เมื่อปิดวงจร

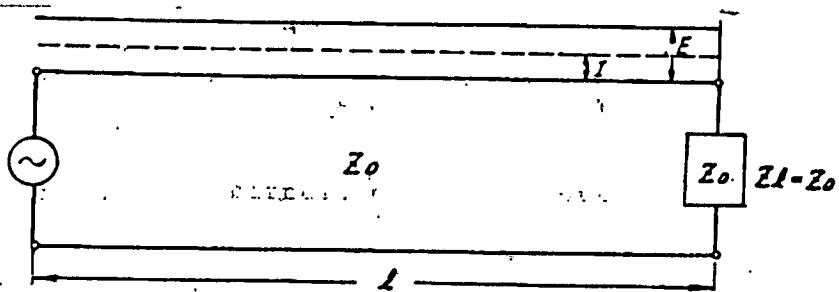
จากสมการ (3) ทุกๆจุดขนาดของ E จะแปรผกผันกับขนาดของ SIN 1

จากในรูปที่ 13 จะแสดงจุดโวลต์เตจสูงสุดและจุดโวลต์เตจต่ำสุด การเดินทางของจุดโวลต์เตจสูงสุด และจุดโวลต์เตจต่ำสุด ที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับเวลาแล้วจะเรียกแอมพลิจูด ดิสทริบิวชัน (AMPLITUDE DISTRIBUTION) ว่า แสตนด์นิ่ง เวย์ฟ (STANDING WAVE) ทำนองเดียวกันกับ เคอเร็นท์ เวย์ฟ (CURRENT WAVE)

$$\Gamma_1 = (Z_0 - Z_l) / (Z_0 + Z_l) = 1$$

ดังนั้น เคอเร็นท์ เวย์ฟ จะสะท้อนกลับมายังแหล่งกำเนิดในลักษณะที่มีเฟสเดียวกับกับคลื่นที่ส่งออก ทำให้ทางปลายด้านรับมีค่าสูงสุด และจะมีค่าเป็นศูนย์ที่จุด  $\lambda/4$  ,  $3\lambda/4$  ดังรูปที่ 13

ค.  $Z_l = Z_0$  กรณีนี้จะไม่เกิดคลื่นสะท้อนกลับ ดังนั้นขนาดของโวลต์เตจ และกระแส จะมีค่าคงที่ทุกๆจุดบนสายส่ง ดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 แสดงโวลต์เตจ และ กระแส ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดจะเป็นการสุ่มเป็นช่วงๆ ออกมา เพื่อนำค่าที่ได้มาหาค่า แสตนดิ่งเวฟเรโซ โดยที่คุณสมบัติของวงจรดีเท็คเตอร์ จะมีผลโดยตรงกับค่าที่อ่านได้จาก ดิซี แอมมิเตอร์ (DC AMPMETER) เนื่องจากไดโอด ดีเท็คเตอร์ (DIODE DETECTOR) ในย่านความถี่ไมโครเวฟ จะเป็นไปตามกฎยกกำลังสอง (SQUARE LAW) คือเอาพหุจะแปรโดยตรงกับอินพุตยกกำลังสอง

$$i = kc^2$$

$i$  = กระแสที่อ่านได้จากมิเตอร์

$c$  = โวลท์เตจบนสาย

$k$  = ค่าคงที่ของดีเท็คเตอร์ และการถ่ายกำลัง

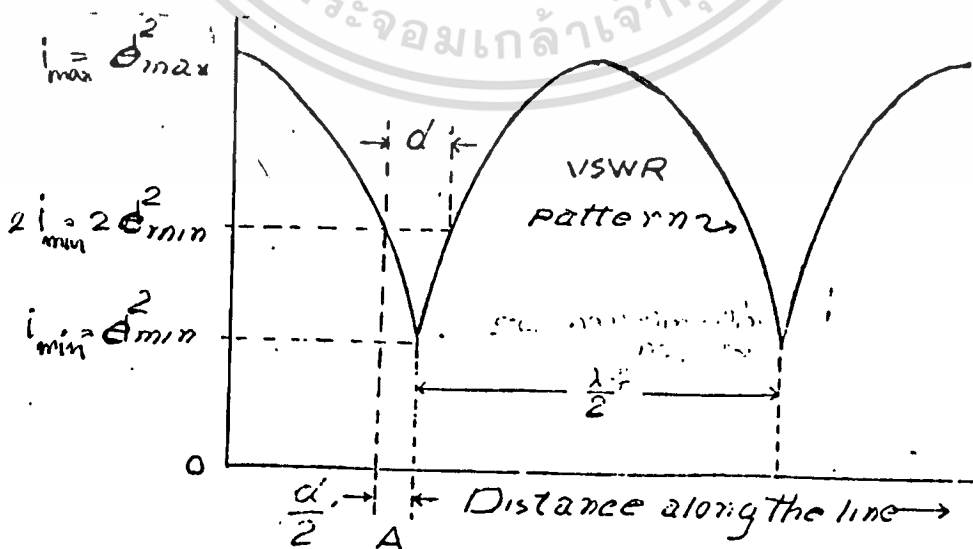
เมื่อโพรบ อยู่ที่ตำแหน่งโวลท์เตจสูงสุด ;  $i_{max} = kc^2_{max}$

เมื่อโพรบ อยู่ที่ตำแหน่งโวลท์เตจต่ำสุด ;  $i_{min} = kc^2_{min}$

ดังนั้นจะได้  $VSWR = C_{max} / C_{min} = \sqrt{i_{max} / i_{min}} \dots (1)$

วิธีนี้เป็นวิธีเบื้องต้นในการวัดค่า แสตนดิ่งเวฟเรโซ แต่ถ้าหากมีค่าสูง วิธีนี้จะไม่เหมาะสม เนื่องจากคุณสมบัติของดีเท็คเตอร์ เปลี่ยนไปและอาจเกิดความผิดเพี้ยนของรูปแบบ แสตนดิ่งเวฟ อันเนื่องจากการแห่โพรบลึกเกินไป

สำหรับการวัดแสตนดิ่งเวฟเรโซ ที่มีค่ามากกว่า 10 แล้วจะใช้วิธีการวัดที่เรียกว่า ดับเบิลมินิมัม (Double Minimum) ซึ่งเทคนิคอันนี้ จะสมมุติว่าโวลท์เตจที่เกิดขึ้นตามสาย จะถูกพล็อตด้วยกฎยกกำลังสอง ที่แสดงดังรูป 18



รูป 18 แสดงวิธีการวัดแบบ ดับเบิล มินิมัม (DOUBLE MINIMUM) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้เฉพาะในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการอธิบายได้ดังนี้

$$C = C_{\min}^2 + (C_{\max}^2 - C_{\min}^2) \sin^2 (2\pi c/\lambda) \quad \dots(2)$$

ถ้าหากว่าการวัดเริ่มวัดที่จุดต่ำสุด A เคลื่อนที่ไปทางขวาที่อ่านค่าได้เป็นสองเท่าของค่าต่ำสุดสามารถหาได้จาก

$$2C_{\min}^2 = C_{\min}^2 + C_{\max}^2 \sin^2 (\pi d/\lambda) - C_{\min}^2 \sin^2 (\pi d/\lambda) \quad \dots(3)$$

จากสมการ 3 จะได้

$$C_{\max}^2 / C_{\min}^2 = (1 + \sin^2 (\pi d/\lambda)) / \sin^2 (\pi d/\lambda) \quad \dots(4)$$

$$= (2 - \cos^2 (\pi d/\lambda)) / \sin^2 (\pi d/\lambda) \quad \dots(5)$$

สมการ (5) เป็นสมการที่ใช้วิธี ดับเบิล มินิมัม แต่ในทางปฏิบัติจริงแล้วการวัดแอสแตดิงเวฟเรโซ ทำได้โดยการวัดระยะทาง  $\lambda/2$  ระหว่างจุดต่ำสุดและระยะ d ระหว่างจุดซึ่งมิเตอร์อ่านค่าได้สองเท่าของจุดต่ำสุด ค่าแอสแตดิงเวฟเรโซ คำนวณได้จากสมการ 5

สมการ (4) กรณี แอสแตดิงเวฟเรโซ มีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 10 มม  $\pi d \approx \sin(\pi d/\lambda)$  จะมีค่าน้อย

ดังนั้นจากสมการ (4) ;  $VSWR = 1/\sin(\pi d/\lambda)$

เนื่องจากมุมเล็กมาก ;  $VSWR = \lambda/\pi d \quad \dots(6)$

ซึ่งสมการ(6) เหมาะสำหรับกรณีค่าแอสแตดิงเวฟเรโซสูงๆเท่านั้น

ถ้ากรณีที่ค่า  $C_{\max}$  และ  $C_{\min}$  มีค่าน้อยมากจนไม่สามารถใช้ ดีเทคเตอร์ และแอมมิเตอร์สำหรับอ่านค่า แสดงความแตกต่างกันได้นั้น เราก็จะได้เลือกใช้ ไดเร็ค คัปเปิลแอมพลิฟายเออร์ (Direct Coupled Amplifier) แล้ววัดเอาที่หนุ่ด้วยเทชี โวลท์มิเตอร์ ซึ่งสมการด้านบนก็ยังสามารถใช้ได้ถ้าหากเกน (Gain) ของเครื่องขยายมีค่าคงที่

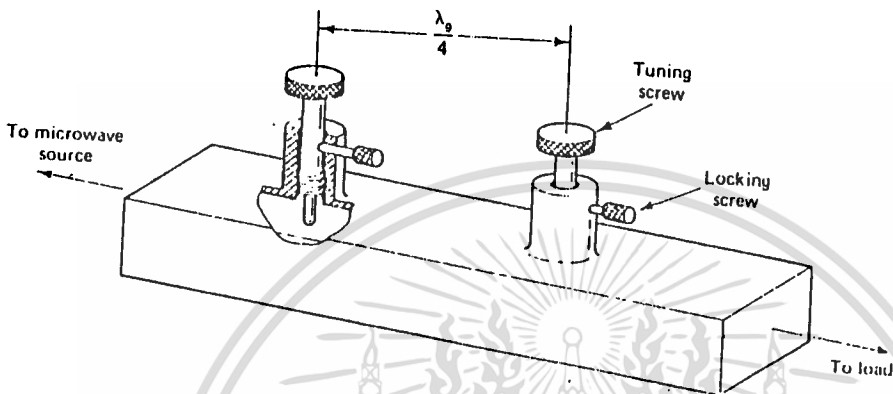
## 2.5 สตัมป์ จูนเนอร์ (STUB TUNNER)

กรณีสายส่งกำลังมีขนาดไม่เหมาะสมกับโหลด ก็จะทำให้เกิดแอสแตดิงเวฟซึ่งอาจเป็นสาเหตุทำให้เครื่องส่งเสียหายได้ และความไวต่อการตอบสนองความถี่ของสายจะน้อยลง สตัมป์ จูนเนอร์ เป็นอุปกรณ์ที่จะช่วยลดแอสแตดิงเวฟบนสายส่ง และทำให้สายส่งกำลังมีขนาดเหมาะสมกับโหลด

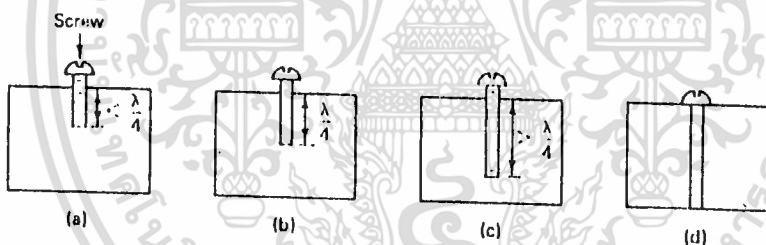
### สกรู จูนเนอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารพื้นฐานที่สุด ในการปรับอิมพีแดนซ์ของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 19 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะเป็นสกรูเล็กที่อยู่จุดกึ่งกลางด้านกว้างของท่อนำคลื่น และขนานไปกับสนามไฟฟ้าในย่านความถี่ของสนามสูงสุด จะมีลักษณะการเกิดพารามิเตอร์ภายในท่อนำคลื่นคือ เมื่อสกรูที่ใส่สั้นน้อยกว่า  $\lambda/4$  แล้วจะทำให้เกิดคุณสมบัติเป็นคาปาซิแตนซ์ และสั้นเท่ากับ  $\lambda/4$  ก็จะกลายเป็นรีซิสแตนซ์ และถ้าสั้นมากกว่า  $\lambda/4$  ก็จะกลายเป็นอินดักทีฟ ดังรูปที่ 20 , 21

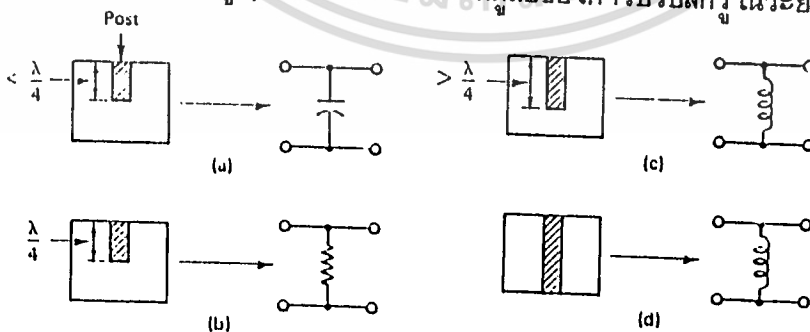


รูปที่ 19 แสดงสกรูจูนเนอร์



รูปที่ 20 แสดงการปรับสกรูจูนเนอร์

รูปที่ 21 แสดงวงจรสมมูลของการปรับสกรูในระยะต่างๆ



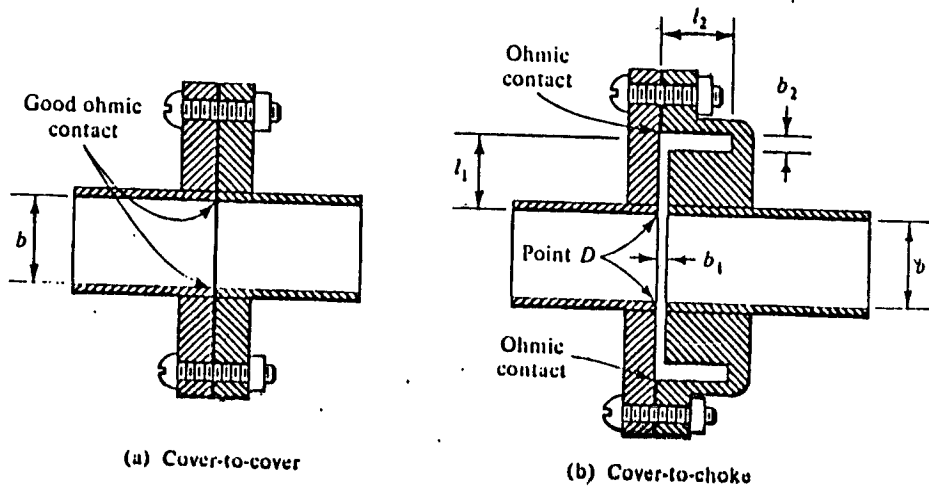
## 2.6 แพลงค์

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมต่อกันระหว่างท่อนำคลื่น ชนิดของแพลงค์ประกอบด้วย คอนแทค

(CONTACT) หรือ โคลเวอร์ ฟแลงค์ (COVER FLANGE) และ โช๊ค แพลงค์ (CHOKE

FLANGE) ซึ่งเชื่อมต่อกันดังรูปที่ 22

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 22 แสดงการเชื่อมต่อท่อนำคลื่น

หน้าของแผงค์ทั้งสองได้ถูกเชื่อมกันดังรูป a ซึ่งจะทำให้หน้าสัมผัสมีลักษณะเป็น โอห์มมิก คอนแทค (Ohmic Contact) ที่ดี และเพื่อลดการสะท้อนกลับ หน้าสัมผัสจะต้องราบเรียบและสะอาด การเชื่อมต่อแบบนี้มีค่าแอสเทนดิงเวฟเรโซ ประมาณ 1.02 หรือน้อยกว่า และส่วนใหญ่จะใช้กับพวกเพาเวอร์ที่มีค่าปานกลางหรือต่ำ ส่วนเพาเวอร์สูงๆ อาจทำให้เกิดการอาร์ค ( arc ) ระหว่างหน้าสัมผัส เนื่องจากการเชื่อมต่อที่ไม่สมบูรณ์

การคับปลิงจากโคฟเวอร์ แผงค์ไปยังโซค แผงค์ (COVER TO CHOKE FLANGE COUPLING) ดังรูป b นั้นจะใช้การเชื่อมต่อระหว่าง โคฟเวอร์ แผงค์กับ โซค แผงค์ เมื่อการเชื่อมต่อจะทำให้เกิด โอห์มมิก คอนแทค ที่หน้าสัมผัส และที่ โซค แผงค์ จะมีร่องที่มีลักษณะเป็นวงกลมรอบๆ และ มีความลึก  $l_2$  ซึ่งเท่ากับ  $\lambda/4$  ซึ่งจะทำให้เกิดค่าความต้านทานค่าหนึ่ง ที่จุดสัมผัสต่ออนุกรมกับความต้านทานที่มีค่าสูงมาก ทำให้กระแสที่จุดนั้นมีค่าเป็นศูนย์ และเนื่องจากความยาว  $l_1$  ในรูปมีค่าเท่ากับ  $\lambda/4$  ดังนั้นจะทำให้อิมพีแดนซ์ที่จุด D = 0 ซึ่งจะทำให้เกิดการเชื่อมต่อระหว่างท่อนำคลื่นได้ค่า VSWR ของการเชื่อมต่อแบบนี้ จะมีค่าประมาณ 1.04 หรือน้อยกว่า และเนื่องจากจุดที่เกิดโอห์มมิก คอนแทค เป็นจุดที่กระแสต่ำสุด ดังนั้นการอาร์คจึงไม่เกิดขึ้น จึงทำให้ใช้กับเพาเวอร์สูงๆได้ดี

### 2.7 คาวิตี เรโซเนเตอร์ (CAVITY RESONATOR)

คาวิตี เรโซเนเตอร์ เป็นอุปกรณ์ทำหน้าที่เป็นวงจรเรโซแนนซ์ในย่านความถี่ไมโครเวฟ ซึ่งจะมีลักษณะเป็นตู้ปิดทึบ เพื่อให้เกิดการเรโซแนนซ์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่เหมาะสมกับตู้นั้น ตู้จะมีได้หลายลักษณะ เช่น ทรงกระบอก, ทรงสี่เหลี่ยม เป็นต้น วงจรเรโซแนนซ์เบื้องต้นมีดังนี้

จากรูปเป็นวงจรเรโซแนนซ์ทั้งแบบอนุกรม และ แบบขนาน ของวงจรแอลซี (LC Circuit) ซึ่งต่อกับแหล่งกำเนิดไฟกระแสสลับ (AC SOURCE) โดยแบบอนุกรมแหล่งกำเนิดไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะประมาณด้วยโวลเตจเจนเนอเรเตอร์ ( $V_G$ ) ต่ออนุกรมกับ  $R_G$  ดังรูป ๘ และแหล่งกำเนิดแบบขนานจะเสมือนแหล่งกำเนิดกระแสแบบคงที่  $I_G$  โดยที่

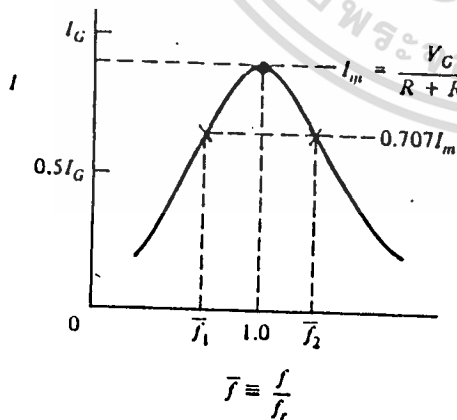
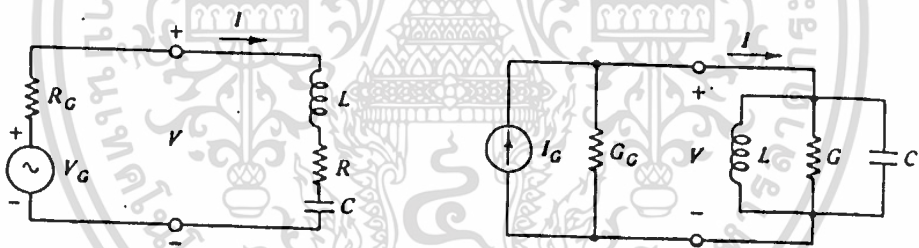
$$I_G = V_G / R_G$$

$$\text{และ } G_G = 1/R_G$$

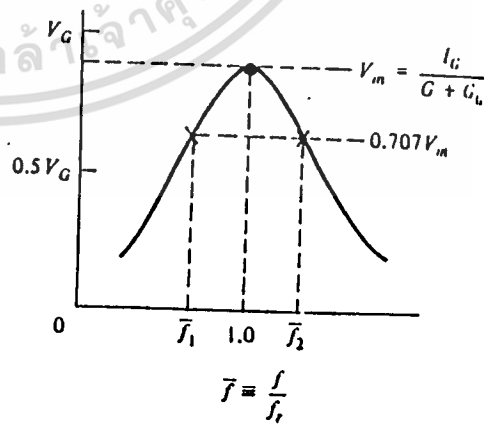
วงจรเรโซแนนซ์ทั้งแบบอนุกรม และ แบบขนานจะถูกแทนด้วยอุปกรณ์แอลอาร์ซี ( $L-R-C$ ) และจีแอลซี ( $G-L-C$ ) โดยที่  $R$  และ  $G$  จะแทนค่าการสูญเสียภายในวงจรเท่านั้น ถ้า  $G$  ไม่เท่ากับ  $1/R$  แล้ววงจรเรโซแนนซ์ของวงจรทั้งสองจะมีค่าเท่ากับ

$$\omega_r = 2\pi f_r = 1/\sqrt{LC}$$

ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม จะมีค่า  $Z = R + j(\omega L - (1/\omega C))$  เมื่อเกิดเรโซแนนซ์  $Z=R$  ดังนั้น  $(\omega_r L - (1/\omega_r C)) = 0$  และค่าแอดมิตแตนซ์ของวงจรเรโซแนนซ์ในแบบขนานจะมีค่า  $Y = G + j(\omega C - (1/\omega L))$  เมื่อเกิดเรโซแนนซ์  $Y=G$  โดยจะดูจากการตอบสนองความถี่ของวงจรทั้งสองได้จากกราฟ



(a)



(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สมบูรณ์ ได้ทำการปรับปรุงใช้วงจรที่วงจรที่กล่าวถึงนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ ๘.๓ แสดงวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมและขนาน  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าควอลิตี้ แฟคเตอร์ (Q: QUALITY FACTOR) ของวงจรเรโซแนนซ์นี้จะกำหนดได้ในเทอมของพลังงานที่สะสมกับพลังงานที่สูญเสียไปที่ความถี่เรโซแนนซ์ดังสมการ

$$Q = 2\pi \left( \frac{\text{พลังงานที่กัก: สมอยู่ในหนึ่งคาบ}}{\text{พลังงานที่สูญเสียต่อ 1 คาบ}} \right) = \omega_r \frac{\text{พลังงานที่กัก: สมในหนึ่งคาบ}}{\text{พลังงานที่สูญเสียต่อหนึ่งคาบ}}$$

ค่า Q จะมีด้วยกัน 3 แบบ คือ

ค่า Q ที่ไม่มีภาระ (Unloaded Q :  $Q_U$ )

$$= \omega_r \frac{\text{พลังงานที่กัก: สมในวงจรเรโซแนนซ์}}{\text{พลังงานที่สูญเสียในวงจรเรโซแนนซ์}} \quad \text{ที่ } \omega_r$$

ค่า Q ภายนอก (External Q :  $Q_E$ )

$$= \omega_r \frac{\text{พลังงานที่กัก: สมในวงจรเรโซแนนซ์}}{\text{พลังงานที่สูญเสียจากภายนอก}} \quad \text{ที่ } \omega_r$$

ค่า Q ที่มีภาระ (Loaded Q :  $Q_L$ )

$$= \omega_r \frac{\text{พลังงานที่กัก: สมในวงจรเรโซแนนซ์}}{\text{พลังงานที่สูญเสียทั้งหมด}} \quad \text{ที่ } \omega_r$$

-ค่า Q ที่ไม่มีภาระนั้นเป็นค่าบอกคุณภาพของวงจรเรโซแนนซ์ ซึ่งถ้ามีค่าเป็นอนันต์ ก็จะแสดงว่าไม่มีการสูญเสียพลังงานเลย

-ค่า Q ภายนอกเป็นฟังก์ชันของการคัปปลิงระหว่างวงจรเรโซแนนซ์กับวงจรภายนอก

-ค่า Q ที่มีภาระ ใช้บอกถึงการคัปปลิงของวงจรเรโซแนนซ์ไปสู่วงจรภายนอก

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทั้งสามเป็นไปดังสมการ

$$1/Q_L = 1/Q_E + 1/Q_U$$

จากการตอบสนองความถี่ของรูปเบื้องต้นจะได้

$$Q_L = f_r / (f_2 - f_1) = \text{ความถี่เรโซแนนซ์} / \text{แบนด์วิธที่ 3 dB}$$

และ  $f_2$ ,  $f_1$  เป็นความถี่ที่กระแสหรือโวลต์เตจ มีค่าเป็น 0.707 เท่าของค่าขณะเรโซแนนซ์ ซึ่งเป็นจุดที่กำลังลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง

สำหรับวงจรอนุกรมเรโซแนนซ์

$$Q_U = \omega_r L/R \quad , \quad Q_E = \omega_r L/R_g \quad , \quad Q_L = \omega_r L/R+R_g$$

และสำหรับวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน

$$Q_U = \omega_r C/G \quad , \quad Q_E = \omega_r C/G_g \quad , \quad Q_L = \omega_r G/G+G_g$$

โดยฟรีควานซ์ ริซิสติวิตี (frequency resistivity) ของวงจรเรโซแนนซ์

เป็นฟังก์ชันของ  $Q_L$  เพราะ  $Q_L$  จะมีความสัมพันธ์กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่ารีแอกแตนซ์

(Reactance) หรือซัสเซ็ปแตนซ์ (Susceptance) ต่อความแตกต่างระหว่าง แหล่งกำเนิด

กับเรโซแนนซ์ ( $\Delta\omega = \omega - \omega_p$ ) ดังสมการ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม } Q_L = \frac{1}{2} \lim_{\Delta\omega \rightarrow 0} \frac{\frac{\Delta X}{R_G + P}}{\frac{\Delta\omega}{\omega_r}} = \frac{\omega_r}{2(R_G + P)} \left. \frac{dX}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_r}$$

$$\text{วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน } Q_L = \frac{1}{2} \lim_{\Delta\omega \rightarrow 0} \frac{\frac{\Delta B}{G_G + G}}{\frac{\Delta\omega}{\omega_r}} = \frac{\omega_r}{2(G_G + G)} \left. \frac{dB}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_r}$$

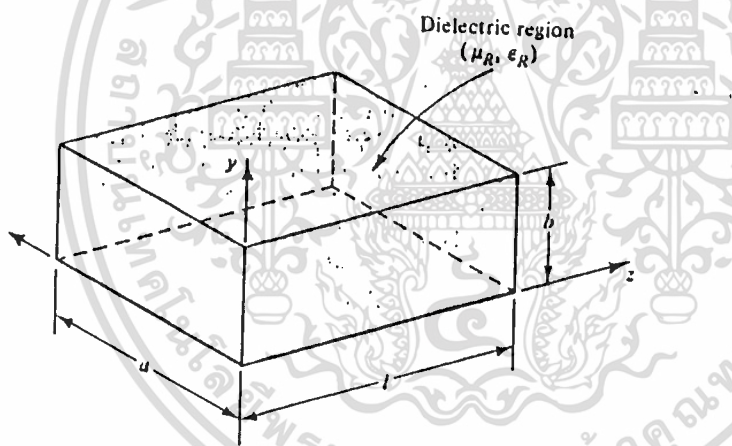
X : เอ ซี รีแอกแตนซ์ (ac reactance ; )

B : เอ ซี ซัสเซปแตนซ์ (ac susceptance ; )

จากสมการ ถ้า  $R = 0$  (ค่า  $\omega$  ที่ไม่มีภาวะมีค่าเป็นเลขแท้) จะแสดงถึงค่า  $\omega$  ภายนอก และในทางกลับกัน ถ้า  $R_G = 0$  สมการก็จะแสดงถึงค่า  $\omega$  ที่ไม่มีภาวะ

ตู้แม่สีเหลี่ยม (Rectangular Cavity)

ตู้แม่สีเหลี่ยมนี้ จะมีลักษณะเป็นเช่นเดียวกับที่อธิบายในภาคสนามแม่เหล็กไฟฟ้า แต่จะบิดไปเลย ทั้งสองด้าน ดังรูปที่ 24



รูปที่ 24 แสดงตู้แม่สีเหลี่ยม

โดยจะมีความสูงเป็น  $b$ , ความกว้างคือ  $a$ , และความยาวคือ  $l$  ซึ่งขนาดของ  $l$  จะมีค่าเป็นจำนวนเท่าๆของ  $\lambda/2$  เพื่อให้เกิดการเรโซแนนซ์ ดังสมการ

$$l = p\lambda/2 \quad p = 1, 2, 3, \dots$$

เราสามารถอธิบายถึงสนามภายในตู้แม่สีเหลี่ยมได้ดังนี้

สมมุติว่าผนังของตู้แม่เป็นตัวนำที่สมบูรณ์แบบ (perfect conductor) และขอบเขตภายในของตู้แม่เป็นฉนวนที่สมบูรณ์แบบ (perfect insulator) ด้วย ดังนั้นจะได้สมการดังนี้

(1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

(2)

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\mu = \mu_0 \mu_r$

$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$

ในระบบเรขาคณิตทรงลูกบาศก์ โคออดิเนต จาก (1) และ (2) จะได้

$$\frac{\partial^2 \epsilon}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \epsilon}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \epsilon}{\partial z^2} = -\omega^2 \mu \epsilon \bar{E} \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = -\omega^2 \mu \epsilon \bar{H} \quad (4)$$

เช่นเดียวกันกับการเดินทางของคลื่นในท่อนำคลื่น โหมดของคาร์วิตี้ก็จะมีอยู่ด้วยกัน 2 โหมดคือ ทรานสเวอร์ส อิเล็กตริก โหมด และทรานสเวอร์ส แมกเนติก โหมด ซึ่งโหมดของคาร์วิตี้จะสามารถแสดงได้คือ TE<sub>mnp</sub> หรือ TM<sub>mnp</sub>

สำหรับทรานสเวอร์ส อิเล็กตริก โหมด ( $E_z = 0, H_z \neq 0$ ) เมื่อคิดในองค์ประกอบทางระยะทาง Z สมการ (4) จะได้

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial z^2} = -\omega^2 \mu \epsilon H_z \quad (5)$$

เราจะใช้เทคนิคในการแยกตัวแปร ในสมการนี้ดังนี้

โดยให้  $H_z = X Y Z$

โดย X, Y และ Z เป็นฟังก์ชันของ x, y, z เท่านั้นจะได้

$$\frac{1}{X} \frac{d^2 X}{dx^2} + \frac{1}{Y} \frac{d^2 Y}{dy^2} + \frac{1}{Z} \frac{d^2 Z}{dz^2} = -\omega^2 \mu \epsilon$$

กำหนด

$$\frac{1}{X} \frac{d^2 X}{dx^2} = -k_x^2, \quad \frac{1}{Y} \frac{d^2 Y}{dy^2} = -k_y^2 \quad \text{และ} \quad \frac{1}{Z} \frac{d^2 Z}{dz^2} = -k_z^2$$

จะได้

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \omega^2 \mu \epsilon$$

คำตอบของสมการนี้เขียนอยู่ในรูปของ SIN และ COS ได้ดังนี้

เช่น  $X = A \cos k_x X + B \sin k_x X$

คำตอบของ X และ Y ก็ลักษณะเช่นเดียวกัน

ค่าเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ที่ผิวของตัวนำที่ผนังทั้ง 6 ของคาร์วิตี้มีค่าดังนี้

$$\frac{\partial H_z}{\partial x} = 0 \quad \text{ที่} \quad x = 0 \quad \text{และ} \quad x = a$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} = 0 \quad \text{ที่} \quad y = 0 \quad \text{และ} \quad y = b$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial z} = 0 \quad \text{ที่} \quad z = 0 \quad \text{และ} \quad z = l$$

ดังนั้นจะได้คำตอบของสมการจาก (6) คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_z = H_0 \cos(n\pi x/a) \cos(n\pi y/b) \sin(p\pi z/l) \quad (7)$$

$$\text{ซึ่ง } k_x = n\pi/a, \quad k_y = n\pi/b, \quad k_z = p\pi/l$$

โดย  $m, n, p$  เป็นเลขจำนวนเต็มบวก,  $H_0$  เป็นค่าคงที่ซึ่งจะขึ้นอยู่กับระดับสัญญาณ  
แทนค่าตอบลงในสมการ (7) จะได้

$$\left\{ \left(\frac{n\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{l}\right)^2 - \omega^2 \mu \epsilon \right\} H_z = 0$$

เนื่องจาก  $H_z \neq 0$  ดังนั้น

$$\left(\frac{n\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{l}\right)^2 = \omega^2 \mu \epsilon = \left(\frac{2\pi}{\lambda_r}\right)^2$$

เพราะว่า  $\omega_r = 2\pi f_r$  ก็คือความถี่เรโซแนนซ์ และ  $\lambda_r$  คือความยาวคลื่นที่เรโซแนนซ์จะได้  
สมการของความยาวคลื่นและความถี่ที่เรโซแนนซ์ดังนี้

$$\lambda_r = 1 / \sqrt{\left(\frac{n}{2a}\right)^2 + \left(\frac{n}{2b}\right)^2 + \left(\frac{p}{2l}\right)^2} \quad (8)$$

และ

$$f_r = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{n}{2a}\right)^2 + \left(\frac{n}{2b}\right)^2 + \left(\frac{p}{2l}\right)^2} \quad (9)$$

โดยทั่วไปความถี่เรโซแนนซ์จะแตกต่างกันไปตามแต่ละโหมด โหมดที่จะทำให้เกิด  
ความถี่เรโซแนนซ์ต่ำสุด เรียกว่าไพรมารี โหมด (primary mode) และสำหรับโครงสร้าง  
ของตู้แบบสี่เหลี่ยมซึ่งมีด้าน  $b$  เป็นด้านที่สั้นที่สุดนั้น ไพรมารี โหมด ก็คือ  $TE_{101}$

การเกิดคลื่นนิ่งใน cavity นี้สามารถดูเหมือนกับคู่ของคลื่น TE และ TM ที่มีแอมพลิจูดเท่า  
กัน เคลื่อนที่ไปทางด้านบวกและลบของความยาวทางด้านแกน  $z$  ดังนั้นจะเขียนสมการได้ใหม่  
ดังนี้

$$H_z = H_0 \cos k_x x \cos k_y y \left\{ \frac{e^{jk_z z}}{2} - \frac{e^{-jk_z z}}{2} \right\}$$

เทอมเอกซ์โปเนนเชียลเทอมแรก จะแทนคลื่นที่เดินทางไปทางด้านลบของแกน  $z$  โดยมีเฟสที่  
คงที่ (phase constant) และเทอมหลังแสดงคลื่นที่เดินทางด้านบวก  $z$  ซึ่งจะสามารถหา  
องค์ประกอบอื่นๆ ในสนามได้ดังนี้

$$E_x = j\omega_r (k_y/k_z) H_0 \cos(k_x x) \sin(k_y y) \sin(k_z z)$$

$$E_y = -j\omega_r (k_x/k_z) H_0 \sin(k_x x) \cos(k_y y) \sin(k_z z)$$

$$E_z = 0$$

$$H_x = -(k_x k_z/k_z^2) H_0 \sin(k_x x) \cos(k_y y) \cos(k_z z)$$

$$H_y = -(k_y k_z/k_z^2) H_0 \cos(k_x x) \sin(k_y y) \cos(k_z z)$$

$$H_z = H_0 \cos(k_x x) \cos(k_y y) \sin(k_z z) \quad (11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

โดย  $k_x = m\pi/a$ ,  $k_y = n\pi/b$ ,  $k_z = p\pi/l$  และ  $k_c^2 = k_x^2 + k_y^2$

ซึ่งเราสามารถใส่สมการเหล่านี้ว่าค่าแอมพลิจูดของสนามได้ ดังรูปที่ 2b ในรูปจะแสดงถึงฟิลด์แอมพลิจูดของโหมดต่าง ๆ ใน ทรานสเวอร์ส อิเล็กตริก โหมด โดยจะสามารถหาค่าความยาวคลื่น และความถี่เรโซแนนซ์ได้จากสมการ 8 และ 9

สำหรับ TM<sub>mpo</sub> โหมด ( $H_z = 0$ ,  $E_z \neq 0$ )

จากสมการ 3 จะเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = -\omega^2 \epsilon E \quad (12)$$

เราจะใช้เทคนิคการแยกตัวแปรจะได้

$$E_z = E_0 \sin(m\pi x/a) \sin(n\pi y/b) \cos(p\pi z/l) \quad (13)$$

ค่าเงื่อนไขขอบเขต คือ

$$E_z = 0 \text{ ที่ } x = 0, x = a, y = 0 \text{ และ } y = b$$

$$\text{และ } \frac{\partial E_z}{\partial z} = 0 \text{ ที่ } z = 0, z = l$$

แทนสมการ 13 ในสมการ 12 จะหาความยาวคลื่นและความถี่ที่เกิดเรโซแนนซ์ได้เช่นเดียวกับทรานเวอร์ส อิเล็กตริก โหมด ดังนั้น สมการ 8 และ 9 ก็สามารถใช้ได้กับ ทรานเวอร์ส แมกเนติก โหมด ด้วย และสามารถหาค่าประกอบอื่น ๆ ของสนามได้ดังนี้

$$E_x = -(k_y k_z / k_c^2) E_0 \cos(k_x x) \sin(k_y y) \sin(k_z z)$$

$$E_y = -(k_x k_z / k_c^2) E_0 \sin(k_x x) \cos(k_y y) \sin(k_z z)$$

$$E_z = E_0 \sin(k_x x) \sin(k_y y) \cos(k_z z)$$

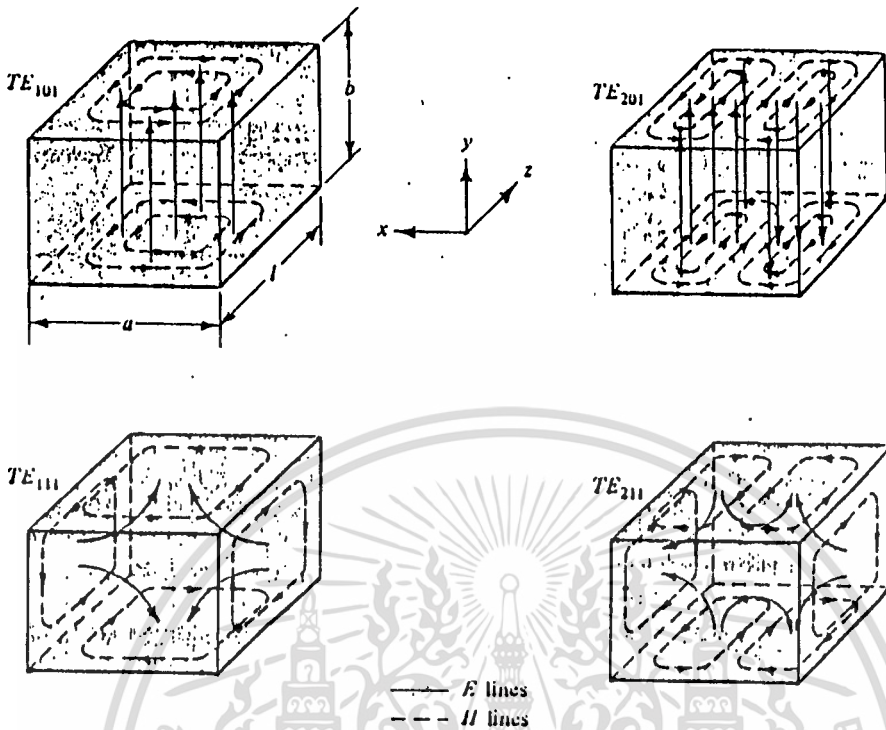
$$H_x = j\omega \epsilon (k_y / k_c^2) E_0 \sin(k_x x) \cos(k_y y) \cos(k_z z)$$

$$H_y = j\omega \epsilon (k_x / k_c^2) E_0 \cos(k_x x) \sin(k_y y) \cos(k_z z)$$

$$H_z = 0$$

โดย  $k_x = m\pi/a$ ,  $k_y = n\pi/b$ ,  $k_z = p\pi/l$  และ  $k_c^2 = k_x^2 + k_y^2$

จะเห็นว่าทั้ง ทรานสเวอร์ส อิเล็กตริก โหมดและทรานสเวอร์ส แมกเนติก โหมด ก็สามารถหาความยาวคลื่นและความถี่เรโซแนนซ์ ได้ด้วยสมการเดียวกัน ดังนั้นจึงมีบางโหมดของทรานเวอร์ส อิเล็กตริก และ ทรานเวอร์ส แมกเนติก ซึ่งทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ ค่าเดียวกันได้ เรียกว่า ดีเจเนอเรท (degenerate)



รูปที่ 25 แสดงลักษณะของสนามในโหมดต่างๆ ของทราเวลเวอริส อิเล็กตริก โหมด ค่า Q ที่ไม่มีภาวะ ของ  $TE_{1,0,p}$  โหมดของควาิตี้

เนื่องจากการอธิบายที่ผ่านมานั้น ถือว่าเป็นควาิตี้ในอุดมคติ คือไม่มีการสูญเสีย ซึ่งค่า Q ไม่มีภาวะ มีค่าเป็นอนันต์ ดังสมการ

$$Q_{\infty} = \text{พลังงานที่เก็บในควาิตี้} / \text{พลังงานที่สูญเสีย} \quad (\text{ที่ } w = w_r)$$

แต่ในทางปฏิบัติจะมีการสูญเสียเกิดขึ้น ซึ่งสามารถคำนวณหาค่า Q ไม่มีภาวะได้ เช่น ตัวอย่างในโหมด  $TE_{1,0,p}$  ของตู้แบบสี่เหลี่ยม ดังนี้

แม้ว่าพลังงานในควาิตี้จะเปลี่ยนแปลงระหว่างไฟฟ้าและแม่เหล็ก แต่พลังงานทั้งหมดจะคงที่ ซึ่งพลังงานทั้งหมดในควาิตี้หาได้จาก

$$U_E = U = \frac{1}{2} \int_{\text{vol}} \mathbf{D} \cdot \mathbf{E} \, dv = \frac{\epsilon}{2} \int_0^l \int_0^a \int_0^b (\sqrt{2} E_y)^2 \, dy \, dx \, dz$$

โดย  $E_y$  คือ ค่า rms ของ  $E_y$  ในสมการที่ (11) โดย  $m = 1, n = 0,$

$$k_x = \pi/a, \quad k_y = 0, \quad k_z = k_{\infty} \quad \text{ดังนั้น}$$

$$U = \frac{\eta}{8} \left( \frac{a}{\lambda_v} \right)^2 H_0 a b l$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 โดย  $\eta = \sqrt{\mu/\epsilon}, \quad \sigma = 1/\sqrt{\mu\epsilon}$  และ  $(ab)l$  คือปริมาตรของควาิตี้และจะหาไปใช้

พลังงานที่สูญเสียไปจากสูตร

$$P_d = R_s \int_S k^2 dS = R_s \int_S H_T^2 dS$$

$$R_s = \text{ความต้านทานที่ผิวของคาร์วิตี} = \sqrt{\frac{\pi f \mu_0}{\sigma}}$$

$H_T$  = ค่าเฉลี่ยของสนามแม่เหล็กที่พื้นผิว

ค่า  $Q$  ไม่มีภาวะ จะหาได้จาก  $Q = P / P_d$  ในท้ายสุดจะหาค่า  $Q_u$  ของโหมด  $TE_{10p}$

เป็นดังสมการ

$$Q_u = \frac{\pi \eta}{\lambda_p R_s} \frac{ab \ell \{ 1 + (pa/\ell)^2 \}}{2b \ell \{ 1 + (a/\ell)(pa/\ell)^2 \} + (a\ell) \{ 1 + (pa/\ell)^2 \}}$$

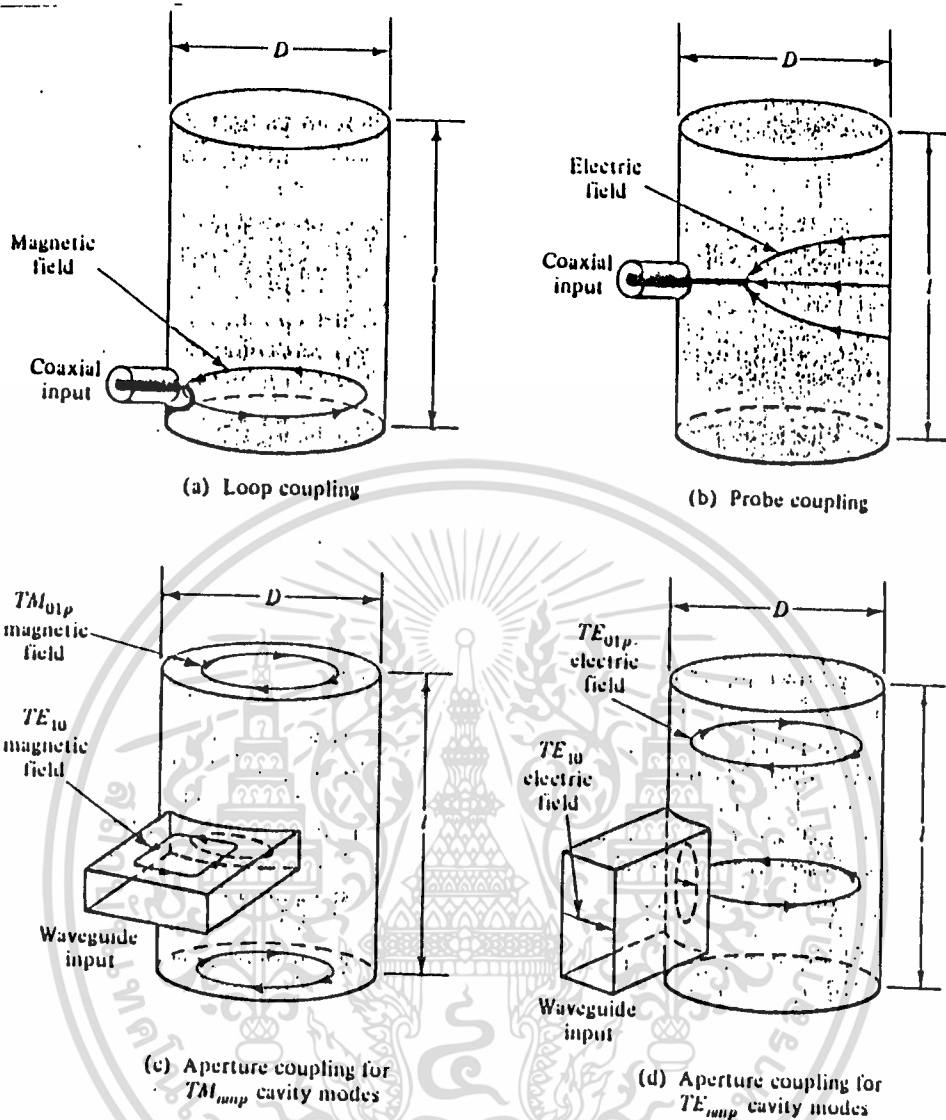
### การคัปปลิงเข้าสู่คาร์วิตี

ลักษณะการคัปปลิง เป็นไปได้ 4 แบบ ดังรูปที่ 26

รูป a แสดงการคัปปลิง แบบลูปลจากสายโคแอกเซียล โดยคอนดักชันเคอเรนซ์ (conduction current) ในลูปลจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กในคาร์วิตีซึ่งเกิดได้ทุก  $TM_{mnp}$  โหมด

รูป b เป็นชนิดโพรมคัปปลิง จากสายโคแอกเซียล ซึ่งทำให้เกิดโหมดที่มีสนามไฟฟ้าขนานกับโพรมได้ ในรูปนี้ คือ ทุกโหมดของ  $TE_{mnp}$  ยกเว้น  $n = 0$  และถ้าโพรมได้ถูกติดไว้ที่ปลายข้างใดข้างหนึ่งของคาร์วิตี ทำให้มีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแนวแกน  $z$  ขึ้นก็จะทำให้ได้ ทรานเวอร์ส แมคเนติก โหมดออกมา

รูป c และ d เป็นแบบอาเพอร์เจอร์คัปปลิง (aperture coupling) ระหว่างตู้ทรงกระบอกกับท่อทรงสี่เหลี่ยม ซึ่งส่งในโหมด  $TE_{10}$  โดยสนามแม่เหล็กจะขนานกับด้านที่ยาวของช่องที่คัปปลิงดังรูป ซึ่งรูป c การคัปปลิงจะเกิดโหมด ทรานเวอร์ส แมคเนติก ขึ้นภายในคาร์วิตีโดยปกติจะใช้กับโหมด  $TM_{0,1p}$  เมื่อท่อไอคลื่นและอาเพอร์เจอร์อยู่ตามความยาว  $1$  แล้วจะทำให้  $p$  เป็นจำนวนคู่ เพราะถ้า  $p$  เป็นจำนวนคี่จะทำให้สนามแม่เหล็กที่จุดนี้มีค่าเป็น 0 ในรูป d ก็เป็นเช่นเดียวกับรูป c เพียงแต่หมุนท่อไอคลื่นและอาเพอร์เจอร์ไป  $90^\circ$  องศา ก็จะทำให้เกิดโหมด TE ขึ้นได้ โหมดที่ใช้บ่อย ๆ ก็คือ  $TE_{1,1p}$  และ  $TE_{1,10p}$



รูปที่ 26 แสดงการคับปลิ่งเข้าสู่ควาวิตี้

2.8 เทอร์มิเนเตอร์

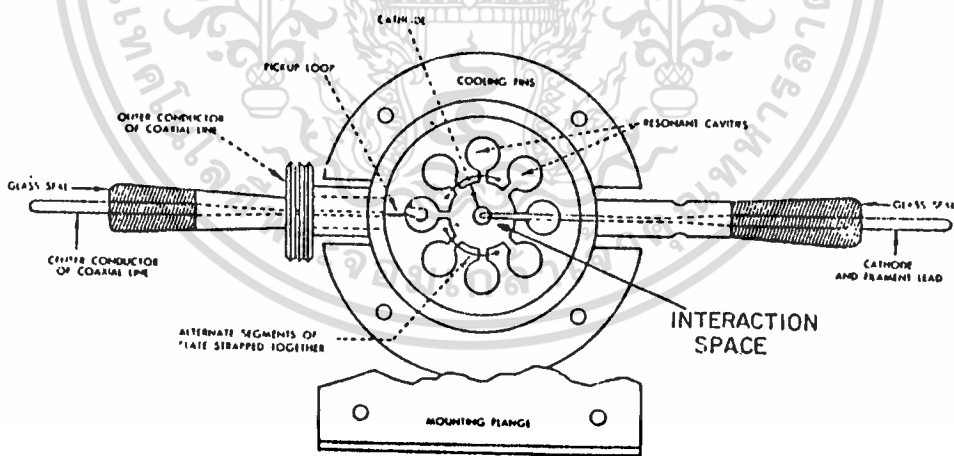
เทอร์มิเนเตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ไว้ใช้ในการดูดกลืน พลังงานของคลื่นที่เข้าไป ซึ่งจะมีแบบ เทปเปอร์ โหลด (tapered load) และสเตป โหลด (stepped load)

เทปเปอร์ โหลด

ตัวอย่างของโหลดชนิดนี้จะเป็นดังรูป a, b, c โดยรูป a จะใช้กับประเภทรอดแบนด์ ที่มีกำลังน้อย และปานกลาง ประกอบด้วยแท่งของวัตถุที่มีการสูญเสียมาก ซึ่งจะติดแน่นหรือเคลื่อนที่ ตามแนวการเดินทางของคลื่นมี แสตนดิ่ง เวนเรโซน้อยกว่า  $1.04$  เมื่อความยาว  $l_1$  มีค่ามากกว่าความยาวคลื่นที่ต่ำสุด แล้วค่า  $l_2$  จะต้องเลือกให้มีค่าการสูญเสียเมื่อรวมกับ  $l_1$  แล้วมากกว่า  $20$  dB ซึ่งจะทำให้คลื่นที่สะท้อนกลับมีค่าน้อยมาก ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.9 หลอดแมกนีตรอน

แนวคิดพื้นฐานของหลอดแมกนีตรอน จะเป็นไดโอดที่ไม่มีกักริต โดยสนามแม่เหล็กที่อยู่ภายในหลอดระหว่างแผ่นแอโนด (Anode) และคาโทด (Cathode) จะถูกควบคุมโดยการบังค้ำทางกล สำหรับคาโทดและส่วนประกอบบางส่วนจะอยู่ที่กึ่งกลางของหลอด โดยจะต่อกับฟิลาเมนต์ ลีด (Filament lead) ซึ่งจะเป็นตัวยึดคาโทดและส่วนประกอบให้แน่น ส่วนทางเอาท์พุทจะเป็นโพรมหรือลูบ จะยื่นเข้าไปในทันเด้น คาวิตี (tunden cavity) ซึ่งจะค้ำปลั๊งไปสู่ท่อนำคลื่น โดยรูปร่างของเพลทจะแสดงในรูปที่ 28 รูปกลมๆที่เห็นจะเป็น เรโซแนนซ์ คาวิตี (resonant cavity) เนื่องจากมีกระแสไหลในคาโทด ทำให้คาโทดจะต้องใหญ่เพียงพอและสามารถทนต่ออุณหภูมิสูงๆ ดังนั้นคาโทดที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติคือ ต้องสาม เวททนต่อแบค บอมบาร์ดเม้นท์ (back bombardment) อันเนื่องมาจากกำลังที่มาจากอีเล็คตรอนที่มีความเร็วสูงพุ่งเข้ามาใส่คาโทด ช่องว่างระหว่างคาโทดและแอโนด จะเรียกว่าแอคชั่น สเปซ (action space) เนื่องจากช่องว่างนี้มีทั้งสนามไฟฟ้าและแม่เหล็ก ซึ่งจะมีผลต่อการเคลื่อนที่ของอีเล็คตรอน ซึ่งสนามแม่เหล็กจะชานกับแกนของคาโทดจากรูปที่ 28 จะเห็นว่า แอโนดจะเป็นกราวด์ และคาโทดจะป้อนไฟลบให้หลายกิโลโวลต์



รูปที่ 28 แสดงภาพตัดของคาวิตีของหลอดแมกนีตรอน

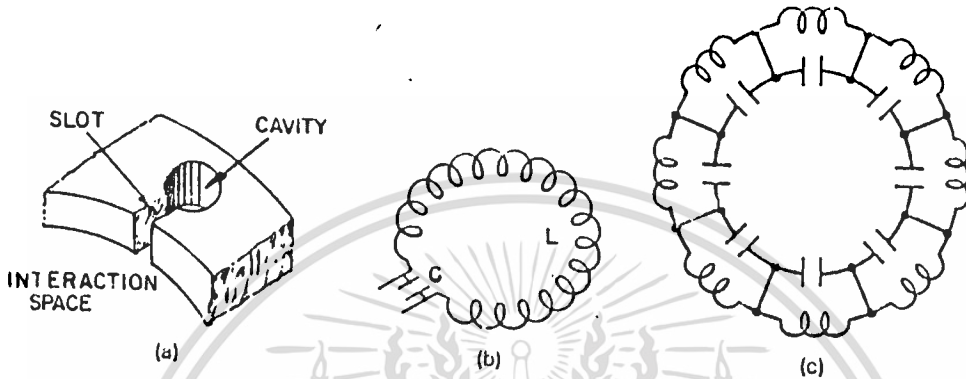
### กฎพื้นฐานของแมกนีตรอน

ทฤษฎีของหลอดแมกนีตรอน มีพื้นฐานมาจากการเคลื่อนที่ของอีเล็คตรอนภายใต้สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า ทิศของสนามไฟฟ้าจะออกจากขั้วบวกเข้าหาขั้วลบ อีเล็คตรอนจะเคลื่อนที่เข้าหาแอโนดดังรูปที่ 29 ส่วนการเคลื่อนที่ของอีเล็คตรอนภายใต้สนามแม่เหล็กจะแสดงดังรูปที่ 30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- รูป a เป็นคาร์วิต์แบบทรงกระบอก หรือ โฮลแอนด์สล็อตอานอด (hole and slot anode)
- รูป b เป็นแทรมบิกชอยด์คาร์วิต์ (trapezoidal cavity) หรือ เวเนอานอด (vane anode)
- รูป c เป็น ไรซิงซัน (rising sun)

ส่วนรูปแสดงวงจรสมมูลแสดงได้ดังรูปที่ 32

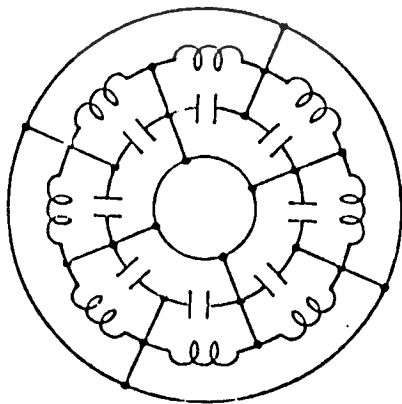


รูปที่ 32 แสดงถึงวงจรสมมูลของ โฮลและสล็อตคาร์วิต์

- รูป a แสดงเรโซแนนซ์คาร์วิต์ ซึ่งเป็นแบบโฮลและสล็อตอานอด
- รูป b แสดงวงจรสมมูลของคาร์วิต์ และ สล็อต
- รูป c แสดงวงจรแทงค์แอลซี (LC TANK CIRCUIT) ของคาร์วิต์ที่ต่ออนุกรมกัน

ผนังด้านข้างของสล็อตจะแสดงเป็นคาปาซิเตอร์ ในขณะที่ผนังของ โฮลเป็นอินดักเตอร์

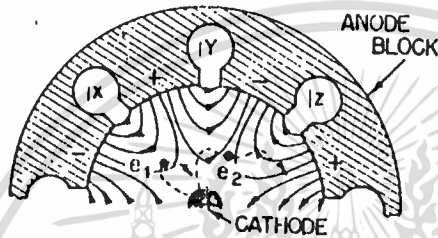
รูป c เป็นวงจรแทงค์แอลซีของคาร์วิต์ที่ต่ออนุกรมกัน โดยจะละแสดง (STRAP) ไว้ก่อน ส่วนรูปที่ 33 จะแสดงวงจรแทงค์แอลซีของคาร์วิต์ที่ต่ออนุกรมกัน โดยจะรวมแสดงด้วยซึ่งแสดงให้เห็นว่าคาร์วิต์ต่อขนานกันอยู่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 33 แสดงคาร์วิต์ที่ต่อขนานกันเนื่องจากแสดง  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การทำงานของหลอดแมกนีตรอน

สนามไฟฟ้าภายในแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนเรโซแนนซ์ (ELECTRON RESONANT OSCILLATOR) เกิดจากการรวมกันของสนามกระแสไฟฟ้าสลับและสนามกระแสไฟฟ้าตรง โดยสนามกระแสไฟฟ้าตรงเกิดจากอาโนดและคาโทด ส่วนของสนามกระแสไฟฟ้าสลับนั้นจะเกิดจากแหล่งกำเนิดอาร์เอฟ (RF OSCILLATION) ที่เหนี่ยวนำเข้าไปในเรโซแนนซ์ควาร์ตซ์ของอาโนดบล็อก



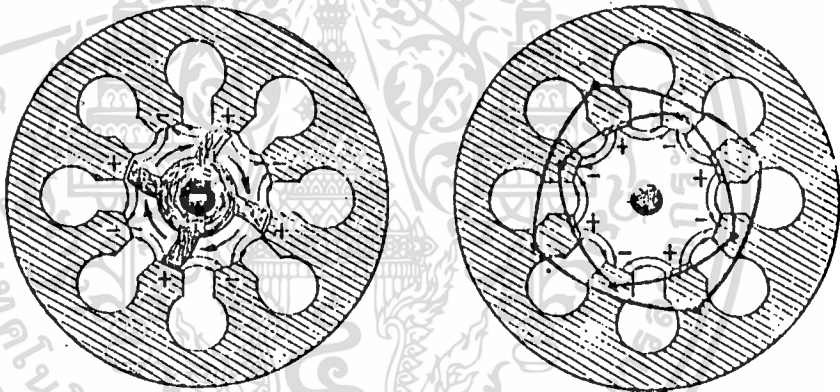
รูปที่ 34 แสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

สนามกระแสไฟฟ้าตรงที่แรง จะทำให้อิเล็กตรอนถูกเร่งเข้าหาอาโนดทันทีที่ออกจากคาโทด การออสซิลเลชันในหลอดแมกนีตรอนเกิดเนื่องมาจากการขยายพลังงานจากสนามไฟฟ้ากระแสตรงและให้พลังงานเป็นสนามไฟฟ้ากระแสสลับ จากรูปที่ 34  $e_1$  ซึ่งมีสนามอยู่รอบๆ ทางเข้าสล็อตของควาร์ตซ์ X ทางเดินของอิเล็กตรอนจะหมุนตามเข็มนาฬิกาเพราะสนามแม่เหล็กมีทิศทางพุ่งเข้าหากระดาช  $e_1$  จะเคลื่อนที่สวนทางกับสนามกระแสไฟฟ้าสลับ ดังนั้นมันจะกลับทิศอย่างรวดเร็วพุ่งเข้าหาคาโทด และพลังงานจากสนามเอซีจะกลายเป็นความร้อน  $e_2$  จะวิ่งช้าเนื่องจากเกิดการสูญเสียพลังงานให้กับสนามกระแสไฟฟ้าสลับด้วย เนื่องจากมีสนามแม่เหล็กมากกระทำ ทำให้อิเล็กตรอนวิ่งไปดังรูปที่ 34 ความต่างศักย์ของอาโนด-คาโทดและความเข้มของสนามแม่เหล็กจะเป็นตัวกำหนดเวลาในการเคลื่อนที่จากควาร์ตซ์ Y ไปควาร์ตซ์ Z ของ  $e_2$  ซึ่งเวลานี้จะประมาณเท่ากับครึ่งหนึ่งของคาบเวลาของแหล่งกำเนิดอาร์เอฟของควาร์ตซ์เมื่อ  $e_2$  เดินทางถึงด้านหน้าของควาร์ตซ์ Z สนามกระแสไฟฟ้าตรงของควาร์ตซ์จะกลับทิศทางดังรูป 34 และ  $e_2$  จะให้พลังงานกับสนามกระแสไฟฟ้าสลับของควาร์ตซ์ Z และมันจะวิ่งช้าลงตามลำดับเนื่องจากให้พลังงานกับควาร์ตซ์ทุกตัวที่มันผ่าน ในที่สุดเมื่อพลังงานหมดก็จะวิ่งหาอาโนด ดังนั้น  $e_2$  จะเป็นตัวสนับสนุนการเกิดออสซิลเลชันเนื่องจากจะ เปลี่ยนพลังงานของสนามไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นสนามกระแสไฟฟ้าสลับ ส่วน  $e_2$  จะนำพลังงานจากสนามเอซีรอบๆควาร์ตซ์ X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ขออนุญาตจากสถาบันฯ ถือว่าผิดกฎหมาย

แต่จะ ไม่มีผล เสียมากนัก เนื่องจากมันจะวิ่งกลับคาโทดทันทีทันใด

การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนตามลักษณะของ e1 และ e2 จะมีอิเล็กตรอนจำนวนมาก เกิดตามลักษณะนี้ดังรูปที่ 35 ซึ่งจะเรียกว่า "ล่อหมุน" ซึ่งจะหมุนรอบคาโทดด้วยความเร็วรวม ในแต่ละส่วน(SEGMENT) ของอาโนด และจะมีความสัมพันธ์ทางเฟส การรวมตัวของอิเล็กตรอน จะแบ่งเป็นส่วนที่เป็นพลังงานต่อเนื่อง และส่วนที่สนับสนุนการเกิดออสซิลเลชัน จากรูปที่ 35 จะเห็นว่าที่อาโนดจะเกิดขั้วบวกขั้วลบสลับกันไป และมีสนามกระแสลับเกิดขึ้นในทุกคาวิตี้ ลักษณะการเกิดแบบนี้เรียกว่า  $\mathcal{H}$  โหมด เนื่องจากคาวิตี้ที่ติดกันมีเฟสต่างกัน 180 องศา ข้อดีของ  $\mathcal{H}$  โหมด ก็คือจะให้เอาพุมากกว่าโหมดอื่นๆ สำหรับ  $\mathcal{H}$  โหมดในแต่ละส่วนของ แสตรบริง (strapping ring) จะมีความต่างศักย์เหมือนกัน แต่ถ้าเป็น ทูริง (two ring) ความต่างศักย์จะตรงข้ามกันดังรูปที่ 36

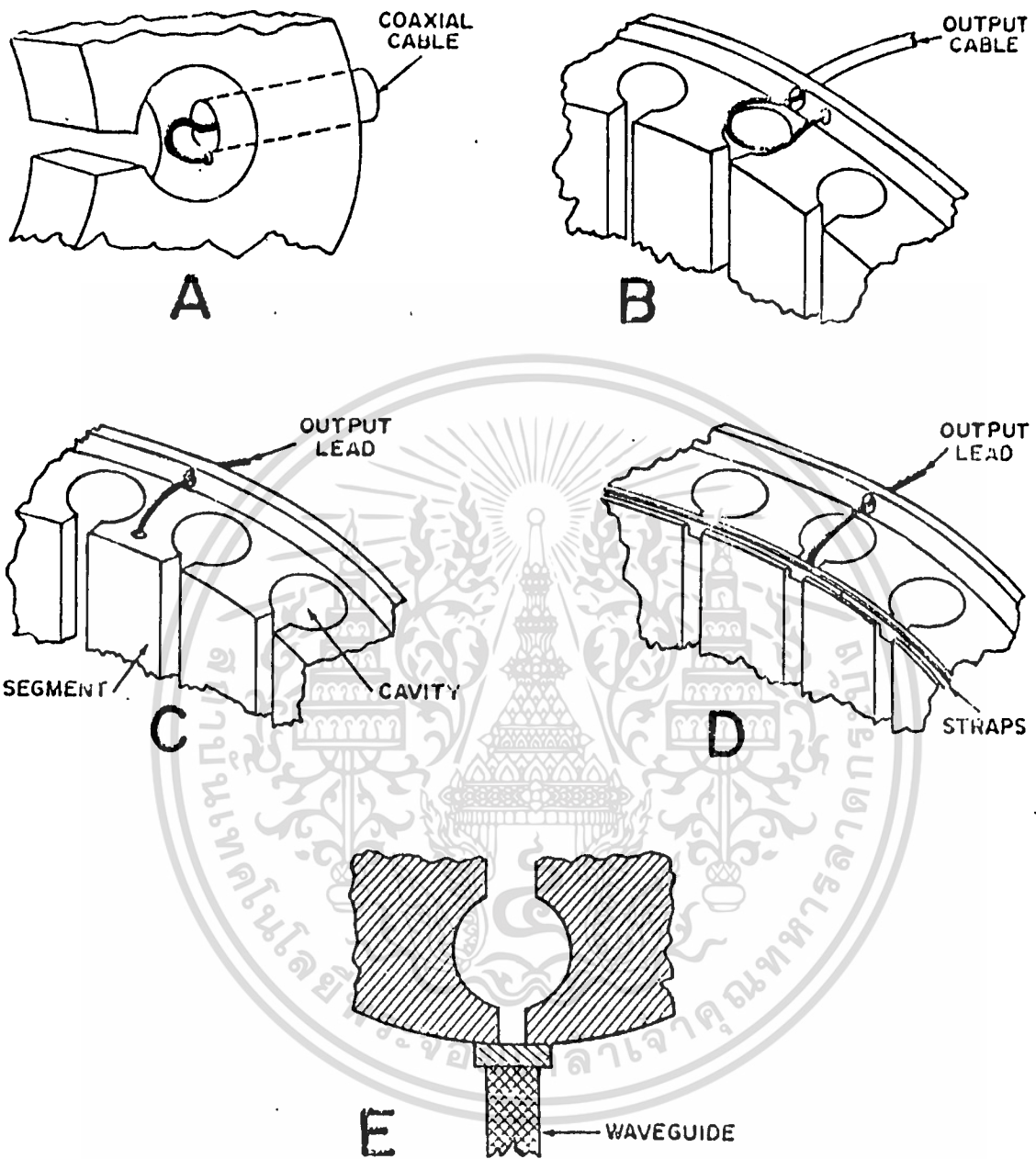


รูปที่ 35 แสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน และ รูปที่ 36 แสดงการแบ่งโหมดจากการแสตรบริง

วิธีการขับพลังของหลอดแมกนีตรอน

การขับพลังพลังงานจากหลอดแมกนีตรอน จะให้การขับพลังแบบลูบ ในกรณีความถี่น้อยกว่า 10 GHz การขับพลังแบบลูบจะทำโดยการงอตัวนำภายในของสายโคแอกเซียล ดังรูปที่ 37a ส่วนกรณีความถี่มากกว่านี้จะให้ลูบอยู่ที่บนสุดของคาวิตี้ ดังรูปที่ 37b จากรูป 37a และ 37b จะขับพลังแค่คาวิตี้เดียว ส่วนรูปที่ 37c เป็นเช็กเมนท์เฟดลูป (SEGMENT-FED LOOP) ซึ่งเป็นตัวกันไม่ให้ฟลักซ์แม่เหล็กผ่านระหว่างคาวิตี้ได้ ส่วนรูปที่ 37d เป็นสโตรปเฟดลูป (STROP-FED LOOP) จะกันพลังงานระหว่างแสตรบกับเช็กเม้นท์ รูปที่ 37e เป็นอาเพอร์เจอร์ หรือสลีต

เอกสารนี้ ขับพลัง ซึ่งจะนำพลังงานไปสู่ท่อนำคลื่นโดยตรงโดยจะมีไอริสอยู่ระหว่างท่อนำคลื่นกับสลอตการค้ำ  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

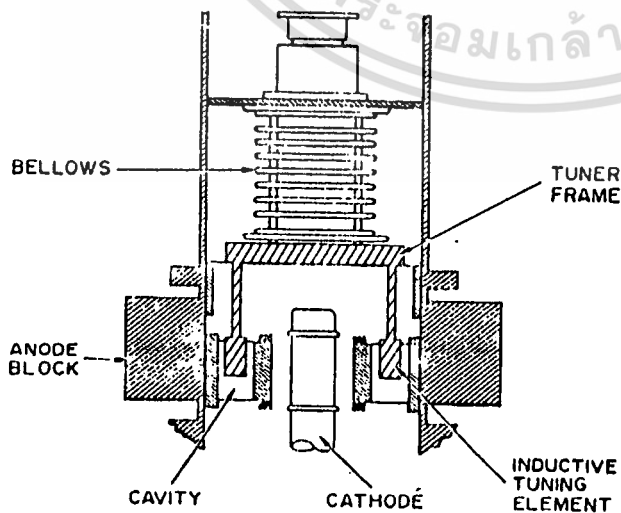


รูปที่ 37 แสดงวิธีการคัปปลิงของหลอดแมกนีตรอนแบบต่างๆ

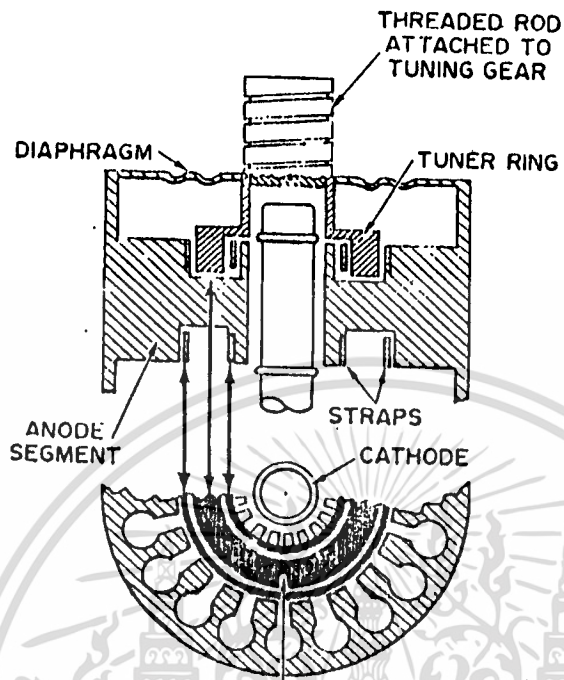
### การจูนนิ่ง

เพื่อที่จะให้ความถี่ออกมาได้ตรงกับความถี่ที่ต้องการ จึงต้องมีการจูนนิ่งหลอดแมกนีตรอน ซึ่งความถี่เรโซแนนซ์จะขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงค่าอินดักแตนซ์หรือคาปาซิแตนซ์ของเรโซแนนซ์ควิตี้ จากรูปที่ 38 เป็นอินดักทีฟจูนนิ่งอินลิเมนต์ (INDUCTIVE TUNNING) ไม่ว่าจะวิธีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ELEMENT) ใส่อยู่ในโวลของโวลและสล็อตคาร์ที ซึ่งจะเปลี่ยนอินดักแทนซ์ของวงจรเรโซแนนซ์ โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของพื้นผิวกับปริมาตรในส่วนที่มีกระแสไหลมาก การจูนนิ่งที่ อาโนดโวลจะลดอินดักแทนซ์ของคาร์ที และจะเพิ่มความถี่เรโซแนนซ์ขึ้น ข้อจำกัดของอินดักทีฟ จูนนิ่ง คือจะทำให้ค่า Q ที่ไม่มีภาระมีค่าต่ำ และจะลดประสิทธิภาพของหลอดแมกนีตรอน รูปที่ 39 เป็นคาปาซิทีฟ แมกนีตรอน จูนนิ่ง (CAPACITIVE MAGNETRON TUNNING) จะมี การใส่แหวน (RING) เข้าไปในคาร์ทีสล็อต ดังรูปที่ 39 จะเรียกว่า คูกี้ คัตเตอร์ (COOKIE CUTTER) จะประกอบด้วยโลหะวงแหวนที่อยู่ระหว่างวงแหวนอีกสองตัวของ ดับเบิล แสตรบ แมกนีตรอน (DOUBLE-STRAPPED MAGNETRON) ซึ่งจะเป็นการเพิ่ม แสตรบคาปาซิแตนซ์ (STRAP'S CAPACITANCE) เนื่องจากคูกี้ คัตเตอร์ จะมีปัญหาทางด้านแมกเนติก และ โวลท์เตจ เบรคดาวน์ (VOLTAGE BREAKDOWN) เมื่อเพิ่มสล็อตคาปาซิแตนซ์ก็จะลดความถี่ เรโซแนนซ์ เนื่องจากความกว้างของช่องว่าง (gap) แคบมาก ดังนั้นโวลท์เตจ เบรคดาวน์ จะมีค่าต่ำก็จะทำให้แมกนีตรอนทำงานที่ความต่างศักย์น้อย และเอ้าท์พุทที่ได้จะต่ำตามไปด้วย การจูนทั้งสองวิธีนี้จะจูนได้ในช่วง 10 % ของเรนจ์ของความถี่ (FREQUENCY RANGE) นอกจากนี้ยังมีการจูนนิ่งโดยการเปลี่ยนโวลท์เตจของอาโนด ซึ่งเรียกว่า โวลท์เตจจูนเนเบิล แมกนีตรอน (VOLTAGE-TUNABLE MAGNETRONS: VTMS) ซึ่งจะจูนได้ช่วงกว้างมากกว่าแต่ จะมีประสิทธิภาพต่ำ และเหมาะสำหรับการทำงานแบบคลื่นต่อเนื่อง (CW OPERATION) เช่น ออสซิลเลเตอร์ เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 38 แสดงวิธีการจูนนิ่งแบบอินดักทีฟ แมกนีตรอน จูนนิ่ง  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



WIDE LINE REPRESENTS TUNER-RING POSITION BETWEEN THE MEGNETRON STRAPS

รูปที่ 39 แสดงวิธีการจูนนิ่งแบบคาปาซิทีฟ แมกนีตรอน จูนนิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### การคำนวณและการสร้าง

##### 5.1 การออกแบบท่อนำคลื่น

$$\begin{aligned} \text{จาก } c &= f\lambda \\ 3 \times 10^8 &= 2450 \times 10^6 \times \lambda \\ \lambda &= 0.12 \text{ m} \end{aligned}$$

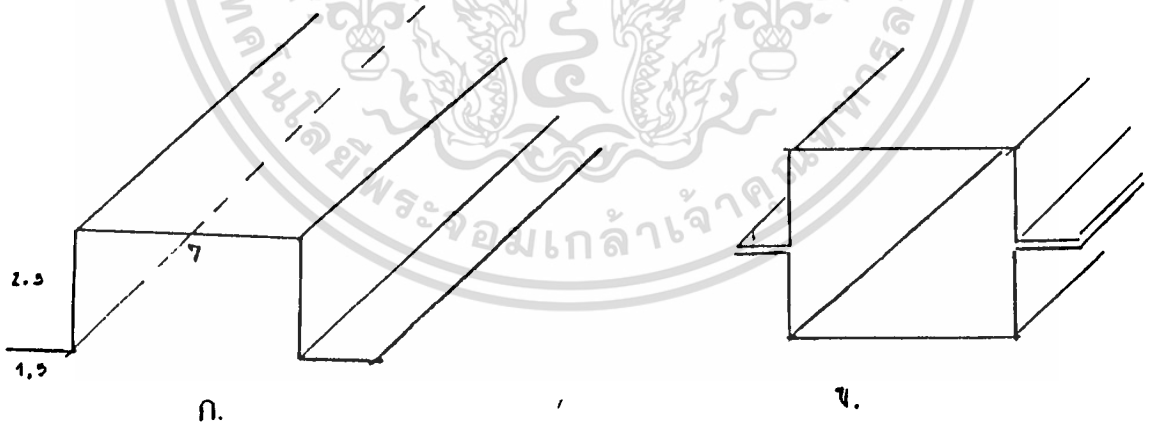
เนื่องจากหลอดแมกนีตรอน จะให้ความถี่ช่วง  $2450 \pm 50$  MHz ดังนั้นการออกแบบเพื่อที่จะให้ช่วงความถี่ต่ำ ( $2550-50$  MHz) ผ่านได้ ควรจะมีด้านกว้าง ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ให้ด้านกว้าง} &= 7 \text{ cm}; \lambda_c = 2 \times 7 = 14 \text{ cm.} \\ \lambda_c &= 3 \times 10^8 / 0.14 = 2142 \text{ MHz} \end{aligned}$$

ซึ่งจะได้ คัดออมป์สี่เหลี่ยมซึ่งต่ำกว่าความถี่ของ หลอดแมกนีตรอน และ ให้ความสูงของท่อนำคลื่น = 5 cm.

##### การสร้าง

จะนำแผ่นทองเหลืองมาทำเป็น ดังรูป ก. จากนั้นนำมาบรอะกบกันดังรูป ข.



ซึ่งจะได้เป็นท่อนำคลื่น จากนั้นจะระบุใช้มือตั้นให้เข้ากัน แล้วใช้ตะกั่วลวดรอยต่อที่ไม่สนิทเพื่อ

บ้องกันคลื่นที่อาจรั่วออกมา สาเหตุที่ใช้วิธีดังรูป ก.และข. เนื่องจากตามตลาดไม่มีท่อของ เหลืองที่มีขนาดเหมาะสม

### 3.2 การออกแบบ ไดรเรคชั่นแนล คลັปเบอร์

เราเลือกใช้แบบ MORENO CROSS GUIDE เนื่องจากสามารถทำได้สะดวกขนาดของ main guide และ aux. guide ก็จะมีขนาดเดียวกัน และเท่ากับขนาดของสลอตไลน์ คือ  $7 \times 5$  cm. โดย  $a = 7$  cm. คือความกว้างของท่อ และ  $b = 5$  cm. คือความสูงของท่อ

จากทฤษฎีของท่อนำคลื่น เนื่องจากเราส่งด้วย mode  $TE_{10}$  จะมีค่า (cut off wavelength)  $= 2a$

$$\text{และมี guide wavelength } (\lambda_g) = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_c)^2}}$$

$$\text{ดังนั้น จะหาขนาดของ } \lambda_g \text{ ได้เท่ากับ } = \frac{0.1225}{\sqrt{1 - \left(\frac{0.1225}{2 \times 7 \times 10^{-2}}\right)^2}} = 25.3 \text{ cm}$$

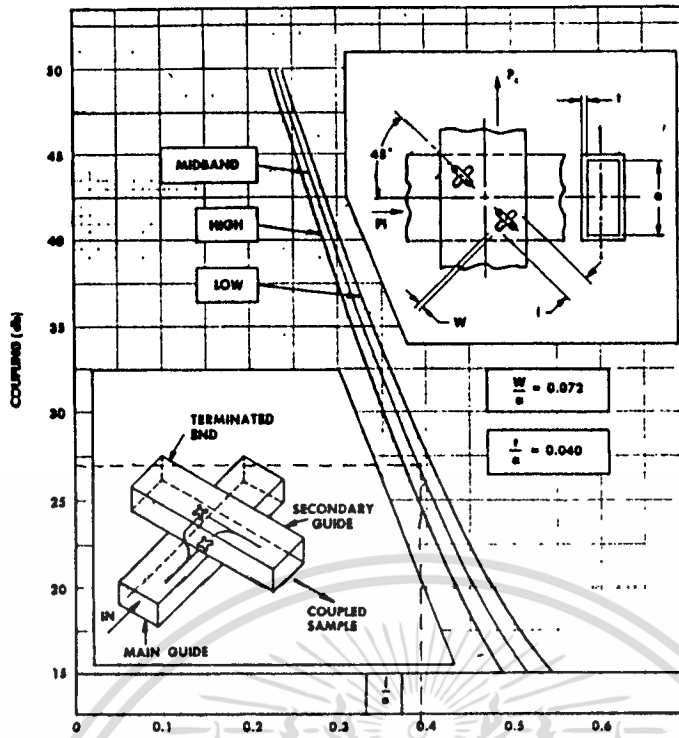
เพราะความถี่ของหลอดแมกนีตรอนที่ใช้คือ 2450 MHz ซึ่งจะได้ความยาวคลื่น  $= 0.1225$  m

จากทฤษฎีของ Moreno Cross Guide จะพบว่า ค่าระยะห่างระหว่าง Slot (รู) คือ 1 จะมีค่าเท่ากับ  $\lambda_g/4$

ดังนั้น ระยะห่างระหว่างรู (1)  $= 25.3/4 = 6.2$  cm.

สำหรับขนาดของความกว้าง และความยาวของรูสลอต จะหาได้จากกราฟ

MORENO CROSS GUIDE DIRECTIONAL COUPLER  
ASPECT RATIO 2:1



เลือกให้คัปเปอร์ทำงานในช่วง midband ค่าคัปปลิงที่ต้องการ คือ เมื่อ Input เข้า มา 500 W ให้คัปปลิงไปสู่เครื่องมือวัดเพียง 1 W ดังนั้น

$$\text{Coupling factor} = 10 \log (500/1) = 27 \text{ dB}$$

จากกราฟค่าคัปปลิง 27 dB จะได้ว่า  $l/a = 0.4$

ซึ่งค่า  $l$  คือความยาวของรูสลอต และ  $a$  คือความกว้างขอกท่อ

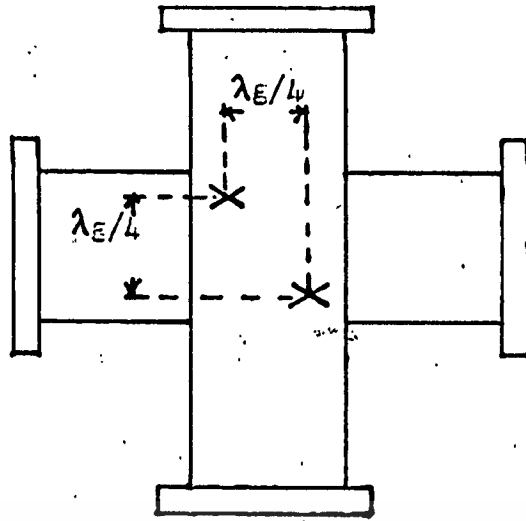
ดังนั้น ความยาวของรูสลอต ( $W$ ) =  $7 \times 0.072 = 0.5 \text{ cm}$ .

ดังนั้น ไตเรคชั่นนัล คัปเปอร์ ที่สร้างจะมีลักษณะดังนี้ คือ

- เป็นแบบ moreno crossguide coupler
- มีคัปปลิง เพคเตอร์ 27 dB
- ระยะห่างระหว่างรูสลอต = 6.2 cm.
- ความยาวของแต่ละรูสลอต = 0.5 cm.

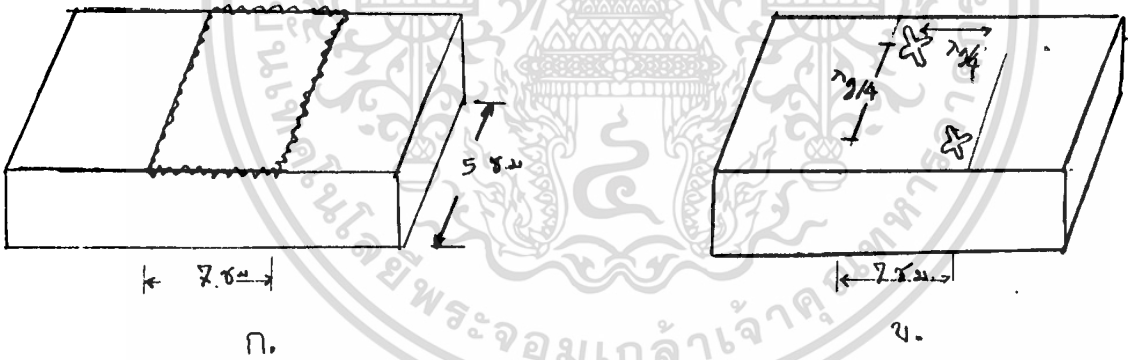
- ความกว้างของแต่ละรูสลอต = 0.5 cm.

-  $1/p$  และ  $o/p$  ของ main guide และ aux. guide จะเป็นแบบ probe coupling โดยมีปลายข้างหนึ่งเป็น Terminated load และมีการปรับ matching Impedance ด้วย สติบ จูเนออร์ 3 ตัว ซึ่งมีความห่าง =  $\lambda_g/8 = 25.3/8 = 3.1 \text{ ซม.}$



การสร้าง

- นำท่อนำคลื่นที่ได้จำนวน 2 ท่อน มาใช้โดยนำ ท่อนำคลื่น a มาบากด้วยดอกกัดแล้วตกแต่งด้วยตะไบ ให้เรียบร้อยดังรูป



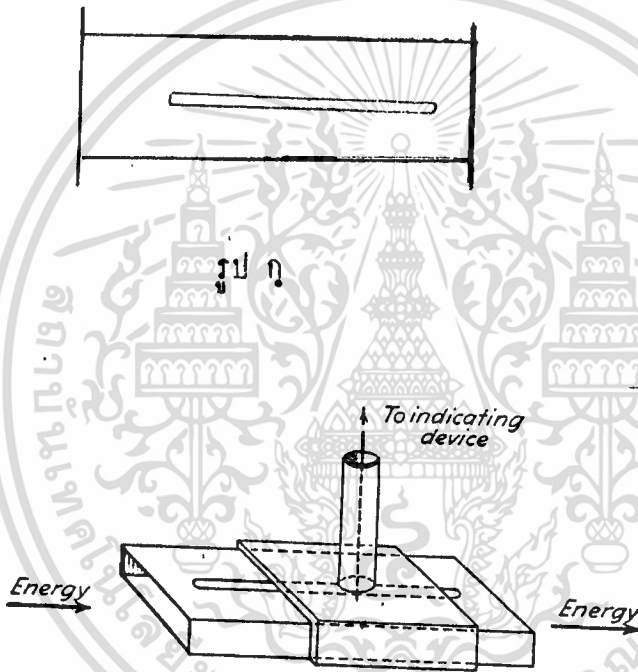
- นำท่อนำคลื่น b มาเจาะเป็นรูปกากบาทตามที่คำนวณตามรูป ข.
- นำท่อ A และ B มาทาบกันให้สนิทแล้วใช้วิธี เชื่อมให้ท่อทั้งสองติดกันให้แน่นอย่าให้มีรอยร้าว เกิดขึ้นดังรูป กวบนบนสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การออกแบบสลิตไลน์

#### การสว่าง

จะนำแผ่นทองเหลือง นำมาเจาะเป็นช่องตามรูป ก. ซึ่งความกว้างของช่อง(d) จะเท่ากับขนาดของหัวกีด ซึ่งจะเท่ากับ 0.3 มม. จากนั้นนำโพรบมาประกอบดังรูป ข. เพื่อจะได้กลับบึงสัญญาณจากสลิตไลน์ เพื่อนำสัญญาณที่ได้ไปผ่านวงจรถอดแอมพลิจูด ดังรูป



รูป ข.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การออกแบบคาร์ตี

เนื่องจากรูปร่างของคาร์ตีนี้ไม่มีทั้งแบบรูปทรงสี่เหลี่ยมและทรงกระบอก ซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน เพื่อให้ง่ายต่อการสร้างจึงเลือกโครงสร้างแบบทรงสี่เหลี่ยม โดยใช้แผ่นทองแดง และกำหนดให้ขนาดของคาร์ตีเป็นดังนี้

ด้านกว้าง (a) = 25 ซม

ด้านยาว (l) = 22.5 ซม

และ ด้านสูง (b) = 30 ซม

ความถี่ที่เราสนใจจะเท่ากับความถี่ที่ออกมาจากหลอดแมกนีตรอน คือ 2450 MHz และจะเลือกโหมดที่ใช้เป็น  $TE_{104}$  โหมด เพราะสามารถคำนวณได้ง่าย

จากสมการ  $\lambda_g = 1 / \sqrt{(m/2a)^2 + (n/2b)^2 + (p/2l)^2}$

แทนค่า  $\lambda_g = 0.1225$  เมตร

จะได้  $n=4$  ดังนั้นจะได้โหมดที่ใช้เป็น  $TE_{104}$

จากสมการค่า  $Q$  ที่ไม่มีภาระของโหมด  $TE_{104}$

$$Q_u = \frac{\pi}{\lambda_g R_c} \frac{ab \{ 1 + (pa/l)^2 \}}{2bl \{ 1 + (a/l)(pa/l)^2 \} + (al) \{ 1 + (pa/l)^2 \}}$$

โดย  $R_s = \frac{\sqrt{\pi f \mu_r \mu_0}}{6}$

ค่า  $\sigma = 5.8 \times 10^7$   $\Omega/m$

$\mu_r = 1$   $H/m$

$\mu_0 = 4 \times 10^{-7}$   $H/m$

$f = 2450$   $MHz$

จะได้  $R_s = 0.013$   $\Omega/cm$

และ  $Q = 377$   $\Omega$

$a = 25$  ซม

$b = 30$  ซม

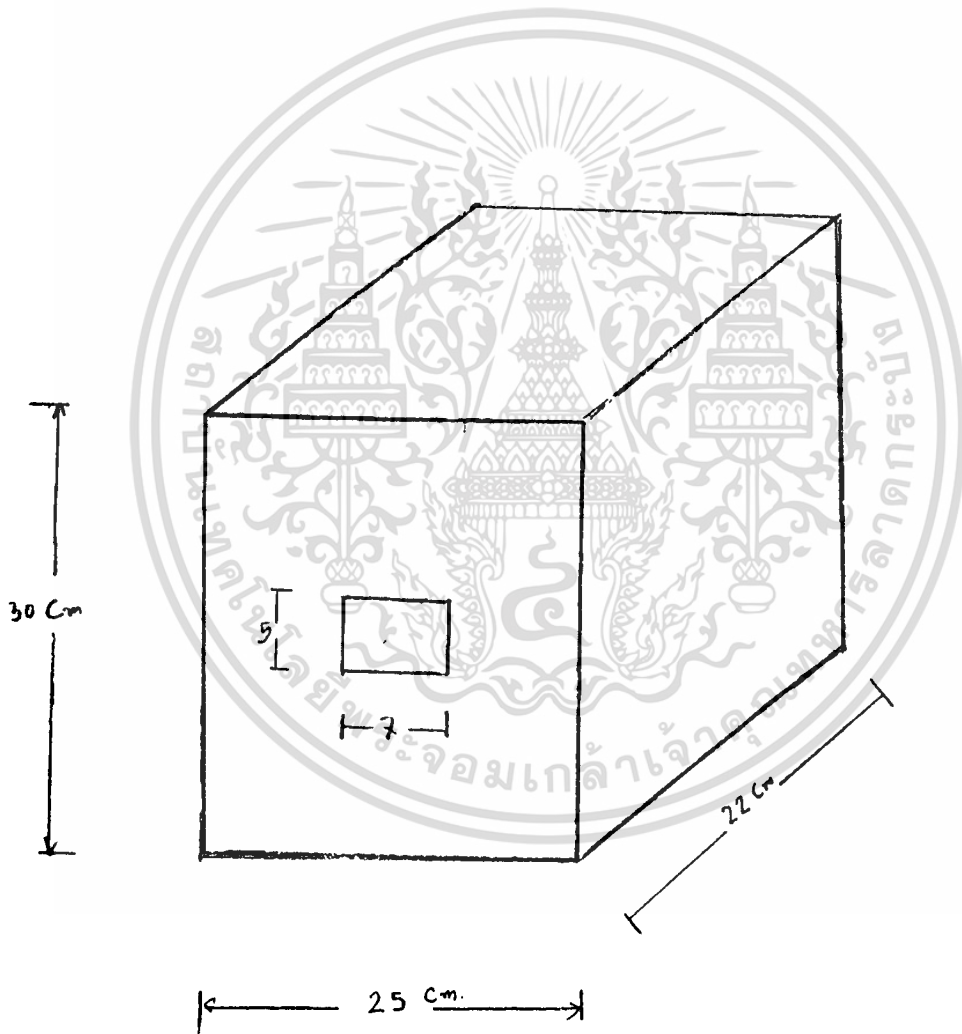
$l = 22.5$  ซม

จะได้ค่า  $Q$  ประมาณ 6,000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การสร้าง

ลักษณะของการสร้างคาร์ต จะเห็นดังรูป



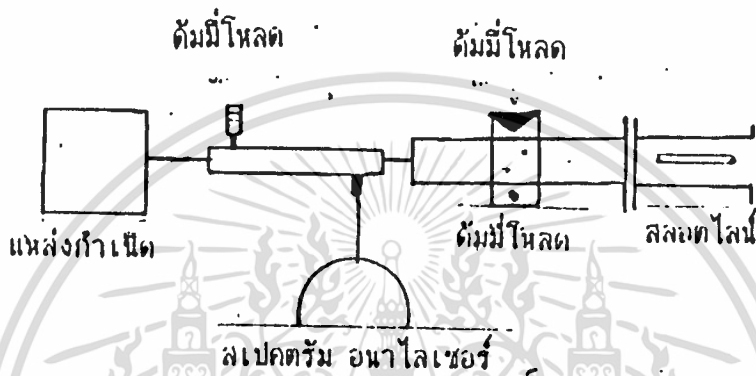
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

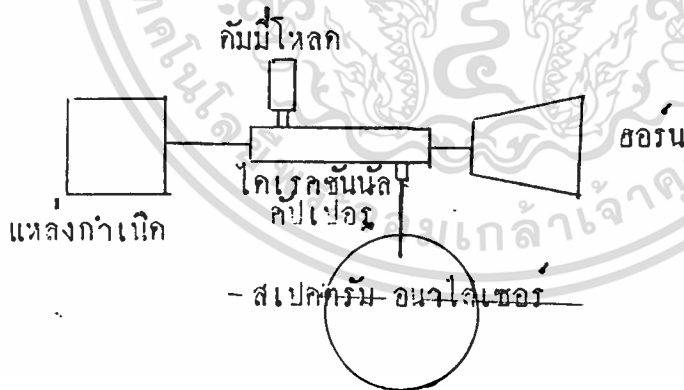
4.1 ท่อนำคลื่น

จากการใช้สเปกตรัม อนุไลเซอร์ วัดพลังงานที่สะท้อนกลับจากการเปิดปลายสายดังรูป  
วัดค่า คัทออฟฟรีควานซ์ ของท่อนำคลื่นได้ = 2.๑5 GHz



4.2 วัดพลังงานที่สะท้อนกลับเมื่อเปิดพลังงานน้อยๆ

ก. เมื่อใส่ฮอร์น ดังรูป



อินพุท = -8 dB

พลังงานสะท้อนกลับเมื่อเปิดปลายสาย = -13 dB

พลังงานสะท้อนกลับจากฮอร์น = -35 dB

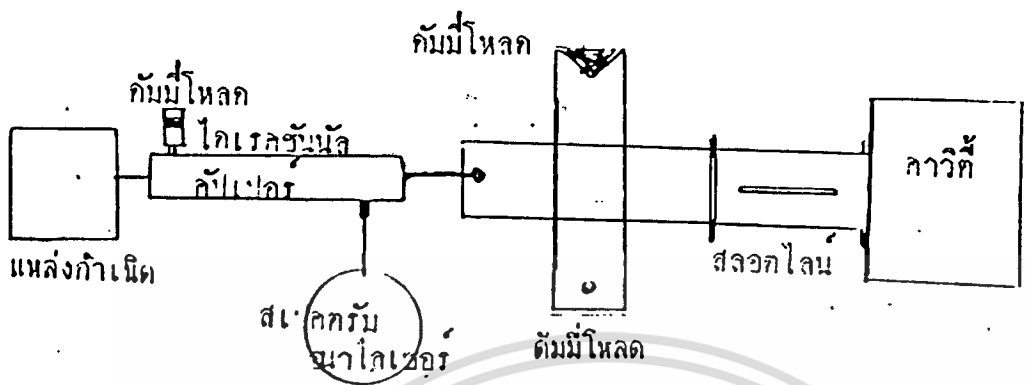
จากสูตร รีเทิร์น ลอส  $R = -20 \log |r|$  จะได้  $R = 35 - 13 = 17$

ดังนั้นจะได้  $|r| = 0.14$  และ จาก  $VSWR = 1 + |r| / 1 - |r|$  จะได้

$VSWR = 1.325$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อที่-46-และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. เมื่อใส่คาร์ที ดังรูป

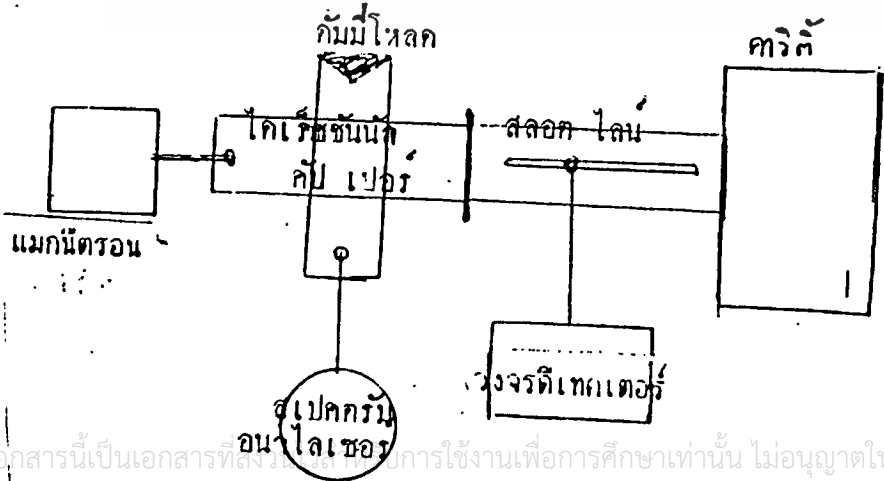


พลังงานสะท้อนกลับเมื่อเปิดสายสาย = -8 dB  
 พลังงานสะท้อนกลับจากรคาร์ที = -20 dB  
 $R = 12$  ,  $|Γ| = 0.25$   
 $VSWR = 1.66$

จากนั้นทำการปรับสกรู รูเนอร์ เพื่อให้ระบบแมทซ์กันมากที่สุดโดยดูจากพลังงานที่สะท้อนกลับให้น้อยที่สุด แล้ววัดค่า

พลังงานสะท้อนกลับเมื่อเปิดสายสาย = -8 dB  
 พลังงานสะท้อนกลับจากรคาร์ที = -40 dB  
 $R = 32$  ,  $|Γ| = 0.025$  ,  $SWR = 1.05$

4.4 วัดพลังงานที่สะท้อนกลับเมื่อป้อนพลังงานมาก โดยทำการทดลองดังรูป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองได้ดังนี้

ก. การทดลองเมื่อคาร์ตี้ไม่มีไหลด

ข. การทดลองเมื่อคาร์ตี้มีไหลด โดยใช้ น้ำ เป็นตัวขับเคลื่อนพลังงาน

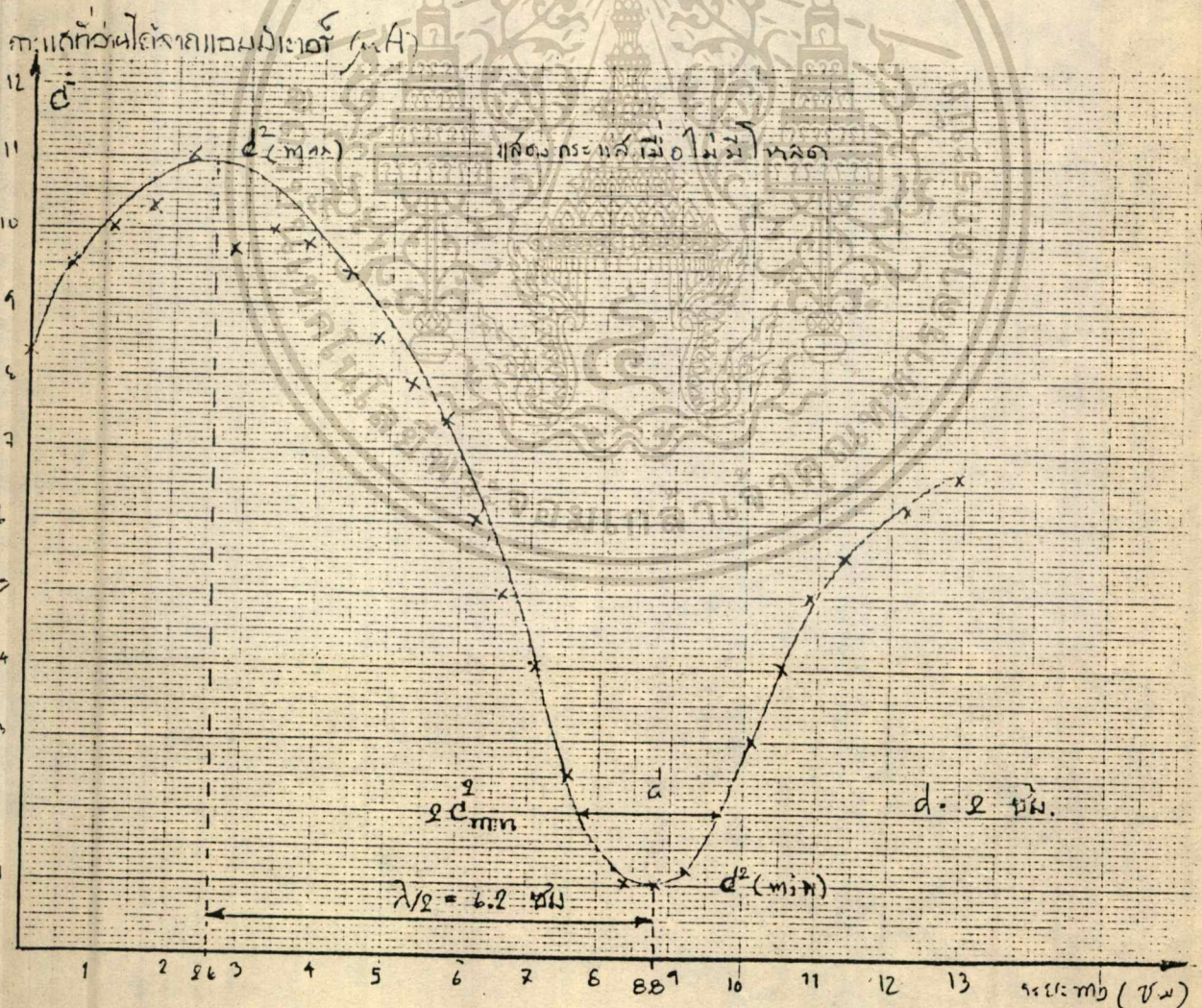
ครั้งที่	ระยะทาง(ซ.ม.)	กระแสที่อ่านได้จากสล็อตไลน์	
		มีไหลด	ไม่มีไหลด
1	0	2	8.3
2	0.6	2.5	9.5
3	1.15	2.9	10.0
4	1.7	3	10.3
5	2.2	3.2	11
6	2.5	3.4	9.7
7	2.8	3.5	10.0
8	3.35	3.4	9.8
9	4.4	3.3	9.4
10	4.8	3.3	8.5
11	5.3	3.4	7
12	5.8	3.3	7.4
13	6.2	3.2	6
14	6.6	2.6	5
15	7.1	2.2	4
16	7.5	2	2.5
17	7.9	1.8	1.5
18	8.4	1.3	1
19	8.8	1	1
20	9.2	1	1.2
21	9.65	1	22
22	10.1	1.2	3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสที่อ่านได้จากสล็อตไลน์

ครั้งที่	ระยะทาง(ซ.ม.)	มีโหลด	ไม่มีโหลด
23	10.5	1.4	4
24	10.9	1.5	5
25	11.4	1.7	5.5
26	11.8	2	5.8

ในการทดลองวัดการคับปลิง วัดเมื่อมีโหลด = 14 dB และ เมื่อไม่มีโหลด = 10 dB  
จากนั้นนำค่ากระแสที่ได้จากตาราง ไปคำนวณหาค่า SWR จากกราฟนี้ได้ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
รูปแสดงกระแสเมื่อควิตีไม่มีโหลด

หาค่าแอมพลิจูดของกระแสไฟฟ้าด้วยวิธีวัดเข็มมิเตอร์

$$\text{จากสมการ } VSWR = (2 - \cos^2(\pi d/\lambda)) / \sin^2(\pi d/\lambda)$$

เมื่อไม่มีโหนด จากกราฟ

$$d = 2 \text{ ซม. และ } \lambda = 6.2 * 2 = 12.4 \text{ ซม.}$$

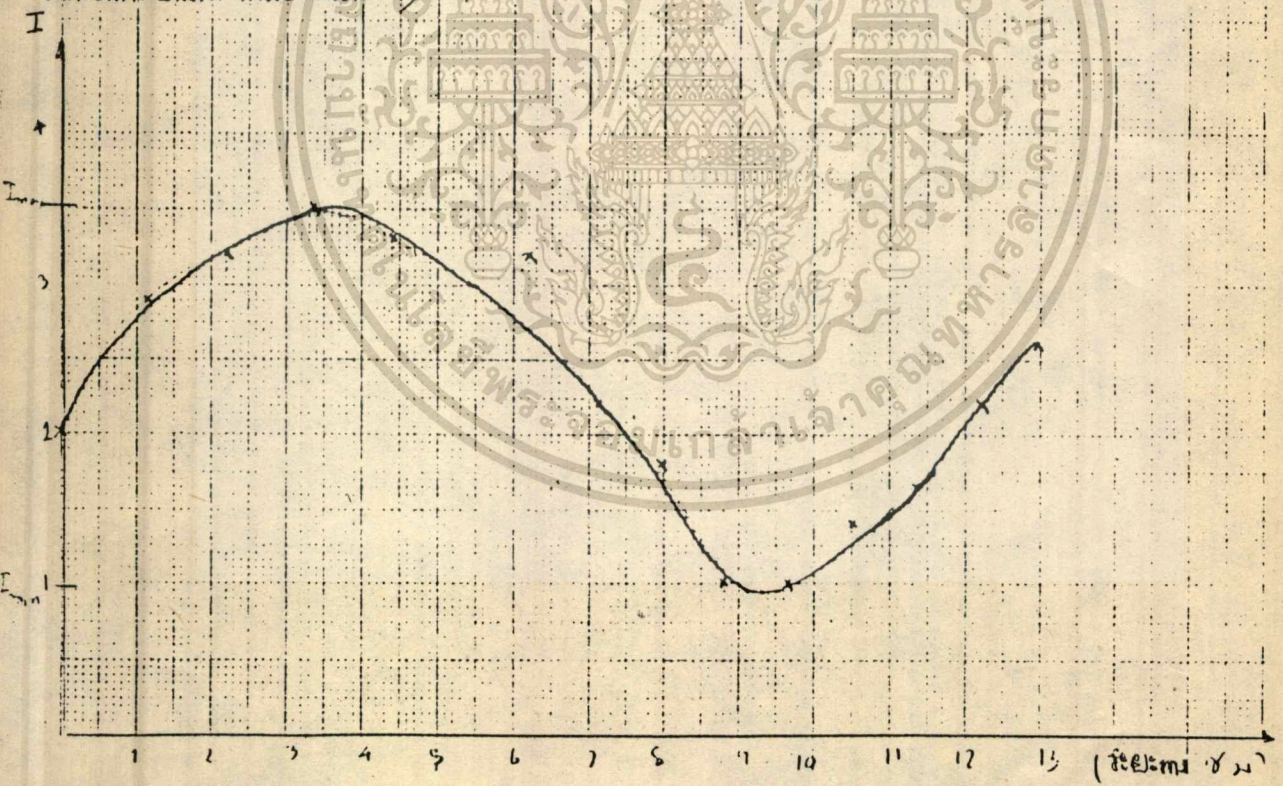
$$\text{จะได้ } VSWR = (2 - \cos^2(\pi * 2 / 12.4)) / \sin^2(\pi * 2 / 12.4) = 5.25$$

เมื่อมีโหนด จากกราฟ

$$i_{max} = 3.4 \text{ และ } i_{min} = 1$$

$$\text{จะได้ } VSWR = \sqrt{i_{max} / i_{min}} = \sqrt{3.4 / 1} = 1.84$$

ค่ากระแสที่อ่านได้จากแอมมิเตอร์ (mA)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

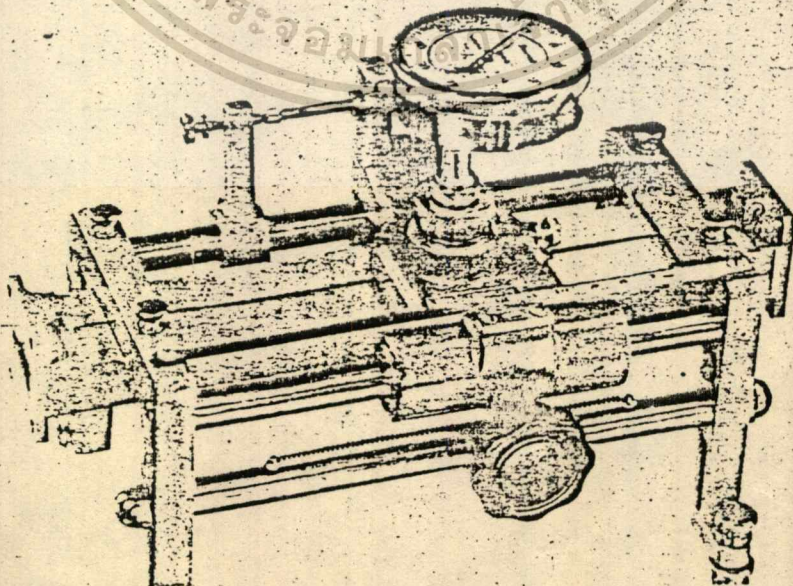
### บทวิจารณ์และสรุป

จากโครงการที่ทำมา สามารถกล่าวได้ว่าโครงการนี้จะทำการออกแบบอุปกรณ์ช่วยในการวัดค่าต่างๆซึ่งจะเป็นตัวบอกคุณสมบัติของเตาอบไมโครเวฟและออกแบบควิตี้ เนื่องจาก การสร้างอุปกรณ์นั้น ผู้ทำโครงการได้เป็นผู้สร้างขึ้นเอง อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นนี้อาจไม่ประณีต มากนัก ซึ่งสรุปปัญหาที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

1. ในการเจาะช่องสล็อตของไดเรกชันนัล คัปเปิลอร์ เนื่องจากไม่มีดอกกัดที่มีขนาดเท่ากับช่องตามที่ต้องการ ออกแบบไว้ ดังนั้นจึงหาดอกกัดที่มีขนาดเล็กกว่ามากัด แล้วค่อยใช้กระดาษทรายขัดให้ช่องมีขนาดตามที่ต้องการซึ่งจะได้ขนาดที่ใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้ และเนื่องจากตารางที่ใช้ ออกแบบมีค่า ความกว้าง:ความสูง เท่ากับ 2:1 แต่ก่อนนำคลื่นที่ใช้มีอัตราส่วน 7:5 ดังนั้น ค่าที่ต้องการคัปปลิ่ง จึงได้ค่าประมาณคร่าวๆ

2. การสร้างตัวมีโหนดนั้น เราไม่อาจบอกได้ว่าตัวมีโหนดที่สร้างขึ้นนี้มีคุณสมบัติที่จะดูดซับคลื่นได้ดีเพียงใด แต่สรุปได้ว่าเมื่อใช้งาน ไม่ได้สึกกร่อนแล้ว หากตัวมีโหนดอ่อนขึ้นกว่าเดิมแล้วแสดงว่ามีคุณสมบัติเป็นตัวมีโหนดได้

3. การเลื่อนของโพรบที่สล็อตไลน์มักไม่ค่อยราบเรียบ เนื่องจากพื้นผิวระหว่างโพรบกับสล็อตไลน์ไม่เรียบ ทำให้สัมประสิทธิ์การคัปปลิ่งในแต่ละจุดไม่คงที่ เกิดการคลาดเคลื่อนในการอ่านค่าของสัญญาณ แต่สามารถแก้ไขโดยการออกแบบระบบขึ้นใหม่ดังรูป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

4. วงจรดีเทคเตอร์ที่สร้างขึ้นมา สามารถทำงานได้ตามที่ต้องการ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ผลของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เนื่องจากสายแแกนร่วมที่ใช้ต่อระหว่าง หลอดแมกนีตรอน กับ ไดเรคชั่นัล คัปเปิลอร์ มีความทนต่อโวลท์เตจ (BREAK DOWN VOLTAGE) ได้น้อยเมื่อใช้งานจะทำให้สายแแกนร่วม ร้อน อาจทำให้สายแแกนร่วมไหม้ ดังนั้นจึงควรใช้สายแแกนร่วมให้มีความทนต่อโวลเตจให้สูงขึ้น

6. ผลการทดลองของเตาอบไมโครเวฟที่สร้างขึ้น สามารถสรุปได้ว่าเตาอบไมโครเวฟที่ สร้างขึ้นสามารถใช้งานได้จริงแต่ค่า VSWR ค่อนข้างมาก ดังนั้นควรทำการปรับสกรู จูนเนอร์ ใหม่ จากการทดลองปรับสกรู จูนเนอร์ที่กำลังน้อยๆ ได้ค่า VSWR ประมาณ 1 แต่เมื่อมาใช้กับ กำลังมากๆ แล้วค่า VSWR เปลี่ยนแปลง อาจเนื่องมาจากคุณสมบัติของสายแแกนร่วมเปลี่ยนแปลง เพราะมีความร้อนเกิดขึ้นมาก

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าโครงการนี้สามารถใช้งานได้จริง โดยจากการทดลองโดยใช้น้ำ ใส่ไว้ในควาวิต้ จะพบว่าน้ำจะร้อนจนกลายเป็นไอ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Diodes

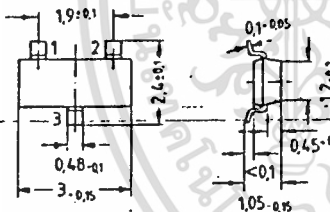
### Dual diodes

Type	$V_H$ V	$V_I$ $I_f = 200$ mA V	$I_R$ at $V_H$ $\mu$ A	$t_{rr}$ $\mu$ s	Pin configuration No.	Ordering code	Min. qty.				
								to 499	500 to 999	1000 to 2999	3000 to 9999
BAV 99 <sup>1)</sup>	70	$\leq 0,71$	$\leq 2,5$	$\leq 6$	4	Q68000-A549	100				
BAW 56 <sup>2)</sup>	70	$\leq 0,71$	$\leq 2,5$	$\leq 6$	3	Q62702-A688	100				

### Planar switching diodes

Type	$V_H$ V	$I_f$ mA	$P_{tot}$ mW	$t_{rr}$ ns	Pin configuration No.	Ordering code	Min. qty.				
								to 499	500 to 999	1000 to 2999	3000 to 9999
▼ BAL 74 <sup>1)</sup>	50	150	180	$\leq 2$	1	Q62702-A718	100				
▼ BAR 74	50	150	180	$\leq 2$	2	Q62702-A704	100				

### BAV 99, BAW 56, BAL 74, BAR 74 Plastic package SOT 23 (TO 236)



Pin configuration	
1	
2	
3	
4	

- <sup>1)</sup> Code letter "A7" or "JE".  
<sup>2)</sup> Code letter "A1" or "JD".

Dimensions in mm

Minimum order quantity!

1.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจากอาจารย์  
สมพล โกศลย์วิตร ซึ่งได้กรุณาให้แนวคิด และคำแนะนำต่างๆ ให้ผู้จัดทำ ตลอดจนช่วยเหลือให้  
โครงการนี้ลงไปด้วยดี และขอบคุณเพื่อนๆ ที่ช่วยพิมพ์ปริญญาโทฉบับนี้ให้สำเร็จ

ผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

- 1 สมพล โกศลย์วีตร์ , "ไมโครเวฟ" , คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง .
2. Victor F.veley. , "MODERN MICROWAVE TECHNOLOGY" ,  
Prentice-Hall , Inc , N.J. , 1987.
3. N.Marcuvitz. , "Wave Guide Handbook" , Peter Peregrinus Ltd ,  
London , 1986
- 4 J.Francis Reintjes , "Principle Of Radar" , McGRAW-HILL , Inc ,  
1952 .
5. Peter A.Rizzi , "MICROWAVE ENGINEERING" , Prentice-Hall ,  
Inc , N.J. , 1988.

