

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

สายอากาศแผ่นแบบโมนอลิธิกริบนวัสดุฐานรองซิลิคอน

สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ไร้สายแบบใหม่

A MONOLITHIC PATCH ANTENNA ON SIILICON SUBSTRATE

FOR MODERN WIRELESS APPLICATIONS



เลขหมู่.....**83245**  
เลขทะเบียน.....  
วัน,เดือน,ปี. **11 ส.ค. 2551**

b. **11ค ๖ ๒๕๕๑**  
i. ....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A MONOLITHIC PATCH ANTENNA ON SILICON SUBSTRATE  
FOR MODERN WIRELESS APPLICATIONS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR IN DEPARTMENT OF INFORMATION ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
2007

หัวข้อปริญญาโท สาขาอากาศผ่านแบบโมโนลิทริก บนวัสดุฐานรองซิลิคอนสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ไร้สายแบบใหม่

ชื่อนักศึกษา นายพงศ์ภวัน หิรัญลักษณ์ รหัสประจำตัว 48015767  
นายรัชฎ ชันมะเวส รหัสประจำตัว 48015772  
นายอำนาจ สาครพานิช รหัสประจำตัว 48015781

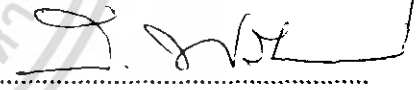
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์สถาพร พรหมวงค์  
ผศ. พิชญ์ สุพรรณกุล

ระดับการศึกษา ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ

ภาควิชา วิศวกรรมสารสนเทศ

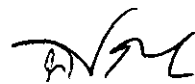
ปีการศึกษา 2550

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับการอนุมัติเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



(อาจารย์สถาพร พรหมวงค์)

อาจารย์ที่ปรึกษา



(ผศ.พิชญ์ สุพรรณกุล)

(อาจารย์ที่ปรึกษา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์ สายอากาศแผ่นแบบ โมโนลิทริก บนวัสดุฐานรองซิลิคอนสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ไร้สายแบบใหม่

ชื่อนักศึกษา นายพงศ์ภวัน หิรัญลักษณ์ รหัสประจำตัว 48015767  
นายรชฏ ชันมะเวส รหัสประจำตัว 48015772  
นายอำนาจ สาครพานิช รหัสประจำตัว 48015781

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์สถาพร พรหมวงศ์  
ผศ. พิชญ สุพรรณกุล

ระดับการศึกษา ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ

ภาควิชา วิศวกรรมสารสนเทศ

ปีการศึกษา 2550

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้นำเสนอสายอากาศแผ่นแบบ โมโนลิทริกบนวัสดุฐานรองซิลิคอนสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ไร้สายแบบใหม่ ในวัสดุฐานรองซิลิคอนซึ่งถูกโคปด้วยทองคำบริสุทธิ์ที่ความร้อนสูงทำให้มีคุณสมบัติสภาพความต้านทานสูงจึ้นจากซิลิคอนบริสุทธิ์ ซึ่งเป็นวัสดุฐานรองใหม่สำหรับสายอากาศแผ่นแบบ โมโนลิทริก และเป็นวัสดุฐานรองที่มีคุณสมบัติดีสำหรับสายอากาศแผ่นแบบโมโนลิทริกอีกทั้งยังง่ายต่อการสร้างเข้าด้วยกันกับวงจรรวมแอกทีฟนอกจากนี้แล้ววัสดุฐานรองซิลิคอนยังมีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ ( $\epsilon_r$ ) สูง ทำให้สามารถสร้างสายอากาศให้มีขนาดเล็กได้ ดังนั้นสามารถพัฒนาสร้างเป็นสายอากาศรวมแบบแอกทีฟ รวมทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับวงจรรวมย่านไมโครเวฟแบบโมโนลิทริก (MMIC) ในงานนี้จะอธิบายทฤษฎีและหลักการที่ใช้และทำการวัดคุณสมบัติการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ได้สร้างขึ้นย่านความถี่เอกซ์ (10 GHz) เปรียบเทียบกับทฤษฎีรวมทั้งเหตุผลของความแตกต่างระหว่างแบบรูปที่ได้จากการวัดกับทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	A Monolithic Patch Antenna on Silicon Substrate for New Wireless Applications		
<b>Student</b>	Mr. Pongphawan	Hirunlacksana	ID. 48015767
	Mr. Rachot	Chanmawes	ID. 48015772
	Mr. Amnat	Skhonpanit	ID. 48015781
<b>Advisor</b>	Mr. Sathaporn	Promwong	
	Asst. Prof. Pichaya	Supanakoon	
<b>Graduate Level</b>	Bachelor Degree of Information Engineering		
<b>Department</b>	Information Engineering		
<b>Academic Year</b>	2007		

### ABSTRACT

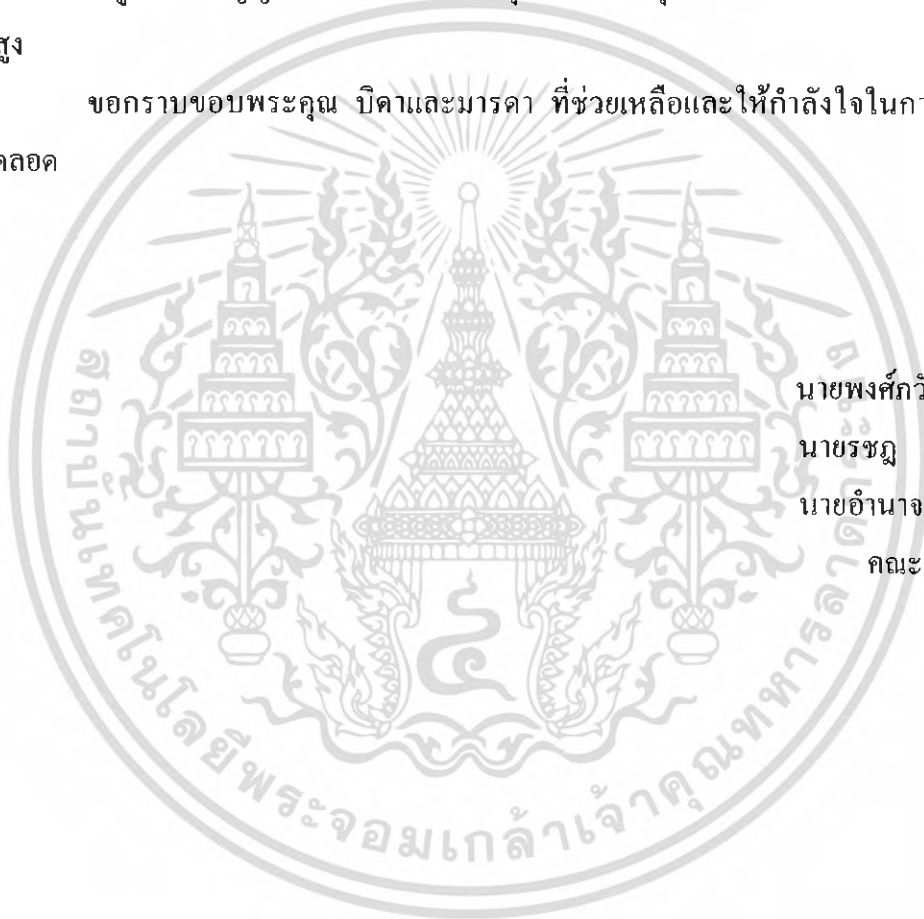
This thesis presents a monolithic patch antenna on silicon substrate for modern wireless applications. Silicon substrate doped with pure gold at high temperature is a new substrate enhancing the resistivity of the monolithic patch antenna. This substrate yields good performance for the monolithic patch antenna and it is easy to fabricate with the active integrated antenna. In addition, a small antenna having high permittivity ( $\epsilon_r$ ) silicon substrate can be applied to monolithic microwave integrated circuit (MMIC). Theory and the measurement for the dispersion characteristic of the fabricate antenna for X-band (10 GHz) was show in the thesis. The measurement results compared with the theoretical ones were demonstrated as well.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยคำชี้แนะแนวทางการทำงานพร้อมทั้งการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในการดำเนินงาน

จากท่าน อาจารย์สถาพร พรหมวงศ์ และ ผศ.พิชญ์ สุพรรณกุล อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูง ที่ได้ช่วยกรุณาให้คำแนะนำ ชี้แนวทางในการแก้ปัญหาผู้ซึ่งเป็นอาจารย์ควบคุมปริญญานิพนธ์ทางผู้จัดทำปริญญานิพนธ์ ขอขอบพระคุณในความกรุณาทั้งหมดที่มีให้ด้วยความเคารพอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ บิดาและมารดา ที่ช่วยเหลือและให้กำลังใจในการทำงานมาโดยตลอด



นายพงศ์กวัน หิรัญลักษณ์  
นายรัชฎ์ ชันมะเวส  
นายอำนาจ สาครพานิช  
คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฉ
สัญลักษณ์	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์ในการทำปฏิญานิพนธ์	2
1.3 หลักการใหม่ในปฏิญานิพนธ์	2
1.4 โครงประกอบของปฏิญานิพนธ์	3
บทที่ 2 สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป	5
2.1 บทนำ	5
2.1.1 ข้อดีและข้อเสียของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป	6
2.1.2 การนำไปประยุกต์ใช้งาน	7
2.2 คุณสมบัติพื้นฐานของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป	7
2.3 การป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป	9
2.4 การแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป	12
2.5 ตัวแปรแสดงคุณสมบัติ (quality factor) แบนด์วิดท์ และประสิทธิภาพ	12
2.6 ประยุกต์ใช้ไร้สาย	16
2.6.1 สเตปครัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	17
2.6.2 รูปแบบการเชื่อมต่อของระบบเครือข่ายไร้สาย	18
2.6.2.1 Multiple access points and roaming	18
2.6.2.2 Use of an Extension Point	18
2.6.2.3 The Use of Directional Antennas	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.6.3 เทคโนโลยี RFID	19
2.6.3.1 ประเภทของ RFID tags	20
2.6.3.2 องค์ประกอบของระบบ RFID	20
2.6.3.3 การประยุกต์ใช้ RFID ในปัจจุบัน	21
2.7 บทสรุป	22
บทที่ 3 ทฤษฎีซีลิกอนโคปทองคำ	23
3.1 บทนำ	23
3.2 ทฤษฎี	23
3.2.1 สัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมทองคำในซีลิกอน	24
3.2.2 ระดับพลังงานของอะตอมทองคำในซีลิกอน	27
3.2.3 ค่าพิกัดความต้านทานของซีลิกอนที่ถูกแพร่ด้วยทองคำ	28
3.3 การวัดพารามิเตอร์ของวัสดุฐานรองซีลิกอนโคปทอง	29
3.3.1 การวัดค่าพิกัดความต้านทาน	29
3.3.2 การวัดค่าความต้านทานแผ่น	31
3.4 สรุป	33
บทที่ 4 การวิเคราะห์และการออกแบบ	34
4.1 กล่าวนำ	34
4.2 การวิเคราะห์ด้วยเกมจำลองควาวิดี	34
4.3 การวิเคราะห์ด้วยวิธีโมเมนต์	49
4.3.1 ควอไซกรีนฟังก์ชัน	49
4.4 การสูญเสียในวัสดุฐานรองซีลิกอนโคปทองคำ	52
4.5 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่น	54
4.6 ขั้นตอนการออกแบบ	56
4.7 สรุป	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 5 กระบวนการสร้างสายอากาศ	66
5.1 กระบวนการสร้างของสายอากาศ	67
5.1.1 ขั้นตอนการเตรียมกระจกต้นแบบ	67
5.1.2 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นซิลิกอน	68
5.1.3 การเคลือบสารทองคำด้วยวิธีการระเหยในสุญญากาศ	68
5.1.4 การแพะอะคอมทองคำ	71
5.1.5 ขัดผิวทองคำเศษทองคำ (Au Lapping)	71
5.1.6 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี	71
5.1.7 การฉายแสง UV	73
5.1.8 การล้างสารไวแสงส่วนที่ถูกแสงออก	73
5.1.9 การเคลือบสารทองคำบนลวดลาย	74
5.1.10 การลอกฟิล์มด้วยวิธีการ Lift off	74
5.1.11 การซินเตอร์ (Sintering)	75
5.1.12 การเชื่อมเข้ากับตัวต่อ	75
5.2 สรุป	75
บทที่ 6 การทดลองและผลการทดลอง	76
6.1 การทดลองและผลการทดลองของสายอากาศไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองซิลิกอนไดออกไซด์	76
6.1.1 การทดลองวัดพารามิเตอร์ของชั้นสาร	76
6.1.2 การทดสอบความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศ	77
6.1.3 การทดสอบแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น	79
บทที่ 7 บทสรุป	83
เอกสารอ้างอิง	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
ภาคผนวก ก การคำนวณขนาดของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า	88
ภาคผนวก ข การสร้างสายอากาศแผ่นแบบโมนอลิทริกบนวัสดุฐานรองซิลิคอน	90
ภาคผนวก ค การวัดหาค่าพิกัดความต้านทาน	97



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบสายอากาศที่มีโครงสร้างเป็นระนาบเรียบชนิดต่างๆ	5
3.1 ค่า correction สำหรับโพร์พอยท์โพรบ เมื่อใช้วัดแผ่นบาง	32
3.2 Correction factor ของ $\rho$ เมื่อ $t$ ไม่น้อยกว่า S มาก	33
4.1 แสดงผล simulation	62
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตอิมพีแดนซ์ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ และความถี่	63



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 สายอากาศไมโครสตริปและระบบพิกัด	8
2.2 รูปร่างของแผ่นสายอากาศไมโครสตริปแบบต่าง ๆ	9
2.3 การป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศไมโครสตริป	10
2.4 วงจรสมมูลของการป้อนสัญญาณตามรูปที่ 2.3	11
2.5 ประสิทธิภาพและแบนด์วิดท์ต่อความสูงของวัสดุรองรับที่ความถี่ไอโซเนนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยใช้วัสดุรองรับที่แตกต่างกัน 2 ชนิด	15
2.6 แสดงสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	17
2.7 แสดงการทำงานแบบ Multiple access point and roaming	18
2.8 แสดงการทำงาน แบบการใช้ Extension Point	19
2.9 แสดงการทำงานแบบการใช้ Directional Antennas	19
3.1 ตัวอย่าง โครงสร้างซิลิคอน โปทองคำ	24
3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมของธาตุชนิดต่าง ๆ	25
3.3 การแพร่ของอะตอมทองคำเข้าไปอยู่ระหว่างอะตอมซิลิคอน	26
3.4 Solid Solubility ของสารเจือชนิดต่าง ๆ ในซิลิคอน	26
3.5 ไดอะแกรมระดับพลังงานของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมทองคำ	27
3.6 การวัดค่าพิกัดความต้านทาน โดยวิธีโพรมิทธิโพรบ	30
4.1 การแผ่กระจายประจุและความหนาแน่นของกระแสบนแผ่นสายอากาศไมโครสตริป	35
4.2 โครงสร้างทางเรขาคณิตของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า	36
4.3 โครงสร้างของสนามสำหรับสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า	41
4.4 ความหนาแน่นกระแสสมมูลบนด้านทั้ง 4 ของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า	42
4.5 ร่องสำหรับแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและกระแสแม่เหล็กสมมูล	44
4.6 แบบรูปในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสำหรับแผ่นไมโครสตริปร่องเดี่ยวและทั้งสองร่อง	45
4.7 ความหนาแน่นกระแสบนร่องที่ไม่มีกระแสกระจายคลื่นสำหรับสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า	45
4.8 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปและวัสดุรองรับ	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.9 องค์ประกอบ Q เปรียบเทียบกับสภาพความต้านทานของวัสดุฐานรอง	54
4.10 แบบรูปการแผ่กระจายสนามไฟฟ้าบนวัสดุฐานรองที่ $\rho$ ต่างกัน	55
4.11 สัมประสิทธิ์การสะท้อนบนวัสดุฐานรองที่ $\rho$ ต่างกัน	55
4.12 อัตรายายของสายอากาศและประสิทธิภาพเทียบกับสภาพความต้านทาน	56
4.13 โครงสร้างของสายอากาศแผ่น	58
4.14 โครงสร้างในส่วนของแมตซ์ซิ่ง	58
4.15 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศเมื่อนำสายอากาศแผ่นมารวมเข้ากับวงจรในส่วน ของแมตซ์ซิ่งเรียบร้อยแล้ว	59
4.16 ขนาดของสายอากาศและส่วนแมตซ์ซิ่งหลังการออกแบบเรียบร้อยแล้ว	61
4.17 $S_{11}$ ที่ได้จากโปรแกรมโมเมนตัม	62
4.18 VSWR จากโปรแกรมโมเมนตัม	62
5.1 กระจกมาร์ก	67
5.2 กระบวนการสร้างของสายอากาศ	69
5.3 ภาพตัดขวางแผ่นผลึกซิลิคอน	70
5.4 ภาพตัดขวางการเคลือบสารทองคำ	70
5.5 ภาพตัดขวางการแพร่อะตอมทองคำลงในแผ่นผลึกซิลิคอน	71
5.6 ภาพตัดขวางหลังการ Lapping	71
5.7 ขั้นตอนขบวนการโฟโตลิโทกราฟี	72
5.8 ภาพตัดขวางหลังจากเคลือบสารไวแสง	73
5.9 ภาพตัดขวางขั้นตอน Exposure	73
5.10 ภาพตัดขวางหลังจาก Developer	73
5.11 ภาพตัดขวาง Au Evaporation	74
5.12 ภาพตัดขวางของชิ้นงานที่ได้หลังจากการลอกฟิล์มออกแล้ว	74
5.13 ชิ้นงานเมื่อทำการลอกฟิล์มแล้ว	74
5.14 โครงสร้างภาพตัดขวางของสายอากาศที่ได้หลังการ Bonding	75
6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นที่เติมอะตอมทองคำ โคปทองคำ	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
6.2	77
6.3	78
6.4	79
6.5	80
6.6	81
6.7	82



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สัญลักษณ์ (List of Symbol)

สัญลักษณ์	ความหมาย
$A, \bar{A}$	Vector magnetic potentials (ศักย์แม่เหล็กเวกเตอร์)
$BW$	Bandwidth (ความกว้างแถบ)
$D, D_w$	Directivities (สภาพเจาะจงทิศทาง)
$E$	Electric field (สนามไฟฟ้า)
$E_\rho, E_\theta, E_\phi$	Components of E (องค์ประกอบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า)
$F$	Vector electric potentials (ศักย์ไฟฟ้าเวกเตอร์)
$F_\rho, F_\theta, F_\phi$	Frequencies (ความถี่)
$f_c$	Cut off frequency (ความถี่ตัด)
$f_r$	Resonant frequency (ความถี่เรโซแนนซ์)
$f(\theta, \phi)$	Element pattern (แบบรูปองค์ประกอบ)
$G$	Green's function (กรีนฟังก์ชัน)
$G_a, G_w$	Conductance (ความนำ)
$G_d, G_e, G_s$	Gains (อัตราขยาย)
$g$	Conductance (ความนำ)
$g_{12}$	Mutual conductance (ความนำร่วม)
$H$	Magnetic field (สนามแม่เหล็ก)
$H, H^e(r), H^m(r)$	Magnetic field vectors (เวกเตอร์สนามแม่เหล็ก)
$H_\theta, H_\phi, H_\rho, H_\eta$	Components of H (องค์ประกอบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า)
$h$	Substrate thickness (ความหนาของวัสดุฐานรอง)
$j, j_c$	Electric current densities (ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า)
$K_{nm}$	Normalized wave number (จำนวนคลื่นแบบนอร์มัลไลซ์)
$K, K_n, K_{mn}, K_{nm}$	Wave numbers (จำนวนคลื่น)
$k_0$	Free-space wave number (จำนวนคลื่นอวกาศว่าง)
$L_p$	Length of the microstrip antenna (ความยาวของสายอากาศแบบไมโครสตริป)
$MA$	Microstrip antenna (สายอากาศแบบไมโครสตริป)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สัญลักษณ์(ต่อ)

### สัญลักษณ์

### ความหมาย

$MPA$	Microstrip patch antenna (สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป)
$Q$	Quality factor (ตัวประกอบคุณภาพ (Q))
$Q_r$	Total quality factors (ตัวประกอบคุณภาพทั้งหมด)
$Q_c, Q_d, Q_s$	Various quality factors (ตัวประกอบคุณภาพที่ต่างกัน)
$S$	VSWR (Voltage standing – wave ratio) (อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน)
$TEM$	Transverse electromagnetic (แม่เหล็กไฟฟ้าตามขวาง)
$t$	Strip thickness (ความหนาस्टริป)
$\tan \delta$	Loss tangent of dielectric material (แทนเจนต์การสูญเสียของวัสดุไดอิเล็กตริก)
$W_p$	Width of microstrip antenna (ความกว้างสายอากาศแบบไมโครสตริป)
$Z_{in}$	Input impedance (อิมพีแดนซ์ก้านเข้า)
$\epsilon$	Permittivity (สภาพยอม)
$\epsilon_{eff}$	Effective relative permittivity (สภาพยอมสัมพัทธ์ประสิทธิผล)
$\epsilon_r$	Relative permittivity (สภาพยอมสัมพัทธ์)
$\epsilon_0$	Free-space permittivity (สภาพยอมในอวกาศว่าง)
$\gamma$	Propagation constant (ค่าคงตัวการแพร่กระจาย)
$\lambda_m$	Wavelength in microstrip (ความยาวคลื่นในไมโครสตริป)
$\lambda_g$	Wavelength in waveguide (ความยาวคลื่นในท่ลวดคลื่น)
$\lambda_0$	Free-space wavelength (ความยาวคลื่นในอวกาศว่าง)
$\mu$	Permeability (สภาพคล่องตัว)
$\mu_0$	Free-space permeability (สภาพความคล่องตัวในอวกาศว่าง)
$\Gamma, \Gamma_{mn}$	Reflection coefficients (สัมประสิทธิ์การสะท้อน)
$\sigma$	Conductance (ความนำ)
$\Omega$	Ohms (โอห์ม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สัญลักษณ์(ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
$\phi$	Electrostatic Potential Azimuth angle (มุมแอซิมัททิศย์ไฟฟ้าสถิต)
$\theta$	Angle (มุม)
$C$	ความเร็วคลื่นแสง
$D$	ค่าคงที่การแพร่
$D$	สัมประสิทธิ์การแพร่
$E$	พลังงาน
$E_A$	ระดับพลังงานผู้รับ
$E_a$	ระดับพลังงานผู้รับ
$E_C$	พลังงานของแถบความนำ
$E_D$	ระดับพลังงานผู้ให้
$E_d$	ระดับพลังงานผู้ให้
$E_i$	ระดับพลังงานกึ่งกลางช่องว่าง
$E_F$	ระดับพลังงานเฟอร์มิ
$E_{FAu}$	ระดับพลังงานเฟอร์มิเมื่อเติมทองคำ
$E_{FP}$	ระดับพลังงานเฟอร์มิของสารชนิดพี
$E_{fn}$	ระดับพลังงานเฟอร์มิของสารชนิดเอ็น
$E_g$	พลังงานช่องว่าง
$E_v$	พลังงานของแถบวาเลนซ์
$E_c$	พลังงานแถบความนำ
$E_F$	พลังงานระดับเฟอร์มิ
$E_G$	พลังงานแถบต้องห้าม
$E_I$	พลังงานระดับอินทรินซิก
$E_V$	พลังงานแถบวาเลนซ์
$J$	ความหนาแน่นกระแส
$N$	ความหนาแน่นสารเจือ
$N_C$	ความหนาแน่นสารเจือผู้รับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สัญลักษณ์(ต่อ)

### สัญลักษณ์

### ความหมาย

$N_{Au}$	ความหนาแน่นของอะตอมทองคำ
$N_B$	ความหนาแน่นสารเจือเดิม
$N_C$	ความหนาแน่นสารเจือในคอลเลคเตอร์
$N_D$	ความหนาแน่นอะตอมผู้ให้
$N_0$	ความหนาแน่นสารเจือสูงสุดที่ผิว
$N_T$	ความหนาแน่นของศูนย์กลางการรวมตัว
$n$	ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน
$T$	อุณหภูมิสมบูรณ์
$\rho$	พิกัดความต้านทาน
$\rho_s$	ความต้านทานแผ่น
$\mu$	ความคล่องตัวของพาหะ
$\mu_e$	ความคล่องตัวของอิเล็กตรอน
$\mu_h$	ความคล่องตัวของโฮล
$\mu_n$	ความคล่องตัวของอิเล็กตรอน
$\mu_p$	ความคล่องตัวของโฮล
$\rho_s$	พิกัดความต้านทานแผ่น
$\sigma$	ความนำไฟฟ้าจำเพาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 บทนำ

การวิจัยค้นคว้าในการใช้ประโยชน์จากคลื่นไมโครเวฟ (Microwave) และคลื่นมิลลิเมตร (Millimeter-wave) มีมากขึ้น ซึ่งสายอากาศรวมแบบแอคทีฟ (Active Integrated Antenna: AIA) ได้ใช้เทคนิคควอไซออปติคัล (quasi-Optical) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมอยู่ในปัจจุบัน ด้วยจุดเด่นที่มีโครงสร้างกะทัดรัด ขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และใช้ต้นทุนต่ำ ตลอดจนมีเสถียรภาพทางด้านความถี่สูงและเป็นระบบการสื่อสารแบบไร้สาย [1]

สายอากาศแบบแอคทีฟโดยทั่วไปจะเป็นโครงสร้างที่รวมเอาอุปกรณ์ที่มีอัตรายาย เช่น Gunn diode หรือทรานซิสเตอร์ เข้ากับสายอากาศแบบระนาบ ได้แก่ สายอากาศไดโพล (Dipole Antenna) สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป (Microstrip Patch Antenna) หรือสายอากาศร่องแบบระนาบ (Planar Slot Antenna) [2] ฉะนั้นสายอากาศแบบระนาบและวงจรรวมแบบแอคทีฟได้ปรับเปลี่ยนการใช้งานของระบบคลื่นไมโครเวฟและคลื่นมิลลิเมตรขึ้นไปอีกระดับหนึ่ง [3]

สำหรับจุดมุ่งหมายของการประดิษฐ์สายอากาศแบบระนาบที่ถูกป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ เพื่อเป็นการง่ายขึ้นในการรวมเข้ากับ MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) ของวงจร RF ในภาคแรกแต่อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดในการใช้กับวงจรมากๆ ยังคงต้องพิจารณาต่อไป และในปัจจุบันยังคงมีการพัฒนาเทคโนโลยีของสายอากาศขึ้นอย่างต่อเนื่องซึ่งได้แก่ สายอากาศแบบโมโนลิทริกที่รวมอยู่ในสายอากาศรวมแบบแอคทีฟและการประยุกต์ไปใช้งานเช่น ระบบแลนด์ไร้สายภายใน และเรดาร์ป้องกันการชนของรถยนต์ [9]

ดังนั้นจึงได้นำความรู้เกี่ยวกับสายอากาศแบบระนาบซึ่งได้แก่ สายอากาศแผ่นบนวัสดุฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงจุดที่มีประสิทธิภาพต่ำ, มีประสิทธิภาพในการแผ่กระจายคลื่นต่ำ และเกิดการสูญเสียเนื่องจากคลื่นผิวจากรายละเอียดข้างต้น จะเห็นถึงปัญหาหลายอย่างในการใช้งานที่ความถี่สูง และผลที่ได้รับจากสายอากาศแผ่นคือ มีอัตรายายและประสิทธิภาพต่ำซึ่งมีสาเหตุจากการคัปปลิง โพลาริเซชัน และการที่ต่อเข้าด้วยกันหลายชั้น แต่อย่างไรก็ตามจุดด้อยต่างๆ สามารถแก้ไขได้โดยการสร้างให้เหมาะสมโดยให้ทำงานในสารกึ่งตัวนำโดยใช้ซิลิคอนไดออกไซด์

การวิเคราะห์สายอากาศส่วนใหญ่จะอาศัยทฤษฎีทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในการแก้ปัญหาต่างๆ ในปริยายานิพนธ์นี้ได้ใช้วิธีการวิเคราะห์ซึ่งได้แก่ แบบจำลองควาดีและวิธีโมเมนต์ (Moment Method) และแสดงถึงการผลิตสายอากาศแผ่นแบบ โมโนลิทริกบนวัสดุฐานรองชนิดคอนโคปทองคำ ซึ่งเป็นวัสดุฐานรองที่ติดตั้งที่ได้เปรียบเทียบกับข้อมูลจากการทดลองกับการวิเคราะห์จากทฤษฎี และได้แสดงถึงการใช้อุณหภูมิสูงในการปฏิบัติการสร้าง ซึ่งมีข้อจำกัดในการทำสารชนิดคอนกับสารทองคำบริสุทธิ์เพื่อแก้ไขให้ดีขึ้น โดยได้นำมาสร้างเป็นสายอากาศ ซึ่งมีความต้านทาน (Resistivity) สูงกว่า  $10^6$  [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] ข้อมูลนี้ได้จากการวัดเปรียบเทียบกับกราฟความสัมพันธ์กระแสและแรงดันที่ได้จากทฤษฎี และการสูญเสียที่เปลี่ยนแปลงไปตามพารามิเตอร์โดยวิเคราะห์ด้วยวิธีโมเมนต์สำหรับสายอากาศแบบระนาบบนวัสดุฐานรองชนิดคอนโคปทองคำ ได้ทำการประดิษฐ์ขึ้นจริง และได้ทำการวัดทดสอบเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดกับผลทางทฤษฎี รวมทั้งเหตุผลความแตกต่างได้แสดงไว้ในปริยายานิพนธ์ฉบับนี้ครบถ้วนแล้ว

## 1.2 วัตถุประสงค์ในการทำปริยายานิพนธ์

จากที่กล่าวมาในตอนต้น เป็นการแนะนำเกี่ยวกับหลักการและข้อดีของสายอากาศแผ่นแบบ โมโนลิทริกบนวัสดุฐานรองชนิดคอน และเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีสายอากาศ ซึ่งสาระในปริยายานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาวัสดุฐานรองสำหรับสายอากาศที่มีความเหมาะสมเพื่อศึกษาหลักการเบื้องต้นของสายอากาศรวมแบบแอกทีฟ นำไปประยุกต์ใช้ไว้สายและพัฒนาสำหรับใช้งานในด้านเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และเทคโนโลยีการสื่อสารต่อไป

## 1.3 หลักการใหม่ในปริยายานิพนธ์

เสนอวัสดุฐานรองใหม่สำหรับสายอากาศแผ่นแบบโมโครสตริป โดยปกติแล้วสายอากาศแผ่นโมโครสตริปจะถูกสร้างบนวัสดุฐานรอง ไดอิเล็กตริก ก็ยังมีปัญหาเรื่องของขนาดของสายอากาศอยู่แต่ในปัจจุบันนี้มีความต้องการคุณสมบัติของสายอากาศที่มีประสิทธิภาพสูง ขนาดเล็ก และมีน้ำหนักเบา จึงมีแนวคิดใช้วัสดุฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำ คือซิลิคอน แต่ลำพังสารซิลิคอนอย่างเดียวก็ไม่สามารถใช้งานที่ความถี่สูงได้ จึงได้เติมอะตอมทองคำในแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นระนาบ (111) มีสภาพความต้านทาน  $10^2$  [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] และมีสภาพยอมสัมพัทธ์  $\epsilon_r = 11.8$  ทำให้มีคุณสมบัติในการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าและมีความเป็นอินทรินซิก (Intrinsic) มากขึ้น ในกระบวนการสร้างนั้นเป็นกระบวนการทางเคมีคอนดักเตอร์ โดยวิธีการใช้ความร้อนสูง และนอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติทำให้สภาพความต้านทานมากกว่า  $10^6$  [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] ซึ่งความเหมาะสมสำหรับวัสดุฐานรองที่ดีสำหรับสายอากาศแผ่น แล้วใช้งานที่ความถี่สูงได้ ในปริยายานิพนธ์นี้ได้ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศทำงานที่ความถี่ 10 GHz ด้วยคุณสมบัติพารามิเตอร์ข้างต้น สามารถออกแบบและสร้างสายอากาศแผ่นไมโครสตริปให้มีขนาดเล็กลงได้เมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศที่สร้างบนวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก อีกทั้งยังมีความเหมาะสมกว่าด้วย ดังนั้นกระบวนการทางเคมีคอนดักเตอร์สำหรับสายอากาศ จึงมีความเป็นไปได้ที่จะสร้าง IC สำหรับสายอากาศได้ซึ่ง IC สำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ถูกสร้างไปแล้ว แล้วนอกจากนี้ยังง่ายต่อการเชื่อมต่อกับ MMIC ด้วยเหตุผลที่กล่าวมานี้ ปรวิญญานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ประดิษฐ์สายอากาศแผ่นแบบโมโนลิทริก บนวัสดุฐานรองซิลิคอนไดโปกงค่า เพื่อเป็นข้อมูลในงานวิจัยพื้นฐาน สำหรับพัฒนาไปสู่สายอากาศรวมแอกทีฟ และเทคโนโลยี MMIC ต่อไป

#### 1.4 โครงประกอบของปรวิญญานิพนธ์

ปรวิญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บท โดยมีบทนำอยู่ในบทที่ 1 เป็นการกล่าวแนะนำข้อดีและข้อเสียของสายอากาศแบบไมโครสตริป หลักการเบื้องต้น และวัตถุประสงค์ในการทำปรวิญญานิพนธ์ ส่วนรายละเอียดของบทต่างๆ อีก 5 บทมีดังต่อไปนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงคุณสมบัติพื้นฐานของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป เป็นการแนะนำหลักการพิจารณาองค์ประกอบของโครงสร้าง คุณสมบัติและพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศ วิธีการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป โดยใช้สายส่งสัญญาณไมโครสตริป (Microstrip Line) คุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป

บทที่ 3 เป็นการกล่าวถึงสารทองคำโปกแผ่นผลึกซิลิคอน ด้วยกระบวนการทางเคมีคอนดักเตอร์ โดยการให้ความร้อน สัมผัสการแพร่กระจายอะตอมทองคำในเนื้อสารซิลิคอนด้วยวิธีการระเหย (Evaporate) ด้วยความร้อนและการแพร่อะตอมทองคำในแผ่นผลึกซิลิคอน ระดับพลังงานของอะตอมทองคำในแผ่นผลึกซิลิคอน โดยพิจารณาเมื่อซิลิคอนเป็นชนิดอินทรีนซิกและพิจารณาเมื่อเติมอะตอมทองคำ ค่าพิกัดความต้านทานของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมทองคำ พิจารณาก่อนแพร่อะตอมทองคำและหลังแพร่อะตอมทองคำลงไป ในเนื้อสารซิลิคอน มีปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงของสภาพความต้านทานสูงขึ้น และหัวข้อสุดท้ายเป็นการสรุปเนื้อหาโดยรวมของบทนี้ และการเปลี่ยนแปลงของวัสดุฐานรองซิลิคอน เมื่อเติมอะตอมทองคำ

บทที่ 4 เป็นการกล่าวถึงการวิเคราะห์และขั้นตอนการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบโมโนลิทริกบนวัสดุฐานรองซิลิคอนไดโปกง เป็นการศึกษาถึงหลักการและวิธีการวิเคราะห์วัสดุฐานรองของสายอากาศและตัวสายอากาศด้วย ได้ทำการวิเคราะห์ 2 วิธี วิธีแรกเป็นการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองคาวิตี (Cavity Model) และอีกวิธีหนึ่งเป็นการวิเคราะห์ด้วยวิธีโมเมนต์ (MM) จากนั้นได้กล่าวถึงกระบวนการออกแบบด้วยวิธีการเลียนแบบ โดยการจำลองด้วยโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเมนตัม (Momentum) และโปรแกรม Microwave Design System: MDS และหัวข้อสุดท้ายก็จะ เป็นกล่าวสรุปเนื้อหาโดยรวมของบทนี้ ในวิธีการวิเคราะห์และหลักการออกแบบ

บทที่ 5 จะได้กล่าวในกระบวนการสร้าง หลักการและขั้นตอนต่างๆ ของการสร้าง สายอากาศแผ่นไมโครสตริปแบบโมโนลิทริกบนวัสดุฐานรองซิลิคอนไดโปกงคำ ขั้นตอนการ สร้างแต่ละกระบวนการ เช่น กระบวนการแพร่สารเจือทองคำในเนื้อสารซิลิคอน โดยกระบวนการ ทางเคมีคอนดักเตอร์ โดยระเหยสารเจือทองคำด้วยความร้อน และการแพร่ (Diffusion) อะตอม ทองคำลงในแผ่นผลึกซิลิคอน จากนั้นก็เป็นกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography) จะ ได้กล่าวถึงวิธีการใช้สารไวแสงและทำการฉายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต การพัฒนารูป (Development) และกระบวนการสุดท้ายเป็นการสร้างลวดลายของสายอากาศบนวัสดุฐานรอง ซิลิคอนไดโปกงคำ โดยเทคนิคการ Lift off โดยน้ำยาสารเคมีเพื่อให้สารไวแสงออก (Resist Removal) ซึ่งจะได้สายอากาศแผ่นไมโครสตริปแบบโมโนลิทริกบนวัสดุฐานรองซิลิคอนไดโปกงคำ จากนั้นจึงทำการซินเตอริง (Sintering) เพื่อให้สายอากาศติดแน่นกับฐานรอง และนำไป บอนดิง (bonding) ที่จุดป้อนสัญญาณของสายอากาศเพื่อทำการทดสอบและใช้งาน ในหัวข้อ สุดท้ายเป็นการสรุปกระบวนการสร้างต่างๆ ของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปแบบโมโนลิทริกบน ฐานรองซิลิคอนไดโปกงคำ

บทที่ 6 ได้กล่าวถึงการทดสอบและผลที่ได้จากการทดสอบสายอากาศแผ่นไมโคร สตริป แบบโมโนลิทริกบนฐานรองซิลิคอนไดโปกงคำ การวัดค่าสภาพความต้านทาน ของฐานรอง ซิลิคอน ไดโปกงคำ จากนั้นจึงนำไปทดสอบความถี่ โชนั้นท์ของสายอากาศ และทำการทดสอบ คุณสมบัติการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปบนฐานรองซิลิคอน ไดโปกงคำ และ หัวข้อสุดท้ายจะได้สรุปผลการทดลองและผลการทดลองต่างๆ ในบทนี้

บทที่ 7 เป็นบทสรุปและเสนอแนะการศึกษาและทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ทั้งหมดพร้อมทั้ง ได้เสนอแนะแนวทางในการศึกษาและพัฒนา ให้แก่ผู้ที่สนใจจะศึกษาเรื่องสายอากาศแผ่นไมโคร สตริปแบบโมโนลิทริกบนวัสดุฐานรองซิลิคอนไดโปกงคำต่อไป

## บทที่ 2

### สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป

#### 2.1 บทนำ

แนวคิดเกี่ยวกับสายอากาศแผ่นไมโครสตริปเริ่มขึ้นครั้งแรกเมื่อต้นปี 1953 และเมื่อ 20 ปีที่ผ่านมาได้มีการสร้างสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปขึ้นมา โดยใช้หลักการและเทคนิคของโฟโตนิก (Photo-Tech) โดยวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกประกอบด้วยทองแดงหรือทอง และได้มีการพัฒนาให้มีคุณสมบัติทางกลศาสตร์ดีขึ้น อีกทั้งยังช่วยลดแทนเจนต์การสูญเสีย (Loss Tangent) ที่จะเกิดขึ้นด้วย สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปได้สร้างขึ้นครั้งแรกในปี 1970 ต่อจากนั้นมาก็ได้มีการวิจัยและพัฒนาสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปอย่างต่อเนื่อง โดยมีข้อดีคือ น้ำหนักเบา ขนาดเล็ก ราคาถูก โครงสร้างเป็นระนาบ และสามารถสร้างเป็นวงจรรวม (IC) ได้

ได้มีการพัฒนาสายอากาศชนิดอื่นที่มีโครงสร้างเป็นระนาบเรียกคล้ายกับสายอากาศแผ่นไมโครสตริป เช่น สายอากาศแบบร่องด้วยสายส่งสตริป (Stripline Slot Antenna) สายอากาศแผ่นแบบโพรงด้านหลัง (Cavity Backed Printed Antenna) และสายอากาศแบบไดโพล (Printed Dipole Antenna) โดยที่ได้เปรียบเทียบคุณสมบัติของสายอากาศชนิดต่างๆ ไว้ในตารางที่ 2.1 ซึ่งจะเห็นว่าสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป จะมีคุณสมบัติโดยรวมดีกว่าสายอากาศชนิดอื่น

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบสายอากาศที่มีโครงสร้างเป็นระนาบเรียกชนิดต่างๆ

คุณสมบัติ	สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป	สายอากาศแบบร่องสายส่งสตริป	สายอากาศแผ่นแบบโพรงด้านหลัง	สายอากาศแบบไดโพลแผ่น
ความหนา	บาง	ไม่บางมาก	หนา	บาง
การสร้าง	ง่ายมาก	ง่าย	ยาก	ง่าย
การโพลาไรซ์	เชิงเส้นและวงกลม	เชิงเส้น	เชิงเส้นและวงกลม	เชิงเส้น
การทำงานสนองความถี่	เป็นไปได้	เป็นไปได้	เป็นไปได้	เป็นไปได้
รูปร่าง	มีหลายแบบ	สี่เหลี่ยม	มีหลายแบบ	มีหลายแบบ
การแผ่กระจายคลื่นที่ไม่ต้องการ	เกิดขึ้น	เกิดขึ้น	ไม่เกิดขึ้น	เกิดขึ้น
แบนด์วิดท์	1-5%	1-2%	~10%	~10%

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.1 ข้อดีและข้อเสียของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป

ข้อดีของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศชนิดอื่นที่ใช้ในย่านความถี่ไมโครเวฟ โดยมีความถี่ใช้งานอยู่ในช่วง 100 MHz ถึง 50 GHz คือ

- น้ำหนักเบา, ขนาดเล็ก, โครงสร้างเป็นแผ่นราบ ซึ่งทำเป็นรูปต่างๆ ได้ง่าย
- ราคาถูก กระบวนการสร้างไม่ยุ่งยาก
- มีลักษณะบาง ทำให้ติดตั้งเข้ากับยานพาหนะได้ง่าย
- ง่ายในการติดตั้งบนจรวดและดาวเทียม
- สามารถทำให้มีการ โพลาริซแบบเชิงเส้นหรือวงกลมได้ง่ายเพียงเปลี่ยนตำแหน่งของจุดป้อน
- สามารถทำเป็นสายอากาศสองความถี่ได้ง่าย
- ไม่ต้องใช้โพรงด้านหลัง
- ไมโครสตริปสามารถเชื่อมต่อเข้ากับกรอกแบบที่ประกอบด้วยอุปกรณ์โซลิดสเตต (Solid state) เช่น วงจรออสซิลเลเตอร์ วงจรขยาย, สวิตช์, ตัวเลื่อนเฟสได้ง่าย
- สามารถสร้างให้มีการป้อนและแมตซ์อิมพีแดนซ์ ได้พร้อมๆ ในโครงสร้างสายอากาศ

อย่างไรก็ตาม สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปยังมีข้อเสียเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศชนิดอื่นคือ

- แบนด์วิดท์แคบ
- ประสิทธิภาพต่ำ
- การแผ่กระจายคลื่นมีได้เพียงครึ่งระนาบ
- ในทางปฏิบัติจำกัดอัตราขยายสูงสุดที่ประมาณ 20 dB
- ประสิทธิภาพของโบลหลักในการแผ่กระจายไม่ดี
- การแยกกันระหว่างจุดป้อนและองค์ประกอบการแผ่กระจายไม่ดี
- สามารถกระตุ้นทำให้เกิดคลื่นผิวได้
- ให้กำลังงานต่ำ

หมายเหตุ ปัจจุบันสายอากาศถูกพัฒนาเรื่อยๆ จนจะแก้ไขข้อเสียได้หมดแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1.2 การนำไปประยุกต์ใช้งาน

ในทางปฏิบัติ ได้มีการนำสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปไปออกแบบใช้งานในด้านต่างๆ มากมาย ข้อดีของสายอากาศไมโครสตริปมีมากกว่าข้อเสีย ในการนำสายอากาศไมโครสตริปไปประยุกต์ใช้งาน เช่น

- การสื่อสารทางดาวเทียม
- คอมพิวเตอร์ และเรดาร์อื่นๆ
- การติดต่อทางวิทยุสื่อสาร
- การตั้งงานและการควบคุม
- การวัดสภาพแวดล้อมและการส่งสัญญาณระยะไกล
- องค์ประกอบส่วนป้อนของสายอากาศที่มีโครงสร้างซับซ้อน
- ตัวรับที่ใช้ในการเดินเรือ
- ตัวกระจายคลื่นทางการแพทย์

## 2.2 คุณสมบัติพื้นฐานของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป

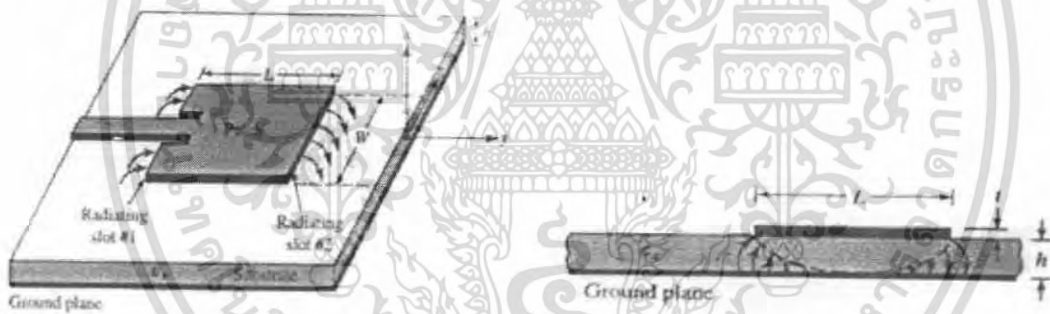
ลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแสดงดังรูปที่ 2.1 (a) ซึ่งประกอบด้วยแผ่นตัวนำที่บางมากวางอยู่บนวัสดุฐานรอง ส่วนอีกด้านหนึ่งของวัสดุฐานรองจะเป็นระนาบสร้างเงา

วัสดุฐานรองสำหรับนำมาสร้างสายอากาศไมโครสตริปนั้นมีด้วยกันหลายชนิด โดยปกติแล้วสภาพยอมสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกนั้นจะอยู่ในช่วง  $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$  และสิ่งที่สำคัญในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปก็คือความหนาของวัสดุฐานรอง ( $h$ ) การออกแบบโดยใช้สภาพยอมสัมพัทธ์ในช่วงต่ำๆ จะทำให้มีประสิทธิภาพสูง และมีแบนด์วิดท์ที่กว้างขึ้น แต่ข้อเสียก็คือสายอากาศจะมีขนาดใหญ่ตามไปด้วย สำหรับวัสดุฐานรองที่บางและมีสภาพยอมสัมพัทธ์สูงนั้น ส่วนใหญ่จะนำมาใช้ร่วมกับวงจรทางไมโครเวฟ เนื่องจากต้องการให้ฟริงกิง (Fringing) ของสนามแคบ เพื่อทำให้เกิดการคับปลิง (Coupling) และการแผ่กระจายคลื่นน้อยที่สุดและยังทำให้วงจรมีขนาดเล็กลงอีกด้วย แต่ก็จะทำให้การสูญเสียมากขึ้น ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพและแบนด์วิดท์ลดลง ดังนั้นสายอากาศไมโครสตริปและวงจรไมโครเวฟจึงสามารถนำมาใช้ร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บ่อยครั้งที่เรามักเรียกสายอากาศไมโครสตริปว่า “สายอากาศแผ่น” (Patch Antenna) โดยปกติส่วนที่ทำหน้าที่แผ่กระจายคลื่นและส่วนที่ใช้ป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศจะอยู่บนวัสดุฐานรองเดียวกัน ส่วนที่ใช้แผ่นกระจายคลื่นหรือเฟดจ์นี้อาจมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้า เป็นแผ่นบางๆ หรือ โคโพล วงกลม วงรี สามเหลี่ยม หรือรูปร่างอื่นๆ อีกรู้ได้ ซึ่งในรูปที่ 2.2 ได้แสดงลักษณะของแผ่นไมโครสตริปรูปแบบต่างๆ ไว้แล้ว

ลักษณะของแผ่นแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้า โคโพลและวงกลมเป็นแบบที่นิยมใช้กันมากที่สุด เนื่องจากง่ายต่อการวิเคราะห์และการสร้าง อีกทั้งยังมีคุณสมบัติในการแผ่กระจายคลื่นที่ดี แผ่นสายอากาศแบบโคโพลเป็นแบบที่มีโพลาไรเซชันไขว้ (Cross Polarization) น้อยที่สุด เนื่องจากโดยธรรมชาติแล้วจะมีแบนด์วิดท์ที่กว้างและใช้พื้นที่ในการสร้างน้อย และเหมาะสมในการสร้างเป็นแถวลำดับ โดยทั้งสายอากาศองค์ประกอบเดี่ยว (Single Element) และแบบแถวลำดับนั้นสามารถทำให้มีลักษณะการโพลาไรซ์ได้ทั้งแบบเชิงเส้น (Linear) และวงกลม (Circular)



(a) สายอากาศไมโครสตริป

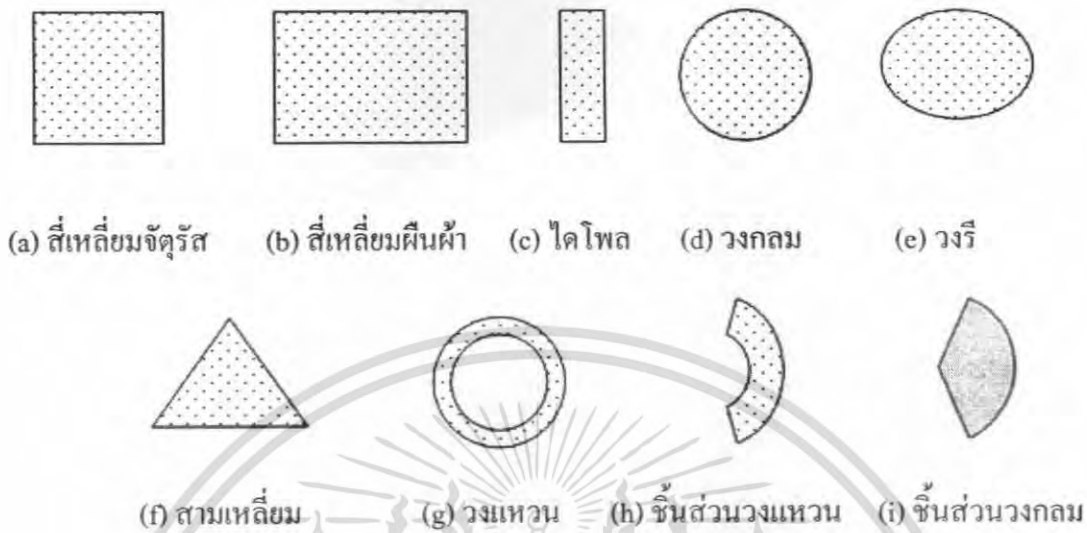
(b) ด้านข้าง



(c) ระบบพิกัดสำหรับแต่ละร่องแผ่กระจายคลื่น

รูปที่ 2.1 สายอากาศไมโครสตริปและระบบพิกัด

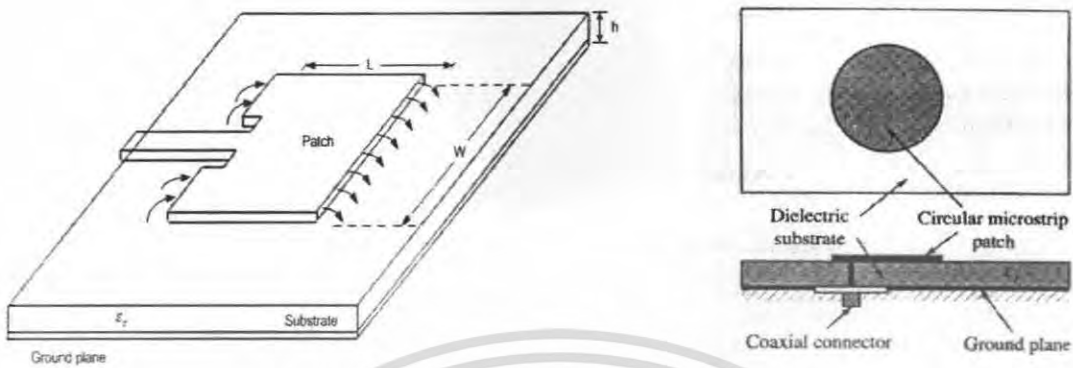
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



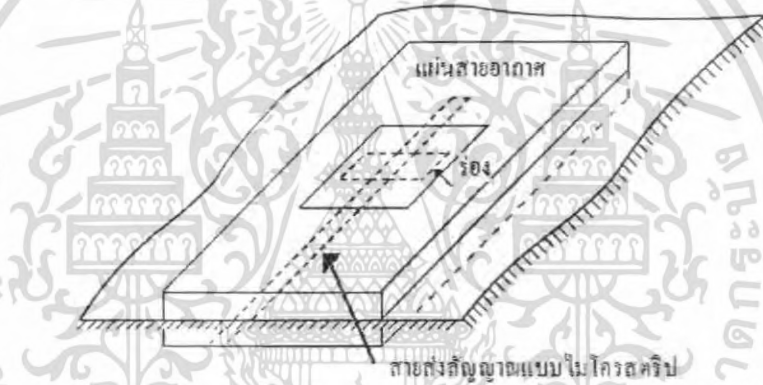
รูปที่ 2.2 รูปร่างของแผ่นสายอากาศไมโครสตริปแบบต่างๆ

### 2.3 การป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป

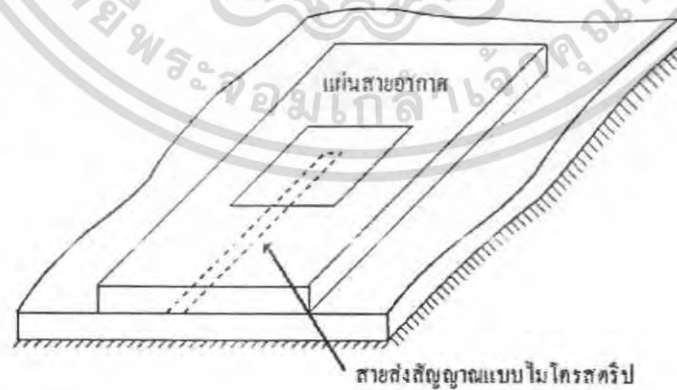
การป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปนั้นสามารถทำได้หลายวิธี แต่ที่นิยมนั้นจะมีด้วยกัน 4 วิธีคือ การป้อนสัญญาณด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป สายโคแอกเซียล การคัปปลิ่งผ่านช่องเปิด (Aperture) และการคัปปลิ่งด้วยการวางไว้ใกล้กัน (Proximity) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และวงจรสมมูลของการป้อนสัญญาณในแต่ละแบบแสดงในรูปที่ 2.4 ลักษณะของสายป้อนสัญญาณแบบไมโครสตริปจะเป็นแผ่นตัวนำ ซึ่งปกติแล้วจะมีความกว้างน้อยกว่าความกว้างของแพทช์มาก การป้อนสัญญาณด้วยสายส่งแบบไมโครสตริปจะง่ายต่อการสร้างและการแมตช์อิมพีแดนซ์โดยการควบคุมตำแหน่งจุดป้อน อีกทั้งยังค่อนข้างง่ายต่อการวิเคราะห์ แต่ถ้าความหนาของวัสดุฐานรองเพิ่มขึ้นจะทำให้คลื่นผิวมากขึ้น และยังทำให้เกิดการแผ่กระจายปลอมปนจากตัวป้อนสัญญาณอีกด้วย ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วการป้อนด้วยวิธีนี้จะมีแบนด์วิดท์ประมาณ 2-5%



(a) การป้อนสัญญาณด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป (b) การป้อนด้วยโพรบ



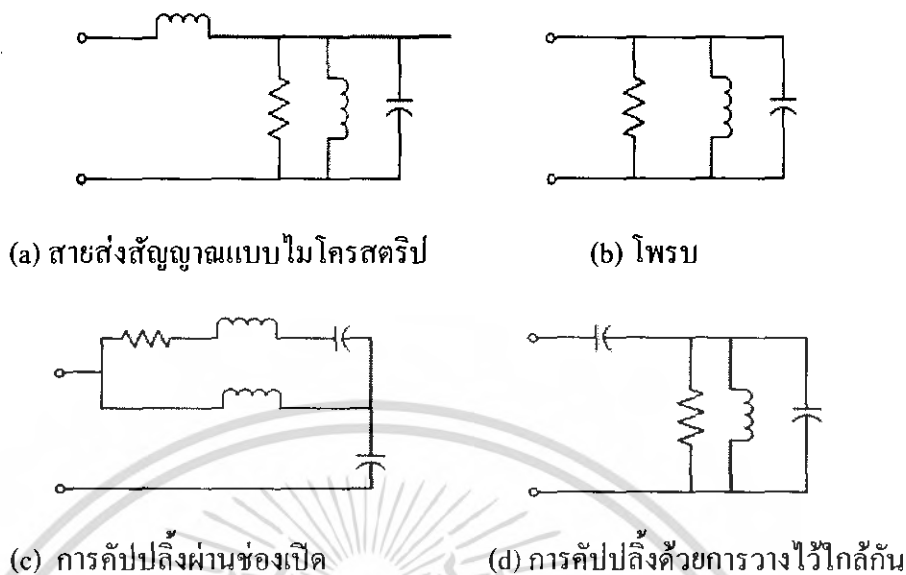
(c) การป้อนสัญญาณด้วยการทับปลีงผ่านช่องเปิด



(d) การป้อนสัญญาณด้วยการวางไว้ใกล้กัน

**รูปที่ 2.3 การป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศไมโครสตริป**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลของการป้อนสัญญาณตามรูปที่ 2.3

การป้อนสัญญาณด้วยสายโคแอกเซียล ตัวนำด้านในของสายโคแอกเซียลจะต่ออยู่กับแพ็คเกจที่ทำหน้าที่แผ่กระจายคลื่น ในขณะที่ตัวนำด้านนอกของสายจะต่ออยู่กับระนาบสร้างเงา การป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศไมโครสตริปแบบนี้เป็นที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากง่ายต่อการสร้างและเมตซ์อิมพีแดนซ์ และมีการแผ่กระจายคลื่นปลอมปนน้อย แต่วิธีนี้ยังคงทำให้แบนด์วิดท์แคบและยากต่อการออกแบบจำลอง

การป้อนสัญญาณทั้งแบบไมโครสตริปและแบบสายโคแอกเซียล โดยธรรมชาติแล้วจะไม่สมมาตรกัน ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดโมดอันดับที่สูงกว่าขึ้น (Higher Order Mode) ทำให้การแผ่กระจายมีโพลาไรซ์แบบไขว้เกิดขึ้น เพื่อที่จะแก้ปัญหาเหล่านี้จึงต้องอาศัยการป้อนสัญญาณด้วยการคัปปลิงผ่านช่องเปิด ดังแสดงในรูป 2.3 (c) และ 2.3 (d) การคัปปลิงผ่านช่องเปิดดังแสดงในรูป 2.3 (c) เป็นแบบที่ยากที่สุดใน 4 แบบ และยังคงมีแบนด์วิดท์ที่แคบ การคัปปลิงในลักษณะนี้จะช่วยลดกระแสแผ่กระจายปลอมปนได้ ลักษณะโครงสร้างของการคัปปลิงผ่านช่องเปิดนั้นจะประกอบด้วยวัสดุฐานรอง 2 ชั้นถูกแยกออกจากกันด้วยระนาบสร้างเงา ด้านล่างของวัสดุฐานรองแผ่นล่างสุดจะเป็นสายป้อนสัญญาณแบบไมโครสตริป ซึ่งพลังงานจะถูกคัปปลิงผ่านร่อง (Slot) ที่อยู่บนระนาบสร้างเงาไปยังตัวแผ่กระจายคลื่น โดยปกติแล้ววัสดุฐานรองด้านล่างจะเป็นวัสดุที่มีสภาพยอมสัมพัทธ์สูง ส่วนวัสดุฐานรองอันบนจะเป็นวัสดุที่มีสภาพยอมสัมพัทธ์ต่ำกว่าระนาบสร้างเงาที่แบ่งวัสดุฐานรองทั้งสองออกจากกันนั้นจะช่วยป้องกันส่วนที่แผ่กระจายคลื่นออกจากส่วนป้อนสัญญาณ ซึ่งจะช่วยลดการแผ่กระจายปลอมปนและทำให้ได้โพลาไรเซชันที่บริสุทธิ์ขึ้น โดยทั่วไปแล้วการเมตซ์อิมพีแดนซ์ทำได้โดยการควบคุมความกว้างของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และควบคุมความยาวของร่อง การคัปปลิงขงร่องนี้สามารถสร้างแบบจำลองได้โดยอาศัยทฤษฎีของ Bethe ซึ่งจะพิจารณาเกี่ยวกับการคัปปลิงผ่านช่องเปิดเล็กๆ บนระนาบของตัวนำการป้อนสัญญาณทั้ง 4 แบบนี้ การคัปปลิงโดยการวางไว้ใกล้ๆ กันนี้จะมีแบนด์วิดท์ที่กว้างที่สุด อีกทั้งยังง่ายต่อการสร้างแบบจำลองและมีการปลอมปนของการแผ่กระจายคลื่นต่ำ แต่การสร้างก็ยังทำได้ยากอยู่

## 2.4 การแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป

สนามการแผ่กระจายของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปจะเกิดจากสนามระหว่างขอบของตัวนำสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปกับระนาบสร้างเงา กระบวนการของการแผ่กระจายคลื่นจะเกิดจากสายส่งไมโครสตริปวงจรเปิด ได้มีการทดสอบการแผ่กระจายคลื่นจากความไม่ต่อเนื่องของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป โดยมีการวิเคราะห์ที่อยู่บนพื้นฐานการไหลของกระแสในตัวนำ วิธีนี้สามารถใช้คำนวณหาผลกระทบของการแผ่กระจายที่มีต่อค่ารวมตัว  $Q$  ของรีโซเนเตอร์ไมโครสตริป การวิเคราะห์เบื้องต้นบนสนามในแบบช่วงว่าง โดยเปิดขอบของไมโครสตริปและระนาบสร้างเงา ดังนั้นการวิเคราะห์แบบนี้ผลของการแผ่กระจายทั้งหมดตัวประกอบคุณภาพจะกล่าวถึงในส่วนของขนาดรีโซเนเตอร์ (Resonator) ความถี่ในการใช้งานสัมพันธ์กับสภาพยอมสัมพันธ์และความหนาแน่นของวัสดุฐานรอง ผลทฤษฎีและการทดลอง แสดงให้เห็นว่าความถี่สูงการแผ่กระจายจะสูญเสียมากที่ตัวนำและไดอิเล็กตริก ซึ่งเป็นข้อยืนยันได้ว่าการแผ่กระจายของวงจรเปิดสายส่งแบบไมโครสตริปจะใช้กำลังมาก เมื่อทำการสร้างสายอากาศโดยที่วัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกมีความหนาแน่นน้อย

## 2.5 ตัวแปรแสดงคุณภาพ (Quality factor) แบนด์วิดท์ และประสิทธิภาพ

ตัวแปรแสดงคุณภาพ แบนด์วิดท์และประสิทธิภาพเป็นตัวเลขคุณค่า (Figure of Merit) ของสายอากาศ ซึ่งมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน และไม่สามารถแยกออกมาพิจารณาเฉพาะแต่ละอย่างเพื่อให้ค่าดีที่สุด (Optimize) ได้ นี่จึงเป็นเครื่องหมายที่แสดงว่า เมื่อต้องการเพิ่มประสิทธิภาพด้านใดด้านหนึ่งให้กับสายอากาศจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพด้านอื่นๆ ของสายอากาศลดลงตามไปด้วย

ตัวแปรแสดงคุณภาพเป็นตัวเลขคุณค่าที่แสดงการสูญเสียของสายอากาศ ปกติแล้วคือการสูญเสียเนื่องจากการแผ่กระจาย ความนำ Ohmic ของไดอิเล็กตริก และการสูญเสียเนื่องจากคลื่นผิว ดังนั้นตัวแปรคุณภาพรวม  $Q_0$  จึงเป็นค่ารวมความสูญเสียทั้งหมดและปกติจะอยู่ในรูป

$$\frac{1}{Q_0} = \frac{1}{Q_r} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_{sw}} \quad (2.1)$$

- โดยที่  $Q_0$  คือ ตัวแปรแสดงคุณภาพรวม  
 $Q_r$  คือ ตัวแปรแสดงการสูญเสียเนื่องจากการแผ่กระจายคลื่น (คลื่นในอากาศ)  
 $Q_c$  คือ ตัวแปรแสดงการสูญเสียเนื่องจากความนำไฟฟ้า  
 $Q_d$  คือ ตัวแปรแสดงการสูญเสียเนื่องจากไดอิเล็กตริก  
 $Q_{sw}$  คือ ตัวแปรแสดงการสูญเสียเนื่องจากคลื่นผิว

สำหรับวัสดุฐานรองที่บางมากๆ ความสูญเสียเนื่องจากคลื่นผิวก็จะมีค่าน้อยมากๆ จนสามารถละทิ้งได้ แต่สำหรับวัสดุฐานรองที่หนาขึ้นจะต้องนำค่านี้มาพิจารณาด้วย ความสูญเสียเหล่านี้สามารถทำให้ลดลงได้โดยอาศัยควาวิดี

สำหรับวัสดุฐานรองที่บางมาก ๆ ( $h \ll \lambda_0$ ) สำหรับแพทช์รูปร่างใดๆ (ประกอบด้วยสี่เหลี่ยมผืนผ้าและวงกลม) สูตรโดยประมาณสำหรับค่าของตัวแปรแสดงคุณภาพของความสูญเสียหลายๆ อย่าง สามารถเขียนได้ว่า

$$Q_c = h\sqrt{\pi f \sigma} \quad (2.2)$$

$$Q_d = \frac{1}{\tan \delta} \quad (2.3)$$

$$G_{t/l} = \frac{2\omega \epsilon_r K}{hG_{t/l}} \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $\tan \delta$  คือค่าแทนเจนต์ของความสูญเสียของวัสดุฐานรอง ,  $\sigma$  คือสภาพความนำไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้าระหว่างเพ็ทซ์และระนาบสร้างเงา,  $G_{t/l}$  คือความนำร่วมต่อหน่วยความยาวของช่องเปิดที่แผ่กระจายและ

$$K = \frac{\iint_{\text{area}} |E|^2 dA}{\oint_{\text{perimeter}} |E|^2 dl} \quad (2.4a)$$

สำหรับช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าในโหมด  $TM_{010}$

$$K = \frac{L}{4} \quad (2.5a)$$

$$G_{t/l} = \frac{G_{rad}}{W} \quad (2.5b)$$

ค่า  $Q_c$  ตามสมการ 2.4 เป็นสัดส่วนผกผันกับค่าความสูงของวัสดุของฐานรองและสำหรับวัสดุฐานรองบางมาก ๆ ค่านี้จะเป็นตัวแปรที่สำคัญ

แบนด์วิดท์ของสายอากาศก็จะเป็นสัดส่วนผกผันกับค่า  $Q_c$  ของสายอากาศด้วย ซึ่งถูกนิยามโดย

$$\frac{\Delta f}{f_c} = \frac{1}{Q_c} \quad (2.6)$$

อย่างไรก็ตามสมการที่ 2.6 นี้อาจจะไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้เลย ถ้าไม่ได้พิจารณาถึงการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่จุดอินพุตของสายอากาศ คำจำกัดความของแบนด์วิดท์ที่ให้ความหมายที่ดีขึ้นควรจะครอบคลุมตลอดย่านความถี่ โดยที่ค่า  $VSWR$  ที่จุดต่ออินพุตจะมีค่าเท่ากับหรือน้อยกว่าค่ามากที่สุด

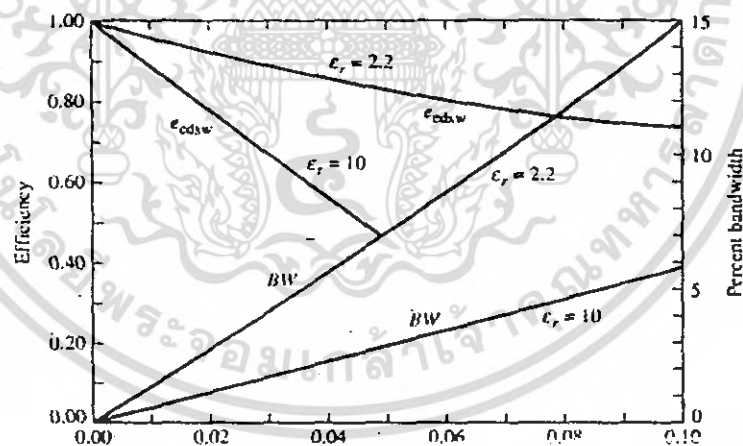
ที่ต้องการ เมื่อสมมุติให้  $VSWR$  มีค่าเป็น 1 ที่ความถี่ที่ต้องการ สมการที่แก้ไขมาจากสมการที่ 2.6 ซึ่งนำการแมตซ์อิมพีแดนซ์มาพิจารณาด้วยนั้นจะได้เป็น

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{VSWR-1}{Q_0 \sqrt{VSWR}} \quad (2.6a)$$

โดยทั่วไปแล้วแบนด์วิดท์จะเป็นสัดส่วนกับปริมาตร ซึ่งสำหรับสายอากาศในโครสทรีปรูปที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความถี่ โชนแนทคงที่ สามารถเขียนได้เป็น

$$BW \sim \text{volume} = \text{พื้นที่} \times \text{ความสูง} = \text{ความกว้าง} \times \text{ความยาว} \times \text{ความสูง}$$

$$\frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\epsilon_r} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.7)$$



ความสูงของวัสดุฐานรอง

รูปที่ 2.5 ประสิทธิภาพและแบนด์วิดท์ต่อความสูงของวัสดุฐานรองที่ความถี่ โชนแนทของสายอากาศในโครสทรีปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยใช้วัสดุฐานรองที่แตกต่างกัน 2 ชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นแบนด์วิดท์จึงเป็นสัดส่วนผกผันกับค่าราคาที่สองของสภาพยอมสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง การเปลี่ยนแปลงของแบนด์วิดท์ของสายอากาศไมโครสตริป ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความสูงของวัสดุฐานรองที่ทำการนอร์มอลไลซ์แล้ววัสดุฐานรอง 2 แบบแสดงดังรูปที่ 2.5 ซึ่งจะเห็นว่าแบนด์วิดท์จะเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของวัสดุฐานรองสูงขึ้น

ประสิทธิภาพการแผ่กระจายของสายอากาศถูกนิยามให้เป็นสัดส่วนของกำลังงานที่แผ่กระจายออกไปต่อกำลังงานอินพุต ซึ่งสามารถแสดงในเทอมของตัวแปรแสดงคุณภาพสำหรับสายอากาศไมโครสตริปได้ด้วย

$$e_{cdsw} = \frac{1/Q_r}{1/Q_0} = \frac{Q_0}{Q_r} \quad (2.8)$$

โดยที่  $Q_0$  กำหนดให้ตามสมการที่ (2.1) การเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพซึ่งเป็นฟังก์ชันของความสูงของวัสดุฐานรองสำหรับสายอากาศไมโครสตริปที่มีวัสดุฐานรองค้ำกันสองชนิดแสดงดังรูปที่ 2.5

## 2.6 ประยุกต์ใช้ไร้สาย

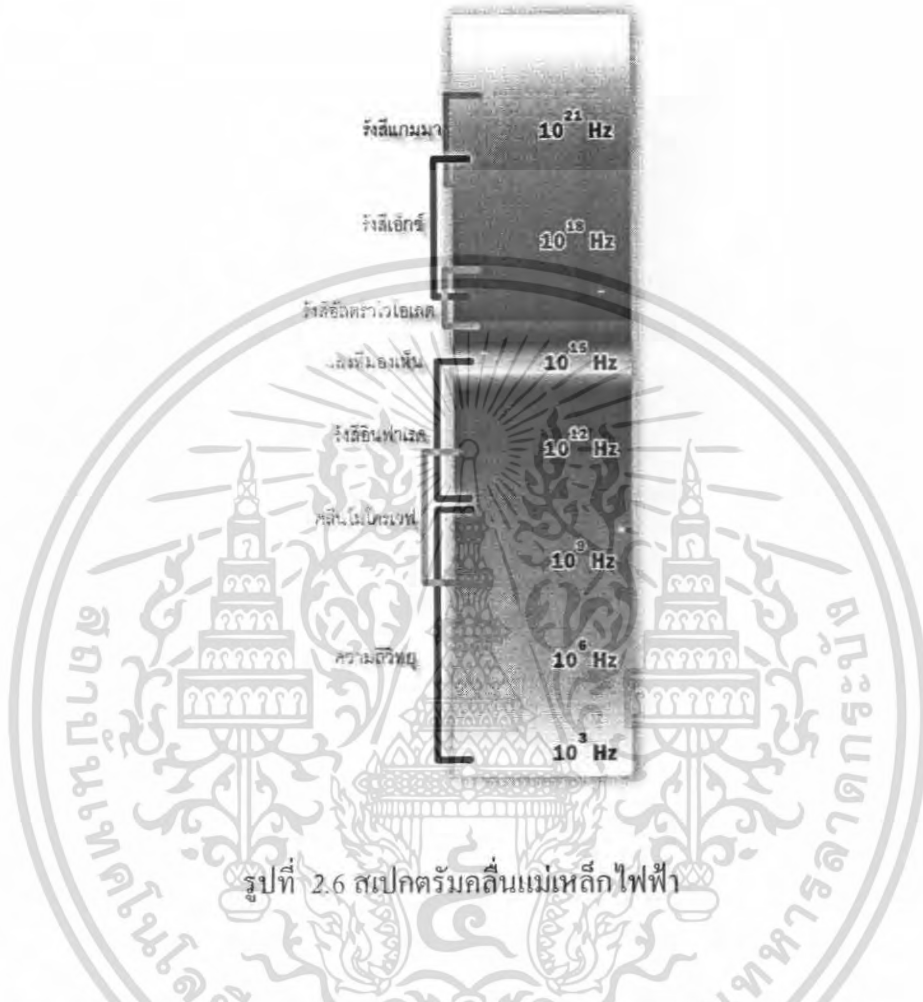
ข้อมูล (Data) ข่าวสารต่าง ๆ สามารถถูกส่งแบบไร้สาย โดยเปลี่ยนจากสัญญาณวิทยุและสัญญาณโทรทัศน์เป็นเสียงและภาพ หรือเป็นข้อมูลด้านคอมพิวเตอร์ข่าวสารต่าง ๆ จะถูกส่งโดยผสมไปกับคลื่นวิทยุ ซึ่งคลื่นวิทยุเป็นแค่ส่วนหนึ่งในสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงที่เรียกว่าความถี่วิทยุ (Radio frequency) ข้อมูลทุกชนิดสามารถถูกส่งโดยการใช้ความถี่วิทยุ ความถี่วิทยุมีมากมายไม่ใช่มีแค่คลื่นวิทยุเอเอ็มหรือเอฟเอ็มที่เรารู้จักเท่านั้น

โมดูเลชัน (Modulation) ข้อมูลจะถูกผสมไปกับคลื่นความถี่วิทยุโดยกระบวนการที่เรียกว่าโมดูเลชัน เมื่อได้รับคลื่นสัญญาณจะผ่านกระบวนการ ดีโมดูเลชัน (Demodulation) เพื่อแยกเอาข้อมูลออกมา

อุปกรณ์ส่งสัญญาณและอุปกรณ์รับสัญญาณ คลื่นความถี่วิทยุพร้อมด้วยข้อมูลข่าวสารจะถูกส่งโดยอุปกรณ์ส่งสัญญาณ (Transmitters) และรับโดยอุปกรณ์ที่เรียกว่าอุปกรณ์รับสัญญาณ (Receivers)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1 สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 2.6 สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

รังสีแกมมา (Gamma Rays) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทุกชนิดนำพลังงานมาด้วยขณะที่เดินทางมา (โดยขึ้นกับความยาวคลื่นและความถี่ของพลังงานนั้น) คลื่นมีลักษณะที่แตกต่างกันในรูปแสดงให้เห็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ต่อเนื่องกัน เป็นช่วงกว้าง เราเรียกช่วงความถี่เหล่านี้ว่า สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงที่สุดคือรังสีแกมมา ซึ่งมีแหล่งกำเนิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์

รังสีเอ็กซ์ (X-Rays) รังสีเอ็กซ์มีความถี่รองลงมา ใช้เพื่อส่องผ่านเซลล์และเนื้อเยื่อ ในทางการแพทย์จะใช้ในการส่องผ่านร่างกายเพื่อให้แพทย์เห็นภายในร่างกายของมนุษย์

รังสีอัลตราไวโอเล็ต ก่อกำเนิดได้จากแหล่งกำเนิดภายนอกโลกนั่นคือ พระอาทิตย์ รังสีชนิดนี้เป็นอันตรายต่อผิวหนังของมนุษย์ อาจทำให้เป็นโรคมะเร็งผิวหนัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต่อว่าอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รังสีอินฟราเรด (Infrared Rays) คลื่นอินฟราเรดโดยทั่วไปใช้ในอุปกรณ์รีโมตคอนโทรล และยังช่วยให้คน “เห็น” ในที่มืดเมื่อนำมาใช้ในอุปกรณ์ที่ใช่มองในเวลากลางคืนแสงที่ตามองเห็น (Visible Light) แสงที่ตามองเห็นอยู่ในช่วงความถี่ที่แคบมาก ๆ สัตว์บางชนิดสามารถมองเห็น ในช่วงความถี่สูงหรือต่ำกว่าที่มนุษย์มองเห็น

ไมโครเวฟ (Microwave) ความถี่ไมโครเวฟอยู่ระหว่างคลื่นอินฟราเรดใช้ประโยชน์ในด้านโทรคมนาคมและการทำอาหาร

ความถี่วิทยุ (Radio Frequency) ความถี่วิทยุอยู่ด้านล่างของสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า มีความถี่ต่ำสุด คลื่นวิทยุคือชื่อทั่วไปของคลื่น

## 2.6.2 รูปแบบการเชื่อมต่อของระบบเครือข่ายไร้สาย

### 2.6.2.1 Multiple access points and roaming

โดยทั่วไปแล้ว การเชื่อมต่อสัญญาณระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ กับ Access Point ของเครือข่ายไร้สายจะอยู่ในรัศมีประมาณ 500 ฟุต ภายในอาคาร และ 1000 ฟุต ภายนอกอาคาร หากสถานที่ที่ติดตั้งมีขนาดกว้าง มากๆเช่นคลังสินค้า บริเวณภายในมหาวิทยาลัย สนามบิน จะต้องมีการเพิ่มจุดติดตั้ง AP ให้มากขึ้น เพื่อให้การรับส่งสัญญาณในบริเวณของเครือข่ายขนาดใหญ่ เป็นไปอย่างครอบคลุมทั่วถึง

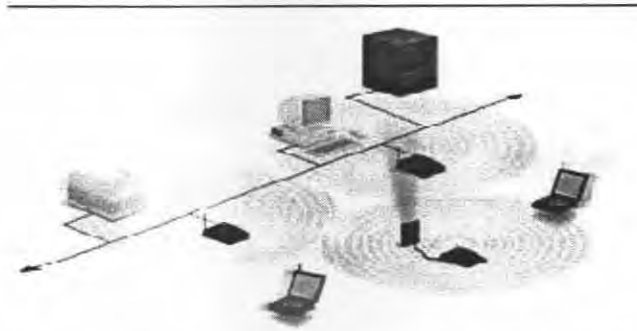


รูปที่ 2.7 แสดงการทำงานแบบ Multiple access point and roaming

### 2.6.2.2 Use of an Extension Point

กรณีที่โครงสร้างของสถานที่ติดตั้งเครือข่ายแบบไร้สายมีปัญหาผู้ออกแบบระบบอาจจะใช้ Extension Points ที่มีคุณสมบัติเหมือนกับ Access Point แต่ไม่ต้องผูกติดไว้กับเครือข่ายไร้สาย เป็นส่วนที่ใช้เพิ่มเติมในการรับส่งสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แสดงการทำงาน แบบการใช้ Extension Point

### 2.6.2.3 The Use of Directional Antennas

ระบบแลนไร้สายแบบนี้เป็นแบบใช้เสาอากาศในการรับส่งสัญญาณระหว่างอาคารที่อยู่ห่างกัน โดยการติดตั้งเสาอากาศที่แต่ละอาคาร เพื่อส่งและรับสัญญาณระหว่างกัน



รูปที่ 2.9 แสดงการทำงานแบบการใช้ Directional Antennas

### 2.6.3 เทคโนโลยี RFID

เทคโนโลยี RFID หรือในชื่อเต็มว่า Radio Frequency Identification เป็นวิธีการที่ใช้จัดเก็บและเรียกข้อมูลของวัตถุจากระยะไกล โดยใช้อุปกรณ์ ที่เรียกว่า RFID Tags (อาร์เอฟไอดีแท็ก) หรือ Transponder โดยที่ RFID Tags เป็นชิ้นส่วนเล็กๆ ที่นำไปติดไว้กับสิ่งของ สัตว์ หรือแม้แต่ตัวบุคคล โดยใน Tags นี้จะมีส่วนที่ทำหน้าที่เป็นเสาอากาศที่สามารถรับและส่งคลื่นวิทยุไปยังเครื่องส่ง RFID สำหรับประเภทของ RFID Tags นั้น แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ Passive Tags ซึ่งไม่ต้องใช้แหล่งพลังงานไฟฟ้าภายในตัว กับอีกประเภทคือ Active Tags ที่ต้องมีแหล่งพลังงานไฟฟ้าอยู่ในตัวด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.3.1 ประเภทของ RFID tags

RFID tags แบ่งได้เป็นสองประเภท ได้แก่ Active และ Passive

Passive RFID Tag ไม่มีแหล่งกำเนิดไฟฟ้าในตัวเอง กระแสไฟฟ้าที่อยู่ในเสาอากาศของ Tag นั้นเกิดจากสัญญาณวิทยุที่ได้รับมาจากเครื่องส่ง ซึ่งมีกำลังไฟฟ้ามกพอที่จะให้ Tag ใช้ส่งสัญญาณตอบสนองกลับไปยังเครื่องอ่าน RFID ได้ และเนื่องจากการมีพลังงานไฟฟ้าอยู่จำกัด สัญญาณตอบสนองของ Tag ประเภทนี้จึงเป็นข้อมูลสั้นๆ ซึ่งโดยทั่วไปอาจจะเป็นเพียงหมายเลขที่ใช้ระบุเอกลักษณ์ (GUID) เท่านั้น ด้วยเหตุที่ Tag ประเภทนี้ไม่จำเป็นต้องใช้แหล่งพลังงานไฟฟ้า ทำให้มีขนาดเล็กมาก ขนาดที่เล็กที่สุดที่ใช้งานอยู่ในตอนนี้ มีขนาดเพียง 0.4 x 0.4 มิลลิเมตร เท่านั้น ซึ่งบางกว่าแผ่นกระดาษ และบางประเภทก็ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ในการใช้งานนั้น Passive Tag สามารถรับส่งสัญญาณได้ในระยะตั้งแต่ 10 มิลลิเมตร จนถึง 6 เมตร

Active RFID Tag ต้องใช้แหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้งอยู่ภายในเพื่อการทำงาน และสามารถรับส่งสัญญาณที่มีข้อมูลจำนวนมากได้ในระยะทางที่ไกลกว่าแบบ Passive ปัจจุบันนี้ Active Tag ที่มีขนาดเล็กที่สุดมีขนาดประมาณเหรียญบาท สามารถรับส่งข้อมูลได้ในระยะห่างหลายสิบเมตร และมีแบตเตอรี่ที่สามารถใช้งานได้ยาวนานหลายปี



ภาพ RFID Tag แบบ Passive ที่มีวงจรมินิโครชิปทำหน้าที่เป็นเสาอากาศรับส่งสัญญาณวิทยุ ซึ่ง Tag นี้จะมีขนาดเล็กและบางมาก สามารถนำไปติดกับสิ่งต่างๆ เพื่อใช้ในการระบุเอกลักษณ์ และเก็บข้อมูลของสิ่งนั้นไว้ได้

### 2.6.3.2 องค์ประกอบของระบบ RFID

ระบบ RFID ประกอบขึ้นด้วยหลายส่วน ซึ่งได้แก่ Tag, เครื่องอ่าน Tag (Tag Reader), Middleware และซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการพัฒนา

จุดประสงค์ของการใช้ระบบ RFID ก็เพื่อให้เราสามารถรับส่งข้อมูลระหว่างชิ้นส่วนที่มีการเคลื่อนย้ายตำแหน่ง ซึ่งก็คือ Tag ที่จะถูกอ่านโดยเครื่องอ่าน RFID และทำการประมวลผลข้อมูลที่อ่านได้ตามความต้องการใช้งานแล้วแต่โปรแกรมที่มีอยู่ ข้อมูลที่รับส่งจาก Tag อาจจะเป็นรหัสแสดงเอกลักษณ์หรือข้อมูลระบุตำแหน่ง หรืออาจจะเป็นข้อมูลเฉพาะของผลิตภัณฑ์ เช่น ราคา ทีวี วันจำหน่าย เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประยุกต์ใช้งาน RFID ในการตรวจสอบข้อมูลเริ่มมีใช้กันในราว ค.ศ. 1980 และได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากจุดเด่นที่สามารถติดตามวัตถุที่มีการโยกย้ายตำแหน่งได้นั้นเอง

ในระบบ RFID ที่ใช้กันทั่วไปนั้น เราจะติด Tag ซึ่งลักษณะเป็นแผ่นวงจรเล็กๆไว้กับวัตถุที่ต้องการใช้งานรับส่งข้อมูล ภายใน Tag จะมี Transponder และชิปหน่วยความจำขนาดเล็กที่จะบันทึกรหัสเอกลักษณ์ประจำวัตถุนั้นไว้ แล้วจะมีเครื่องอ่านสัญญาณ ที่เรียกว่า Interrogator ที่มีเสาอากาศและตัวถอดรหัสอยู่ภายใน เครื่องอ่านสัญญาณนี้จะส่งสัญญาณออกไปยังให้ RFID Tag ที่อยู่ในบริเวณที่รับคลื่นได้ และสามารถเขียนหรืออ่านข้อมูลลงใน Tag เหล่านั้นได้ เมื่อนำ Tag มาผ่านบริเวณที่มีสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าจากเครื่องอ่านสัญญาณ เครื่องอ่านจะกระตุ้นให้ Tag ส่งสัญญาณ แล้วตรวจจับสัญญาณจาก Tag จากนั้นก็จะถอดรหัสที่อยู่ภายใน Tag เพื่อนำไปประมวลผลในโปรแกรมที่กำหนดไว้ต่อไป

### 2.6.3.3 การประยุกต์ใช้ RFID ในปัจจุบัน

ปัจจุบัน มีการประยุกต์ใช้ RFID Tag กันอย่างแพร่หลาย โดยนำมาใช้แทนระบบบาร์โค้ดแบบเดิม เนื่องจาก RFID ID มีความสะดวกสบายในการใช้งานมากกว่า เนื่องจาก ไม่จำเป็นต้องนำวัตถุมาอ่านด้วยเครื่องอ่านบาร์โค้ด เพียงแต่นำวัตถุที่ติด Tag ไปผ่านบริเวณที่มีเครื่องอ่านสัญญาณก็จะสามารถอ่านค่าได้ทันที ทำให้สามารถให้บริการได้อย่างรวดเร็วมากขึ้น ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ RFID ในปัจจุบัน ได้แก่

- การใช้ระบุเอกลักษณ์บุคคล ในงานด้านการรักษาความปลอดภัยของอาคาร โดยจะฝัง Tag ไว้ใต้ผิวหนังของบุคคลที่มีสิทธิในการเข้าออกพื้นที่ต่างๆ ของอาคาร ซึ่งเครื่องอ่านสัญญาณจาก Tag ที่ฝังไว้จะประมวลผลได้ว่า จะอนุญาตให้บุคคลนั้น ผ่านเข้าไปในบริเวณที่กำหนดไว้ได้หรือไม่
- การใช้งานในเชิงพาณิชย์ เพื่อการทำสต็อกสินค้า และการจำหน่าย โดยนำมาใช้แทนรหัสบาร์โค้ดแบบเดิม เนื่องจาก RFID มีคุณสมบัติที่สามารถตรวจสอบตำแหน่งของวัตถุได้ด้วยข้อมูลใน Tag ทำให้การตรวจสอบสินค้าทำได้สะดวก สามารถรู้ตำแหน่งของสินค้าแต่ละชั้นที่อยู่ในร้านได้ทันที และการอ่านค่าจาก Tag ก็ทำได้อย่างรวดเร็วกว่าบาร์โค้ด นอกจากนี้ RFID ยังสามารถบรรจุข้อมูลได้หลากหลายกว่าที่ใช้ในระบบบาร์โค้ดเดิม นอกจากนี้ ยังใช้ RFID เพื่อการติดตามกระบวนการผลิต และการขนส่งของผลิตภัณฑ์ เพื่อให้ทราบว่ กระบวนการผลิตและการขนส่งนั้น เป็นอย่างมีประสิทธิภาพหรือไม่ และต้องปรับปรุงในขั้นตอนใด โดยจะเก็บข้อมูลจากสัญญาณที่ส่งจาก Tag ในแต่ละขั้นตอน

- การใช้งานในด้านการจราจรขนส่ง มีการประยุกต์ใช้ระบบ RFID กับการคำนวณค่าขึ้นลงทางด่วน โดยรถที่ต้องการใช้ทางด่วน จะติด Tag ไว้บริเวณกระจกหน้า เมื่อรถแล่นผ่านเครื่องอ่านสัญญาณบริเวณทางขึ้นและทางลง เครื่องจะทำการคำนวณค่าใช้จ่ายให้โดยอัตโนมัติ

- หนังสือเดินทางและใบขับขี่ของหลายประเทศในปัจจุบันได้ฝัง RFID Tag ไว้ โดยภายใน Tag ที่ฝังไว้จะมีข้อมูลของบุคคลที่เป็นเจ้าของ เพื่อให้สามารถตรวจสอบข้อมูลได้ทันทีที่เดินผ่านบริเวณเครื่องอ่านสัญญาณ ทำให้เพิ่มความรวดเร็วในการให้บริการ และช่วยในการรักษาความปลอดภัยในมีประสิทธิภาพมากขึ้น

## 2.7 บทสรุป

ในบทนี้ได้ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของสายอากาศแบบไมโครสตริป การประยุกต์ไปใช้งานเพื่อใช้เป็นแนวทางในการนำความสัมพันธ์ของค่าต่างๆ และการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศแผ่นไมโครสตริป รวมทั้งการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปการพิจารณาถึงแบนด์วิดท์และประสิทธิภาพของสายอากาศ ที่กล่าวมาข้างต้นนี้จะเป็นพื้นฐานในการคาดการณ์ล่วงหน้า และการวิเคราะห์ที่มีหลักการถูกต้อง

### บทที่ 3

## ทฤษฎีจลนศาสตร์การโคปทองคำ

### 3.1 บทนำ

การเติมสารเจือลงในแผ่นซิลิคอน สามารถทำได้โดยการแพร่ (Diffusion) ปกติการแพร่ หมายถึงการเคลื่อนที่ของอนุภาคจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปสู่ที่มีความเข้มข้นต่ำกว่าการแพร่สารในกระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำนั้น เป็นการแพร่ภายในของแข็ง ซึ่งปรากฏ การของการแพร่แบบนี้ จะเกิดขึ้นได้เฉพาะในสถานะเวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง ๆ (เช่นประมาณ 1000 °C) กล่าวคือในขณะที่อุณหภูมิสูงๆ อะตอมของสารใดๆ ก็สามารถแพร่เข้าสู่สารของแข็งนั้น อาจถูกกำหนดได้ด้วยสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusivity:  $D$ ) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับสภาพความคล่องตัว (Mobility:  $\mu$ ) ตามกฎของไอน์สไตน์ดังนี้

$$D = \frac{kT}{q} \cdot \mu \quad (3.1)$$

โดยที่ $q$	คือขนาดของประจุอิเล็กตรอน
$k$	คือค่าคงตัวของโบลต์ซมันน์
$T$	คือค่าอุณหภูมิสมบูรณ์
$\mu$	คือค่าคล่องตัวของอนุภาค ( $\text{cm}^2 / \text{V-sec}$ )

### 3.2 ทฤษฎี

สารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดเอ็น ที่ถูกเติมอะตอมทองคำ ดังแสดงตัวอย่างโครงสร้างในรูปที่ 3.1 จะแสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากทองคำในเนื้อสารซิลิคอนชนิดเอ็นจะมีพฤติกรรมซึ่งจะพอกกล่าวสรุปได้เป็นข้อๆ ดังนี้ [4]

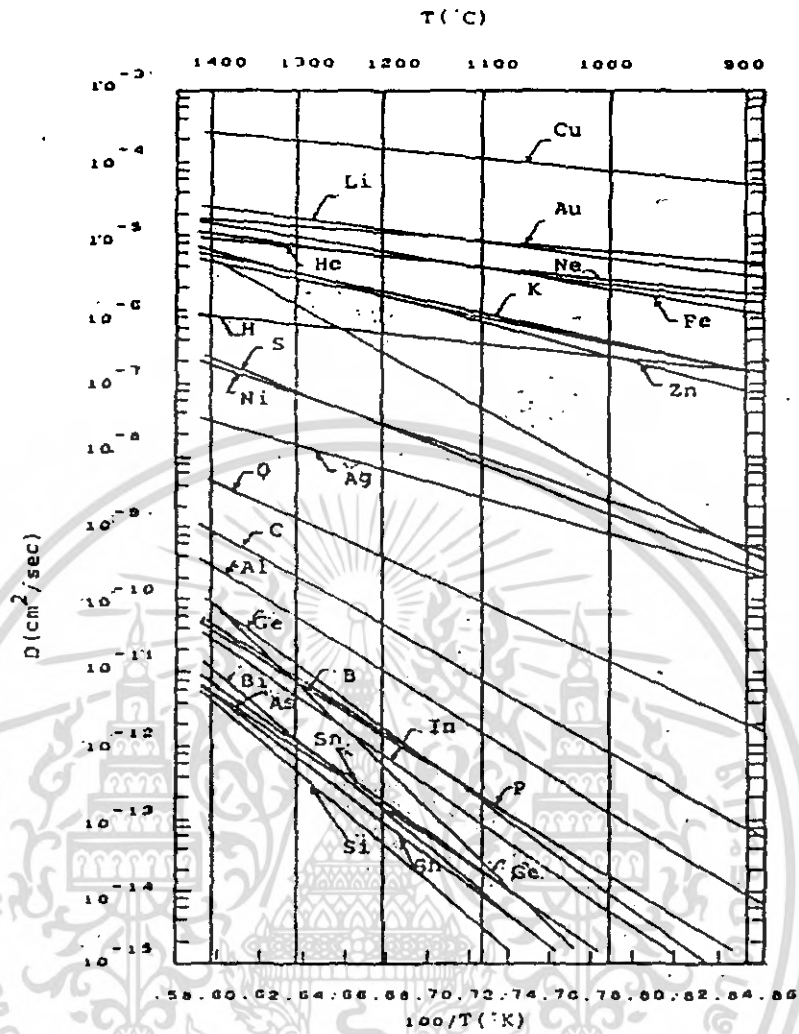


รูปที่ 3.1 ตัวอย่างโครงสร้างซิลิคอนโดปทอง

### 3.2.1 สัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมทองคำในซิลิคอน

ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมของธาตุชนิดต่าง ๆ ( $D$ ) ในซิลิคอน อุณหภูมิ ( $T$ ) แสดงดังรูป 3.2 พบว่าเมื่อพิจารณาว่าอะตอมทองคำเป็นสารเจือระดับลึกจะมี สัมประสิทธิ์การแพร่เป็นไปตามกราฟคือ ประมาณ  $2.5 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 / \text{sec}$  ที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส เช่น ที่อุณหภูมิ 1100 °C จะมี  $D = 9 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 / \text{sec}$  เป็นต้น ดังนั้นจึงสามารถควบคุม ปริมาณของอะตอมทองคำในซิลิคอนได้ โดยการควบคุมอุณหภูมิการแพร่ของอะตอมทองคำ การแพร่ของอะตอมทองคำจะแพร่เข้าไปอยู่ระหว่างอะตอม (Interstitial) ของซิลิคอน โดยไม่มีพันธะใดๆ ยึดกับอะตอมซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 3.3 นั้น อัตราการแพร่ชนิดนี้จะเร็วกว่าอัตราการแพร่แบบ เข้าไปแทนที่ (Sub-stitutional Diffusion)

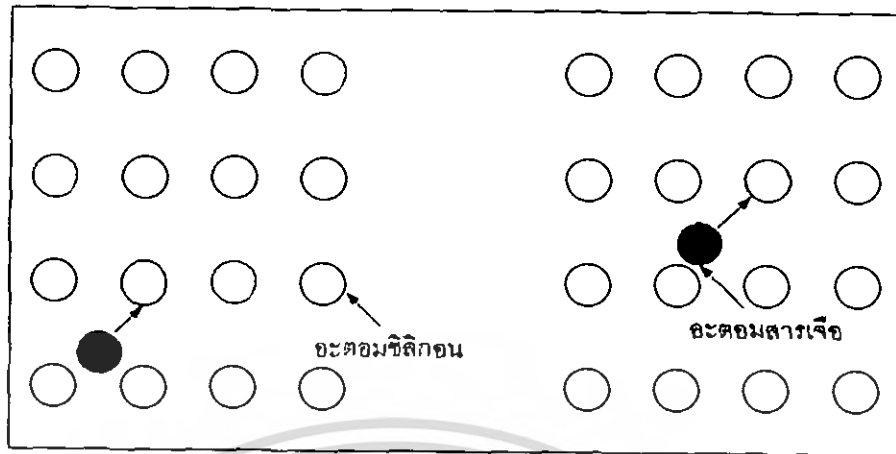
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



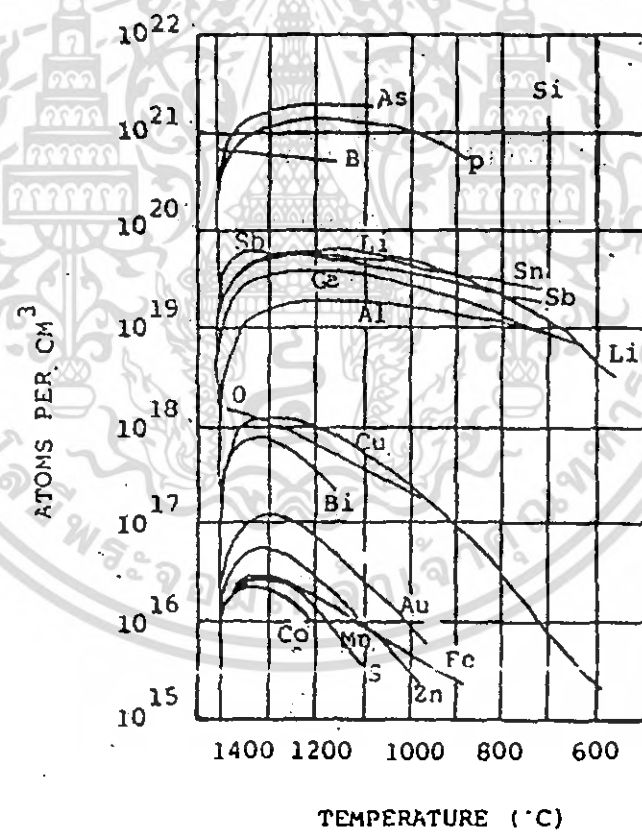
รูปที่ 3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมของธาตุชนิดต่าง ๆ

การแพร่อะตอมของทองคำเข้าไปในซิลิคอน จะช่วยทำให้อัตราการรวมตัวกันใหม่ (Recombination Rate) มีค่าสูงขึ้น เป็นผลทำให้อนุภาคของพาหะ (Carrier Life Time) มีค่าลดลง บางที่เราเรียกทองคำว่าเป็น Carrier life time killer ผลดังที่กล่าวมานี้ จะทำให้ Switching speed ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำมีค่ามากขึ้น และทองคำจะมีค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่สูงด้วยการแพร่ทองคำ นิยมทำกันมากกับสิ่งประดิษฐ์หรือวงจรรวมที่นำมาใช้งานเป็นประเภทสวิทซ์ เช่น สวิทซ์ซิงโคไดโอด สวิทซ์ซิงทรานซิสเตอร์ และวงจรรวมดิจิทัลแบบต่างๆ เป็นต้น สำหรับปริญญาโทนี้ได้นำมาเป็นฐานของสาขาอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 การแพร่ของอะตอมทองคำเข้าไปอยู่ระหว่างอะตอมซิลิกอน



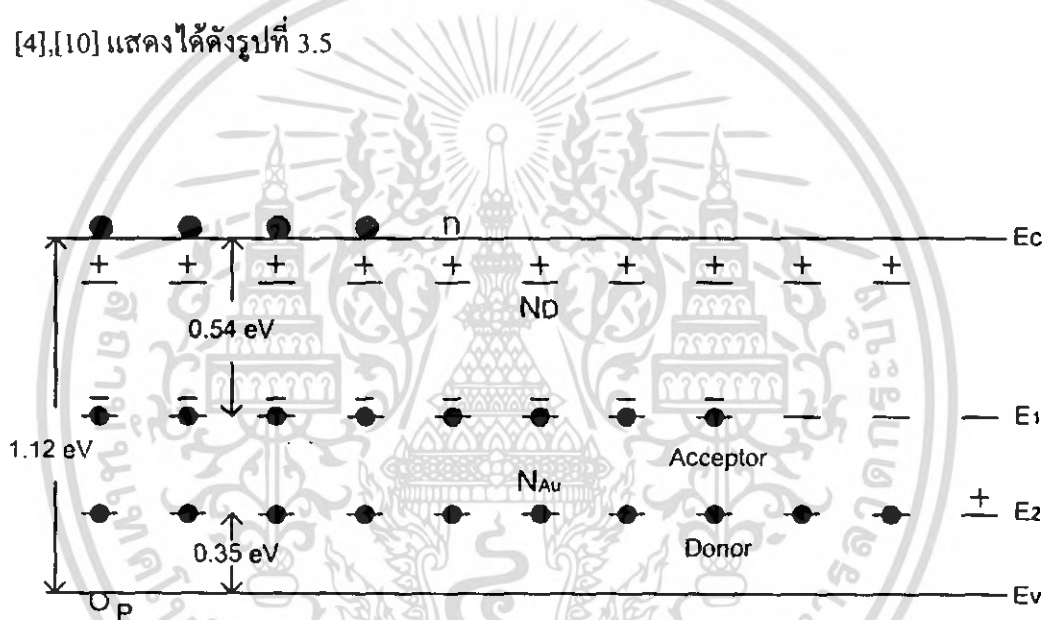
รูปที่ 3.4 Solid Solubility ของสารเจือชนิดต่าง ๆ ในซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับค่าโซลิดโซลูบิลิตี (Solid Solubility) ของทองคำในซิลิคอนจะมีค่าสูงสุดประมาณ  $10^{17}$  อะตอม/ลบ.ซม. ดังแสดงในรูปที่ 3.4

### 3.2.2 ระดับพลังงานของอะตอมทองคำในซิลิคอน

เมื่อเติมอะตอมทองคำลงในซิลิคอนจะเกินระดับพลังงาน deep donor level โดยจะอยู่เหนือจากแถบวาเลนซ์ (Valance Band)  $0.35$  eV และเกิด deep acceptor level ใต้แถบความนำ (Conduction Band) ลงมา  $0.54$  eV สำหรับระดับพลังงานของทองคำในซิลิคอนที่สภาวะต่างๆ [4],[10] แสดงได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ไดอะแกรมแสดงระดับพลังงานของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมทองคำ

ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมทองคำดังแสดง ไดอะแกรมระดับพลังงาน และสามารถหาความหนาแน่นของอะตอมทองคำในซิลิคอนได้ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N_{Au} = \left( n_{00} + n_0 \frac{n_i^2}{n_0} \right) \left\{ 1 + \exp\left(\frac{E_1 - E_F}{kT}\right) \right\} \quad (3.2)$$

- $N_{Au}$  : ความหนาแน่นของทองคำ
- $N_{00}$  : ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนก่อนการแพร่ทองคำ
- $N_0$  : ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนหลังการแพร่ทองคำ
- $N_i$  : ความหนาแน่นของคลีนพาที่อินทรินซิก (*Intrinsic carrier density*)
- $E_1$  : ระดับพลังงานผู้รับทองคำ (*Acceptor-level of Au*)
- $E_F$  : ระดับเฟอร์มี (*Fermi level*)
- $K$  : ค่าคงตัวโบลทซ์แมนน์ (*Boltzmann constant*)
- $T$  : อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
- $\rho$  : ความต้านทานหลังการแพร่อะตอมทองคำ

### 3.2.3 ค่าพิคต์ความต้านทานของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมทองคำ

ในซิลิคอนชนิดเอ็นเมื่อถูกแพร่ด้วยทองคำจะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบความนำตกลงมาในระดับพลังงานผู้รับลึก (*Deep Acceptor Level*) ซึ่งอยู่ใต้แถบความนำประมาณ  $0.54 \pm 0.02 \text{ eV}$  หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คืออิเล็กตรอนในแถบความนำจะถูกจับ (*Trap*) ด้วยระดับพลังงานผู้รับ (*acceptor level*) ก็เกิดปรากฏการณ์ชดเชย (*Compensation*) ทำให้จำนวนอิเล็กตรอนดังกล่าวลดลงค่าพิคต์ความต้านทานจึงเพิ่มขึ้นและช่วงอายุ (*Lifetime*) ของพาหะจะลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณอะตอมทองคำให้มากขึ้นจะทำให้ระดับพลังงานผู้รับลึก มีค่านวมมากพอที่จะจับอิเล็กตรอนอิสระในแถบความนำได้เกือบหมด ดังนั้นจึงเป็นผลทำให้ค่าพิคต์ความต้านทานจะมีค่าความต้านทานสูงขึ้นจนกลายเป็นอินทรินซิก (*Intrinsic Type*) ที่กล่าวมาข้างต้นคือคุณสมบัติบางประการของทองคำในเนื้อซิลิคอน หลังจากที่ได้เติมอะตอมทองคำแล้วทำให้ค่าความคล่องตัวของประจุพาหะเปลี่ยนแปลงไป

### 3.3 การวัดพารามิเตอร์ของวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ

#### 3.3.1 การวัดค่าพิกัดความต้านทาน

การวัดค่าพิกัดความต้านทานเป็นการหาปริมาณอะตอมสารเจือที่อยู่ในเนื้อสารชั้นฐานรองหรืออะตอมที่เจือที่เติมลงไปใหม่ในซิลิคอน (ปริมาณความหนาแน่นวัดเป็น อะตอม/ลบ. ซม.) ไม่ว่าจะ เป็นอะตอมสารเจือผู้ให้ (*Donor, N<sub>D</sub>*) หรือจำนวนอะตอมสารเจือผู้รับ (*Acceptor, N<sub>A</sub>*) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ จำนวนของพาหะอิสระ (*Free Carrier*) ซึ่งก็คือจำนวนอิเล็กตรอน (*n*) และโฮล (*p*) อิสระที่เกิดขึ้นหลังจากเติมสารเจือแล้ว เราสามารถคำนวณหาค่าต่างๆ เหล่านั้นได้ โดยการวัดค่าความนำไฟฟ้าหรือในทางตรงกันข้ามค่าพิกัดความต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำนั้นๆ กล่าวคือค่าความนำไฟฟ้าจะเป็นส่วนกลับของค่าพิกัดความต้านทาน ดังนั้นให้  $\rho$  (*Rho*) เป็นสัญลักษณ์แสดงค่าความต้านนำไฟฟ้าและค่าพิกัดความต้านทานไฟฟ้าแล้วจะได้ว่า

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (3.3)$$

นอกจากนี้แล้วค่าความต้านทานไฟฟ้างี้จะขึ้นอยู่กับจำนวนของอิเล็กตรอนและโฮลอิสระของพาหะแต่ละตัวคือ  $q$  ซึ่งมีค่า  $1.602 \times 10^{-19}$  คูโลมบ์ และยังขึ้นอยู่กับความสามารถในการเคลื่อนที่ของพาหะ ซึ่งเราเรียกว่า ค่าความคล่องตัว ( $\mu$ ) ดังนั้นค่าความนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำจึงแสดงได้โดยสมการ.

$$\sigma = q\mu_n n + q\mu_p p \quad (3.4)$$

โดยที่  $\mu_n$  และ  $\mu_p$  เป็นค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ

$n$  และ  $p$  คือความหนาแน่นอิเล็กตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำ

สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิด  $n$  และ  $p$  เรานิยมคิดเฉพาะพาหะส่วนมากในสารกึ่งตัวนำนั้นคือ อิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ ส่วนพาหะส่วนน้อยซึ่งก็คือ โฮลและอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นและพี ถือว่ามีค่าน้อยมากจึงไม่นำมาคิดคำนวณ

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเราสามารถคำนวณหาค่าความนำไฟฟ้า ได้โดยวัดค่าพิถกความต้านทาน ซึ่งเป็นค่าต่อต้านการไหลของกระแสไฟฟ้า และทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมวัสดุนั้นๆ ค่า  $\rho$  ซึ่งมีหน่วยเป็น โอห์ม-เซนติเมตร ( $\Omega \cdot \text{cm}$ ) นี้สามารถวัดค่าได้โดยใช้เครื่องมือโฟร์พอยท์โพรบ (Four Point Probe)



รูปที่ 3.6 การวัดค่าพิถกความต้านทานโดยวิธีโฟร์พอยท์โพรบ

เครื่องมือดังกล่าวนี้นิยมใช้วัดค่า แผ่นความต้านทาน (sheet resistance) โดยแทรกด้วยสัญลักษณ์  $\rho_s$  ซึ่งมีหน่วยเป็น โอห์มต่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส ( $\Omega/\text{cm}$ ) ทำให้เราสามารถทราบค่าพิถกความต้านทาน  $\rho = \rho_s \times \text{ความหนา}$  หรือ  $\rho = \rho_s \times t$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องโพรบที่โพรบ นี้จะประกอบด้วยเข็มโลหะ ซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าทั้งสองซึ่งจะห่างจากกันเป็นระยะ  $S$  เท่าๆ กันดังรูปที่ 3.6

เข็มทั้งสองนี้จะถูกกดลงบนแผ่นผลึกซิลิคอน แล้วป้อนไบอัสทำให้เกิดกระแส  $I$  ไหลผ่านเข็มโลหะที่อยู่ริมขอบสุด คือ เข็มที่ 1 และ 4 กระแสดังกล่าวนี้จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม ( $V$ ) ขึ้นระหว่างขั้วของเข็มโลหะด้านใน

การหาค่าพิคัดความต้านทาน ( $\rho$ ) ด้วยวิธีดังกล่าวนี้ ขนาดของแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำที่ใช้วัดจะต้องมีความยาวและกว้างมากกว่าระยะห่างเข็มซึ่งก็คือระยะ  $S$  นั่นเอง

### 3.3.2 การวัดความต้านทานแผ่น (sheet resistivity $\rho_s$ )

ในงานสารกึ่งตัวนำมักจะวัดค่านี้เสมอๆ เพราะแผ่นเวเฟอร์ทั่วไปจะบางและการแพร่สารเจือปน สารเจือจะลุดลงไปไม่ทะลุตลอดแผ่น วิธีที่ใช้กันมากที่สุด คือ โพรบที่โพรบ โดยจะมีโพรบของกระแส 1 คู่ และสำหรับวัดแรงดันอีก 1 คู่

สูตรพื้นฐานสำหรับคำนวณหาการวัดความต้านทานแผ่น ก็คือ

$$\rho_s = F^* \left[ \frac{V}{I} \right] \quad (3.5)$$

โดยที่ค่าของ  $F^*$  สามารถหาได้จากตารางที่ 3.1

เครื่องโพรบที่โพรบ โดยทั่วไปจะเป็นแบบเชิงเส้น หมายความว่าเข็มโพรบทั้ง 4 วางอยู่ในแนวเดียวกัน ระยะห่างระหว่างเข็มเท่ากันคือ  $S$  โดยทั่วไปแล้วชั้นงานหนาน้อยกว่า 0.1  $\mu\text{m}$  และขอบห่างกว่าเข็มมากกว่า 20 เท่าของ  $S$  แล้ว  $\rho_s$  หาได้จาก

$$\rho_s = 4.53 \left[ \frac{V}{I} \right] \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ค่า correction สำหรับโพร์พอยท์โพรบ เมื่อใช้วัดแผ่นบาง

Current probe	Voltage probe	Correction factor $F^*$ for thin layer
1-4	2-3	$(\pi / \ln 2) \approx 4.532$
1-2	3-4	$2\pi(\ln 4 - \ln 3) \approx 21.84$
1-3	2-4	$2\pi(\ln 3 - \ln 2) \approx 15.50$
2-4	1-3	$2\pi(\ln 2 - \ln 2) \approx 15.50$
3-4	1-2	$2\pi(\ln 4 - \ln 3) \approx 21.84$
2-3	1-4	$(\pi / \ln 2) \approx 4.532$

แต่ถ้าหากเป็นตัวอย่างที่หนาและขอบห่างกว่าเข็มมากกว่า 10 เท่าช่วงเข็มแล้ว

$$\rho_s = 2\pi S \left[ \frac{V}{I} \right]$$

(3.7)

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีความหนาแน่นของสารเจือเท่ากันตลอด ถ้าหากเรทราบค่า  $\rho_s$

ก็สามารถจะหาพิกัดความต้านทาน (resistivity  $\rho$ ) ได้ดังนี้

$$\rho = pStF(S)$$

(3.8)

เมื่อ  $W$  คือความหนาแน่นของแผ่นและ  $F(S)$  เป็น correction factor เมื่อ  $t$  ไม่ได้มีค่าน้อยกว่า  $S$  มากนัก ซึ่งค่า สามารถหาได้จากตารางข้างล่างนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 Correction factor ของ  $\rho$  เมื่อ  $r$  ไม่น้อยกว่า  $S$  มาก

W/S	F(S)
< 0.4	1.0000
0.400	0.9995
0.500	0.9975
0.555	0.9948
0.625	0.9896
0.714	0.9789
0.833	0.9600
1.000	0.9214
1.111	0.8907
1.250	0.8490
1.429	0.7938
1.667	0.7225
2.000	0.6336

### 3.4 สรุป

ในบทนี้เป็นการศึกษาทฤษฎีและหลักการแพร่ของอะตอมทองคำในแผ่นผลึกซิลิคอนได้ แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ทองคำในซิลิคอน และระดับพลังงานของอะตอมทองคำในซิลิคอน เมื่อเติมอะตอมทองคำลงในผลึกซิลิคอน ตลอดจนหาค่าพิกัดความต้านทานของซิลิคอนเมื่อเติมอะตอมลงในแผ่นผลึกซิลิคอน โดยอาศัยการวัดและเทียบกับความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน

## บทที่ 4

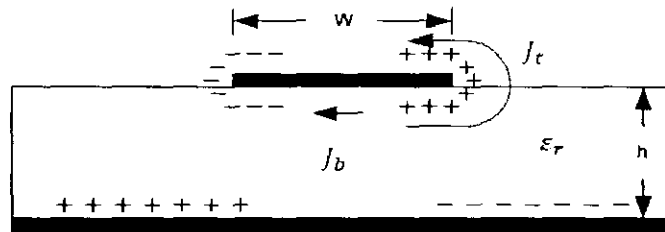
### การวิเคราะห์และออกแบบ

#### 4.1 กล่าวนำ

การวิเคราะห์สายอากาศแบบไมโครสตริปนั้นสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีจะให้ผลการวิเคราะห์ที่แตกต่างกันออกไป โดยวิธีที่นิยมใช้กันมากคือ วิธีแบบจำลองสายส่ง (Transmission Line Model) แบบจำลองควาวิตี้ (Cavity Model) และวิธีการวิเคราะห์ด้วยวิธีโมเมนต์ (MM) ซึ่งในปริณญาณิพนธ์นี้จะเน้นที่การวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศที่ได้จากการสร้างสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ ในส่วนที่เกี่ยวกับการสูญเสียของวัสดุฐานรอง อินพุตอิมพีแดนซ์ อัตราการขยายของสายอากาศ ตลอดจนคุณสมบัติในการแผ่กระจายคลื่น ถึงแม้ว่าวิธีการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองสายส่งสัญญาณนั้นเป็นวิธีที่สะดวกและง่ายต่อการวิเคราะห์ แต่ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้นับว่ายังมีความผิดพลาดอยู่มาก เมื่อใช้วิเคราะห์สายอากาศที่ทำงานในย่านความถี่สูงๆ ดังนั้นการนำวิธีการวิเคราะห์ 2 วิธีหลังมาใช้จึงน่าจะเป็นวิธีการที่เหมาะสมที่สุด

#### 4.2 การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองควาวิตี้

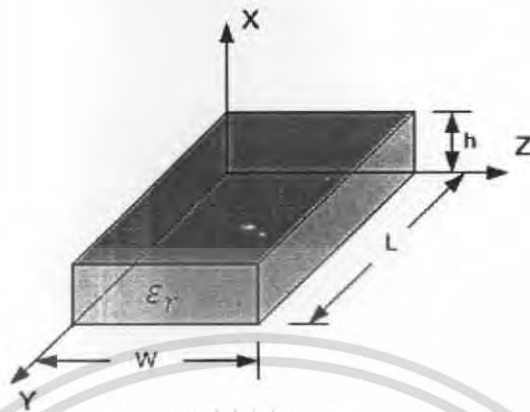
ในการวิเคราะห์สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปจำลองควาวิตี้[6] นั้น โครงสร้างของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.1 จะถูกพิจารณาว่ามีลักษณะเป็นควาวิตี้ที่มีสารไดอิเล็กตริกบรรจุอยู่ภายใน ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และเพื่อง่ายต่อการทำความเข้าใจจึงเปรียบเทียบควาวิตี้ว่าถูกปิดล้อมด้วยแผ่นตัวนำไฟฟ้าทั้งด้านบนและด้านล่าง ส่วนด้านข้างทุกด้านจะถูกปิดล้อมด้วยผนังสนามแม่เหล็กที่มีสถานะวงจรเปิด แบบจำลองนี้จะใช้สำหรับการพิจารณาสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าภายในควาวิตี้ ดังนั้นเราจึงสามารถคำนวณแบบรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นอินพุตอิมพีแดนซ์และความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศได้



รูปที่ 4.1 การแผ่กระจายประจุและความหนาแน่นของกระแสบนแผ่นสายอากาศไมโครสตริป

เมื่อสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปถูกกระตุ้น สนามภายในควาวิตีจะแผ่กระจายออกไปตามผนังของควาวิตี ทำให้เกิดประจุแผ่กระจายอยู่บนผิวด้านบนและด้านล่างของแผ่นสายอากาศ รวมถึงบนผิวด้านในที่เป็นระนาบกรวดด้วย จากรูปที่ 4.1 สังเกตได้ว่ามีประจุเกิดขึ้น 2 ชนิด ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดึงดูดสำหรับประจุที่ต่างชนิดกัน และจะเกิดแรงผลักรสำหรับประจุที่เป็นชนิดเดียวกันแรงเหล่านี้จะทำให้ประจุเกิดการเคลื่อนที่ทำให้เกิดความหนาแน่นของกระแส  $J_b$  และ  $J_c$  ที่ผิวด้านบนและด้านล่างของแผ่นสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 4.1 การไหลของกระแสเหล่านั้นจะมีค่าเป็นศูนย์ที่ด้านบนของแผ่นสายอากาศ ซึ่งทำให้แบบจำลองควาวิตีของผนังทั้ง 4 ด้านที่สมมุติขึ้นนั้น กลายเป็นผิวของตัวนำแม่เหล็กที่สมบูรณ์ โดยสมมติให้แผ่นตัวนำและผนังแม่เหล็กที่ปิดล้อม ควาวิตีอยู่นี้ไม่มีการสูญเสียพลังงานและอิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีแต่จำนวนจริงเท่านั้น ตลอดจนควาวิตีที่มีสาร ไดอิเล็กทริกอยู่ภายในนี้ไม่สามารถแผ่กระจายคลื่นได้

โครงสร้างโดยทั่วไปของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปนั้น อัตราส่วนความหนาของวัสดุฐานรองต่อความกว้างของแผ่นสายอากาศจะมีค่าน้อยมาก ดังนั้นคลื่นที่เกิดขึ้นนั้นจะปรากฏอยู่ภายในวัสดุฐานรอง ไดอิเล็กทริกเป็นส่วนใหญ่ซึ่งเป็นเหตุผลที่ทำให้สายอากาศแบบนี้มีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ ดังนั้นจึงพิจารณาให้การเปลี่ยนแปลงของสนามตามความสูงมีค่าคงที่ จึงทำให้ภายในควาวิตีนี้มีเพียงสนามในโหมด  $T_{M0}$  เท่านั้น



รูปที่ 4.2 โครงสร้างทางเรขาคณิตของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

คุณลักษณะของสนามภายในควาวิตีนี้สามารถหาได้โดยอาศัยศักย์เวกเตอร์ (Vector Potential) ซึ่งจะพิจารณาเงื่อนไขต่างๆ ตามที่แสดงในรูปที่ 4.2 ควาวิตีที่เกิดขึ้นจะพิจารณาปริมาตรที่อยู่ภายใต้แผ่นสายอากาศ ซึ่งวัสดุฐานรองมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเป็น  $\epsilon_r$  โดยที่อาศัยเวกเตอร์สามารถหาได้จากสมการคลื่นดังนี้

$$\nabla^2 A_x + k^2 A_x = 0 \quad (4.1)$$

ซึ่งจะได้ผลเฉลยของสมการในรูปทั่วไปเป็น

$$A_x = (A_1 \cos(k_x x) + B_1 \sin(k_x x))(A_2 \cos(k_y y) + B_2 \cos(k_y y)) \\ (A_3 \cos(k_z z) + B_3 \cos(k_z z)) \quad (4.2)$$

โดยที่  $k_x$ ,  $k_y$  และ  $k_z$  คือหมายเลขคลื่น (Wave number) ตามแนวแกน x, y และ z ตามลำดับการหาคุณลักษณะของสนามภายในควาวิตีนี้จะต้องกำหนดของเขตของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายในควาวิตี ซึ่งจะสัมพันธ์กับเวกเตอร์  $A_x$  ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 E_x &= -j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + k^2 \right) A_x & H_x &= 0 \\
 E_y &= -j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \frac{\partial^2 A_x}{\partial x \partial y} & H_x &= \frac{1}{u} \frac{\partial A_x}{\partial z} \\
 E_z &= -j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \frac{\partial^2 A_x}{\partial x \partial z} & H_x &= \frac{1}{u} \frac{\partial A_x}{\partial y}
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

โดยอาศัยเงื่อนไข

$$\begin{aligned}
 E_y(x' = 0, 0 \leq y' \leq L, 0 \leq z' \leq W) \\
 &= E_y(x' = h, 0 \leq y' \leq L, 0 \leq z' \leq W) = 0 \\
 H_y(0 \leq x' \leq h, 0 \leq y' \leq L, z' = 0) \\
 &= H_y(0 \leq x' \leq h, 0 \leq y' \leq L, z' = W) = 0 \\
 H_z(0 \leq x' \leq h, y' = 0, 0 \leq z' \leq W) \\
 &= H_z(0 \leq x' \leq h, y' = L, 0 \leq z' \leq W) = 0
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

สัญลักษณ์ (') เช่น  $x', y', z'$  เพื่อแสดงว่าเป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ภายในช่องไดอิเล็กทริก

โดยการใช้นิยามของเขตที่  $E_y(x' = 0, 0 \leq y' \leq L, 0 \leq z' \leq W) = 0$  และ  $E_y(x' = h, 0 \leq y' \leq L, 0 \leq z' \leq W) = 0$  จะได้ว่า  $B_1 = 0$  และ

$$k_x = \frac{m\pi}{h} \quad m = 0, 1, 2, \dots \tag{4.5}$$

ในลักษณะคล้ายกัน เมื่อใช้นิยามของเขตที่  $H_y(0 \leq x' \leq h, 0 \leq y' \leq L, z' = 0)$  และ

$H_y(0 \leq x' \leq h, 0 \leq y' \leq L, z' = W) = 0$  จะได้ว่า  $B_3 = 0$  และ

$$k_x = \frac{p\pi}{h} \quad p = 0,1,2,\dots \quad (4.6)$$

และสุดท้าย โดยการใช้เงื่อนไขขอบเขต  $H_z(0 \leq x' \leq h, y' = 0, 0 \leq z' \leq W) = 0$  และ

$H_z(0 \leq x' \leq h, y' = L, 0 \leq z' \leq W) = 0$  จะได้ว่า  $B_2 = 0$  และ

$$k_x = \frac{n\pi}{h} \quad n = 0,1,2,\dots \quad (4.7)$$

ในที่สุดจะได้ว่ารูปแบบของศักย์เวกเตอร์  $A_x$  ภายในควาวิตคือ

$$A_x = A_{mnp} \cos(k_y y') \cos(k_z z') \quad (4.8)$$

โดยที่  $A_{mnp}$  แทนขนาดของสัมประสิทธิ์ในแต่ละ  $mnp$  โมด หมายเลขคลื่น  $k_x, k_y, k_z$  จะเท่ากับ

$$\left. \begin{aligned} k_x &= \left(\frac{m\pi}{h}\right), \quad m = 0,1,2,\dots \\ k_y &= \left(\frac{n\pi}{L}\right), \quad n = 0,1,2,\dots \\ k_z &= \left(\frac{p\pi}{hW}\right), \quad p = 0,1,2,\dots \end{aligned} \right\} m = n = p \neq 0 \quad (4.9)$$

โดยที่  $m, n, p$  เป็นตัวเลขที่แสดงว่าความกว้าง ความยาว และความสูง อยู่ในแนวแกน  $x, y, z$  ตามลำดับมีค่าเป็นจำนวนเท่าของ  $\frac{1}{2}$  นอกจากนี้  $k_x, k_y, k_z$  ยังสามารถทำให้อยู่ในรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \left(\frac{m\pi}{h}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{W}\right)^2 = k_r^2 = \omega_r^2 \mu \epsilon \quad (4.10)$$

ความถี่รีโซแนนซ์ของควอดกำหนดได้จาก

$$(f_r)_{mnp} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{h}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{W}\right)^2} \quad (4.11)$$

หลังจากนั้นแทนค่าของ  $A_x$  ลงในสมการ  $E_x, E_y, E_z$  จะได้ว่า

$$\begin{aligned} E_x &= -j \frac{(k^2 - k_z^2)}{\omega \mu \epsilon} A_{mnp} \cos(k_x x') \cos(k_y y') \cos(k_z z') \\ E_y &= -j \frac{k_x k_y}{\omega \mu \epsilon} A_{mnp} \sin(k_x x') \sin(k_y y') \cos(k_z z') \\ E_z &= -j \frac{k_x k_z}{\omega \mu \epsilon} A_{mnp} \sin(k_x x') \cos(k_y y') \sin(k_z z') \\ H_x &= 0 \\ H_y &= -\frac{k_z}{\mu} A_{mnp} \cos(k_x x') \cos(k_y y') \sin(k_z z') \\ H_z &= \frac{k_y}{\mu} A_{mnp} \cos(k_x x') \sin(k_y y') \cos(k_z z') \end{aligned} \quad (4.12)$$

เพื่อหาโหมดหลักที่ความถี่รีโซแนนซ์ต่ำสุดเราจะต้องทราบความถี่รีโซแนนซ์ก่อน โหมดซึ่งมีความถี่รีโซแนนซ์ต่ำที่สุดเราจะให้เป็นโหมดหลักคือ สำหรับสายอากาศไมโครสตริปที่มี  $h \ll L$  และ  $h \ll W$  ถ้า  $L > W > h$  โหมดซึ่งเป็นความถี่ต่ำสุด (โหมดหลัก)  $TM_{010}$  ซึ่งหาความถี่รีโซแนนซ์ได้จาก

$$(f_r)_{010} = \frac{1}{2L\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{v_0}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (4.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย  $v_0$  เป็นความเร็วแสงในอากาศว่าง แต่ถ้า  $L > W > \frac{L}{2} > h$  จะได้โหมด  $TM_{001}^x$  โดยหาความถี่โซแนนท์ได้จากสมการ

$$(f_r)_{001} = \frac{1}{2w\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{v_0}{2w\sqrt{\epsilon_r}} \quad (4.14)$$

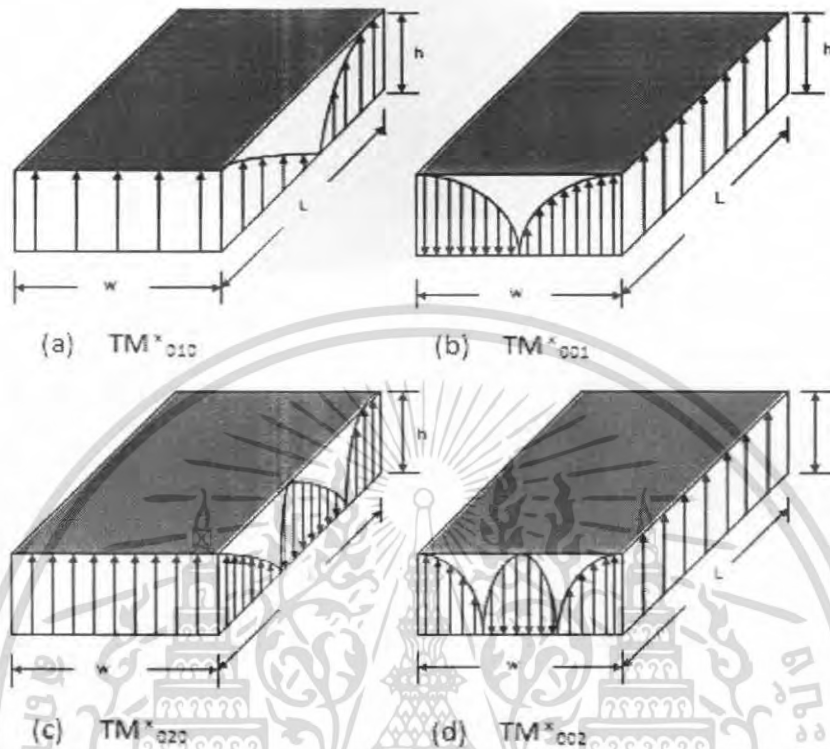
ถ้า  $L > \frac{L}{2} > W > h$  จะได้โหมด  $TM_{020}^x$  แทนโหมด  $TM_{010}^x$  โดยหาความถี่โซแนนท์ได้จากสมการ

$$(f_r)_{020} = \frac{1}{2L\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{v_0}{L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (4.15)$$

ถ้า  $W > L > h$  จะได้โหมดหลักเป็น  $TM_{001}^x$  โดยหาความถี่โซแนนท์ได้จากสมการที่ 4.14 ขณะที่  $W > \frac{W}{2} > L > h$  จะเป็นโหมดที่สองหรือโหมด  $TM_{020}^x$  อาศัยสมการ 4.12 การแผ่กระจายของสนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสตามขอบผนังของควิดี้สำหรับโหมด  $TM_{010}^x, TM_{001}^x, TM_{020}^x$  และ  $TM_{002}^x$  ตามลำดับดังแสดงดังในรูปที่ 4.3

จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนั้นจะสมมติให้ไม่มีผลเนื่องจากสนามฟริงกิงตามขอบของควิดี้ซึ่งไม่ใช่ค่าทั้งหมดแต่เป็นเพียงการสมมุติ ซึ่งสมการที่ได้รวบรวมผลของสนามฟริงกิงนั้นได้กล่าวมาแล้วก่อนหน้านี้ดังสมการที่ 4.5 สำหรับโหมดหลัก  $TM_{010}^x$

แบบจำลองควิดี้จะมองสายอากาศแบบไมโครสตริปว่าเป็นสารไดอิเล็กตริกที่มีผนังสนามไฟฟ้าที่สมบูรณ์แบบปิดอยู่ที่ด้านบนและด้านล่าง ส่วนอีก 4 ด้านที่เหลือ ซึ่งอยู่ด้านข้างจะถูกปิดล้อมด้วยผนังสนามแม่เหล็ก ซึ่งบริเวณนี้เองที่เป็นตัวทำให้เกิดการแผ่กระจายคลื่น ดังนั้นการจะหาความแน่นกระแส จะต้องคิดเสมือนว่าสารตัวกลางมีอยู่แต่เฉพาะภายใต้แผ่นตัวนำด้านบนเสมอ



รูปที่ 4.3 โครงสร้างของสนามสำหรับสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

จากการใช้ทฤษฎีสานแม่เหล็ก (Huygens' theory) จะสามารถแทนแผ่นตัวนำที่อยู่ด้านบนด้วยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $J_c$  ที่ผิวด้านบนของแผ่นตัวนำ (โดยปกติมีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $J_b$  อยู่ข้างใต้แผ่นตัวนำด้วย แต่ในที่นี้จะไม่กล่าวถึง) และที่ด้านข้างทั้ง 4 ด้านจะแสดงได้ด้วย ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $J_s$  และความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก  $M_s$  ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (a) โดยที่

$$J_s = \hat{n} \times H_a \quad (4.16)$$

และ

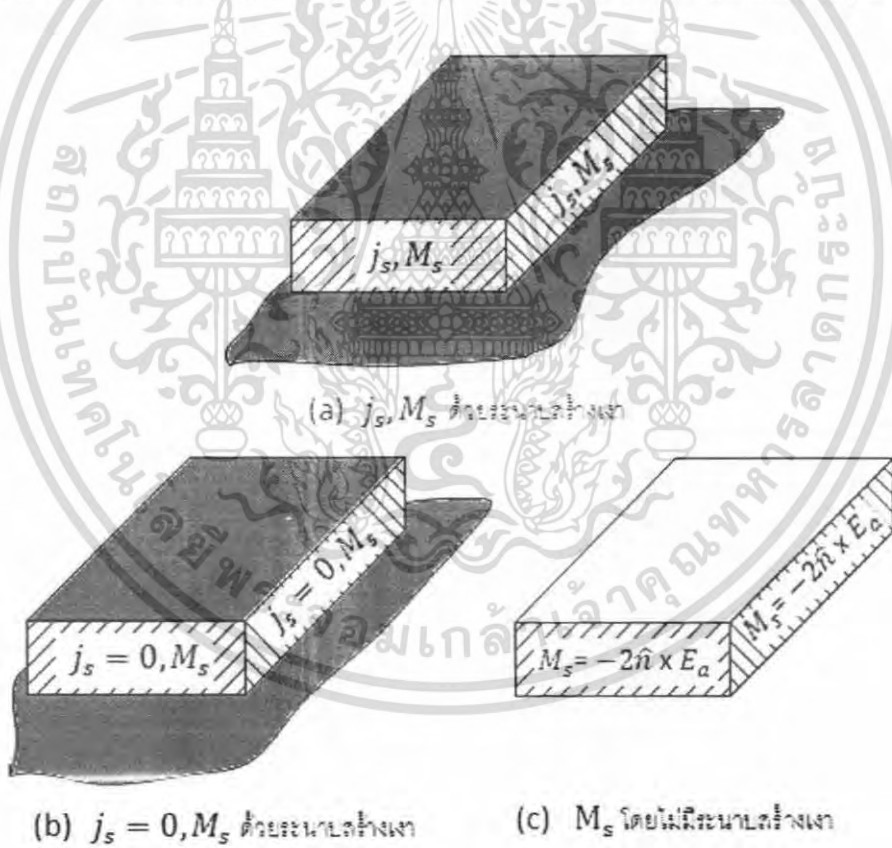
$$M_s = -\hat{n} \times E_a \quad (4.17)$$

เนื่องจากสายอากาศไมโครสตริปมีอัตราความสูงต่อความกว้างค่อนข้างน้อย ดังนั้น  $J_c$  ที่อยู่ด้านบนจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ  $J_b$  ที่อยู่ด้านล่าง จึงสมมติได้ว่า  $J_c$  มีค่าเป็นศูนย์และไม่นำมาคิด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นประโยชน์หรือต้องการคำ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จึงทำให้สนามแม่เหล็กที่บริเวณของซึ่งเกิดจาก  $j_c$  มีค่าเป็นศูนย์ (หรือมีค่าน้อยมาก) ด้วย ส่งผลให้  $J_s$  ที่บริเวณด้านข้าง ซึ่งเกิดจากสนามแม่เหล็กมีค่าเป็นศูนย์อีก ดังนั้นจะเหลือเฉพาะ  $M_s$  ที่อยู่ด้านข้าง โดยรอบของแบบจำลองควิตีเท่านั้นที่ไม่เป็นศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 4.4(b) จากการใช้ทฤษฎีอิมเมจ (Image Theory) จะได้ว่า

$$M_s = -2\hat{n} \times E_a \tag{4.18}$$

รอบเส้นรอบวงด้านข้างของแผ่นตัวนำที่แผ่กระจายคลื่นออกไปในอากาศดังแสดงในรูปที่ 4.4 (c)



รูปที่ 4.4 ความหนาแน่นกระแสสมมูลด้านทั้ง 4 ของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ในแบบจำลองควิตีจะมองสายอากาศไมโครสตริปว่าเปรียบเสมือนมีช่องว่างอยู่ด้านข้าง

โดยรอบทั้ง 4 ด้านของควิตี โดยที่ช่องว่างเหล่านี้จะเป็นตัวแผ่กระจายคลื่นออกไป แต่ช่องว่างทั้ง 4 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่องนี้ไม่ได้แผ่กระจายคลื่นได้ทั้ง 4 ช่อง จะมีเพียง 2 ช่องเท่านั้นที่สามารถแผ่กระจายคลื่นได้ ส่วนอีก 2 ช่อง ที่เหลือจะเกิดการหักล้างกันเอง โดย 2 ช่องที่เกิดการหักล้างกันคือช่องที่อยู่ห่างกันเป็นระยะทาง  $W$  ส่วนอีก 2 ช่องที่สามารถแผ่กระจายคลื่นได้จะอยู่ห่างกันเป็นระยะ  $L$  ซึ่งเรียก 2 ช่องนี้ว่า ช่องแผ่กระจายคลื่น (Radiating slot) โดยที่ระหว่าง 2 ช่องนี้จะมีแผ่นตัวนำคู่ขนาน ซึ่งแสดงตัวเหมือนเป็นหม้อแปลง (Transformer) ที่มีความต้านทานค่า ความยาวของ  $L$  ประมาณได้ว่าเท่ากับ  $\frac{\lambda_g}{2}$  เมื่อ  $\lambda_g$  หมายถึงความยาวคลื่นที่เดินทางในตัวกลางเพื่อให้สนามของช่องว่างทั้ง 2 มีทิศทางตรงข้ามกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (a) จากช่องว่างทั้ง 2 ที่เป็นตัวแผ่กระจายคลื่นจะทำตัวเสมือนเป็นอาร์เรย์ 2 องค์ประกอบที่มีระยะห่างจากกันเป็น  $\frac{\lambda_g}{2}$

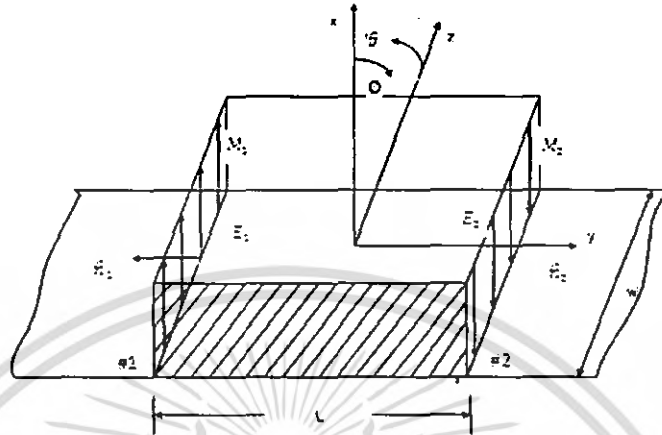
สมมติให้โมดหลักภายในควาวิดีเป็น โมด  $TM_{010}$  องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะลดลงจากสมการ 4.12 เป็น

$$\begin{aligned} E_x &= E_0 \cos\left(\frac{\pi}{L} y\right) \\ H_z &= H_0 \sin\left(\frac{\pi}{L} y'\right) \\ E_y = E_z = H_x = H_y &= 0 \end{aligned} \quad (4.19)$$

โดยที่  $E_0 = -j\omega A_{010}$  และ  $H_0 = \left(\frac{\pi}{\mu L}\right) A_{010}$  โครงสร้างของสนามไฟฟ้าภายในวัสุฐานรองและระหว่างองค์ประกอบที่แผ่กระจายคลื่นกับระนาบกราวด์จะแสดงดังรูปที่ 4.3 (a) ซึ่งจะเห็นว่าเฟสมีการเปลี่ยนแปลงตลอดช่วงความยาวของแผ่นสายอากาศ แต่จะมีค่าสม่ำเสมอตามแนวความกว้างของแผ่นสายอากาศ การเปลี่ยนแปลงของเฟสตามแนวความยาวนี้มีความจำเป็นสำหรับสายอากาศที่มีคุณสมบัติในการแผ่กระจายคลื่นไปทางด้านหน้า (Broadside)

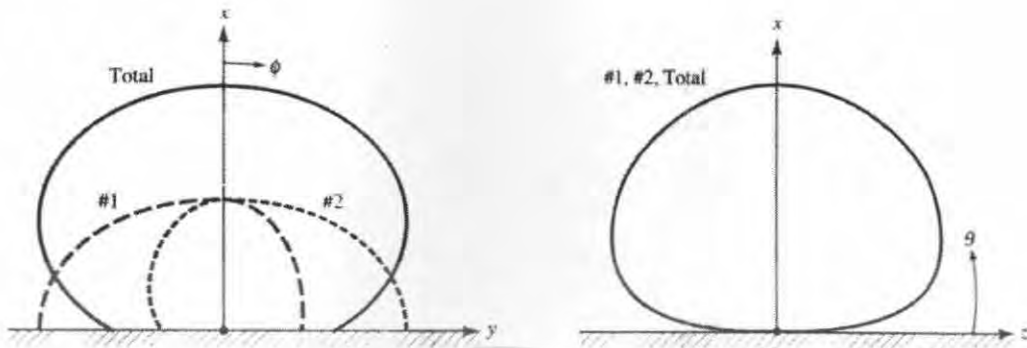
การแผ่กระจายคลื่นของแต่ละช่องนั้นจะถูกสมมติให้เป็นไดโพลแม่เหล็ก ซึ่งมีความหนาแน่นกระแสเป็น  $M_z$  และหาค่าได้จากสมการที่ 4.18 โดยพิจารณาตามรูปที่ 4.5 ซึ่งจะมีความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กสมมูลตลอดทั้ง 2 ช่อง โดยแต่ละช่องมีความกว้าง  $W$  และสูง  $h$  ซึ่งมีขนาดและเฟสเดียวกัน ดังนั้นช่องทั้ง 2 นี้จะวางอยู่เป็นอาร์เรย์ 2 องค์ประกอบซึ่งมีแหล่งกำเนิด (Source) ที่มีขนาดและเฟสเดียวกัน และวางห่างกันด้วยระยะ  $L$  ดังนั้นแหล่งกำเนิดทั้ง 2 จะแผ่กระจายคลื่นไปรวมกันในทิศทางบรอดไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (a) ซึ่งเป็นรูปแบการแผ่กระจายคลื่นของแต่ละ

ร่องในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) ส่วนแบบรูปในระนาบแม่เหล็ก (H-plane) ได้นำมาแสดงในรูปที่ 4.6(b)



รูปที่ 4.5 ร่องสำหรับแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและกระแสแม่เหล็กสมมูล

ความหนาแน่นกระแสสมมูลสำหรับร่อง 2 ร่องแบบอื่นๆ โดยที่แต่ละร่องยาว  $L$  และสูง  $h$  แสดงดังรูป 4.7 ดังนั้นความหนาแน่นบนผนังแต่ละด้านจะมีขนาดเดียวกันและมีทิศทางตรงข้ามกัน สนามที่แผ่กระจายโดยร่องทั้งสองนี้ก็จะไปหักล้างกับสนามอื่นๆ ในระนาบสนามแม่เหล็ก ดังนั้นเมื่อร่องที่อยู่ตรงข้ามกันจะมีเฟสแตกต่างกัน  $180^\circ$  ซึ่งจะหักล้างกับสนามอื่นๆ ในระนาบสนามไฟฟ้าด้วยกัน ดังจะได้แสดงในการวิเคราะห์ต่อไป การแผ่กระจายของสนามจากผนังทั้ง 2 ด้านนี้จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับผนังอีก 2 ด้านที่เหลือ ดังนั้นร่องทั้งสองเหล่านี้จึงเรียกว่า “ร่องที่ไม่มีการแผ่กระจาย”



รูปที่ 4.6 แบบรูปในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสำหรับแผ่นไมโครสตริปร่องเดี่ยวและ  
ทั้งสองร่อง



รูปที่ 4.7 ความหนาแน่นกระแสบนร่องที่มีการแผ่กระจายคลื่นสำหรับสายอากาศไมโครสตริป  
รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

เพื่อหาการแผ่กระจายของสนามในแต่ละร่อง สนามรวมนั้นจะเป็นผลรวมจากอาร์เรย์ขนาด 2 องค์ประกอบ ซึ่งแต่ละองค์ประกอบถูกแทนด้วยร่อง ดังนั้นร่องเหล่านี้จึงมีลักษณะเป็นไปตามอุดมคติ และสามารถหาการแผ่กระจายของสนามได้โดยอาศัยอาร์เรย์แฟกเตอร์ (Array factor) สำหรับ 2 ร่อง

ร่องการแผ่กระจายคลื่น การแผ่กระจายของสนามไฟฟ้าในระยะไกลจากแต่ละร่องสามารถหาได้โดยอาศัยความหนาแน่นกระแสสมมูลจากสมการ 4.18 สามารถเขียนได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_r \approx E_\theta \approx 0 \quad (4.20a)$$

$$E_\phi = -j \frac{k_0 h W E_0 e^{-jk_0 r}}{\pi r} \left\{ \sin\theta \frac{\sin(x)}{x} \frac{\sin(z)}{z} \right\} \quad (4.20b)$$

โดยที่

$$X = \frac{k_0 h}{2} \sin\theta \cos\theta \quad (4.20c)$$

$$Z = \frac{k_0 W}{2} \cos\theta \quad (4.20d)$$

กรณีที่ความสูงของวัสดุฐานรองมีค่าน้อยมากๆ ( $k_0 h \ll 1$ ) สมการ 4.20b จะลดลงเหลือ

$$E_\phi = -j \frac{2V_0 e^{-jk_0 r}}{\pi r} \left\{ \sin\theta \frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos\theta\right)}{\cos\theta} \right\} \quad (4.21)$$

โดยที่  $V_0 = hE_0$

ตามทฤษฎีเรื่องของอาร์เรย์เฟดเดอร์สำหรับกรณี 2 องค์ประกอบที่มีขนาดและเฟสเดียวกัน วางห่างกันด้วยระยะทาง  $L_e$  ตามทิศทางแกน  $y$

$$(AF)_y = 2 \cos\left(\frac{k_0 L_e}{2} \sin\theta \sin\theta\right) \quad (4.22)$$

โดยที่  $L_e$  เป็นค่าความยาวประสิทธิผลตามสมการ 4.3 ดังนั้นสนามไฟฟ้ารวมสำหรับร่องทั้งสอง (สำหรับสายอากาศไมโครสตริปคือ)

$$E_\phi = -j \frac{2k_0 h W E_0 e^{-jk_0 r}}{\pi r} \left\{ \sin\theta \frac{\sin(x)}{x} \frac{\sin(z)}{z} \right\} \cos\left(\frac{k_0 L_e}{2} \sin\theta \sin\theta\right) \quad (4.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$X = \frac{k_0 h}{2} \sin \theta \cos \phi \quad (4.23a)$$

$$Z = \frac{k_0 W}{2} \cos \theta \quad (4.23b)$$

สำหรับกรณีที่มี  $h$  มีค่าน้อยมากๆ ( $k_0 h \ll 1$ ) สมการ 4.23 จะลดลงเป็น

$$E_\phi \approx -j \frac{4V_0 e^{-jk_0 r}}{\pi r} \left\{ \sin \theta \frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos \theta\right)}{\cos \theta} \right\} \cos\left(\frac{k_0 L_e}{2} \sin \theta \sin \phi\right) \quad (4.24)$$

โดยที่  $V_0 = hE_0$  เป็นแรงดันตกคร่อมระหว่างร่อง

สำหรับสายอากาศไมโครสตริปในระนาบ x-y ( $\theta = 90^\circ, 0^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ ) และ ( $270^\circ \leq \phi \leq 360^\circ$ ) เป็นระนาบสนามไฟฟ้า สำหรับในระนาบนี้ สมการสำหรับหาสนามที่แผ่กระจายจากสมการ 4.23-4.23b จะลดลงเหลือ

$$E_\phi = -\frac{2k_0 W V_0 e^{-jk_0 r}}{\pi r} \left\{ \frac{\sin\left(\frac{k_0 h}{2} \cos \theta\right)}{\frac{k_0 h}{2} \cos \theta} \right\} \cos\left(\frac{k_0 L_e}{2} \sin \theta\right) \quad (4.25)$$

ระนาบแม่เหล็กของสายอากาศไมโครสตริประนาบ x-y ( $\theta = 0^\circ, 0^\circ \leq 180^\circ$ ) และสมการ สำหรับการแผ่กระจายของสนามตามสมการ 4.23 – 4.23b จะลดลงเป็น

$$E_\phi = -j \frac{2k_0 W V_0 e^{-jk_0 r}}{\pi r} \left\{ \sin \theta \frac{\sin\left(\frac{k_0 h}{2} \sin \theta\right)}{\frac{k_0 h}{2} \sin \theta} \frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos \theta\right)}{\frac{k_0 W}{2} \cos \theta} \right\} \quad (4.26)$$

การแผ่กระจายของสนามด้วยร่องที่เราเรียกว่าร่องที่ไม่มีการแผ่กระจายคลื่น ความยาวประมาณสิททิผล  $L_e$  และความสูง  $h$  ของแต่ละร่องสามารถหาได้โดยวิธีการเดียวกับร่องที่มีการแผ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระจายคลื่น โดยอาศัยสนามที่ได้จากสมการ 4.19 ความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กสมมูลของร่องที่ไม่มีการแผ่กระจายคลื่นที่วางบนแกน  $z$  คือ

$$M_s = -2\hat{n} \times E_a = \hat{a}_y 2E_0 \cos\left(\frac{\pi}{L_e} y'\right) \quad (4.27)$$

และแสดงไว้ดังรูปที่ 4.7 ส่วนอีกร่องหนึ่งจะวางอยู่บนระนาบ  $-z$  อาศัยขั้นตอนเดียวกันกับร่องที่มีการแผ่กระจายคลื่น องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าระยะไกลที่แผ่กระจายออกมาโดยแต่ละร่องสามารถหาได้จาก

$$E_\theta = j \frac{k_0 h L_e E_0 e^{-jk_0 r}}{4\pi r} \left\{ \cos\theta \frac{\sin(X)}{X} \frac{\cos Y}{(Y)^2 - \left(\frac{\pi}{2}\right)^2} \right\} \quad (4.28a)$$

$$E_\phi = j \frac{k_0 h L_e E_0 e^{-jk_0 r}}{4\pi r} \left\{ \cos\theta \sin\theta \frac{\sin X}{X} \frac{\cos Y}{(Y)^2 - \left(\frac{\pi}{2}\right)^2} \right\} \quad (4.28b)$$

โดยที่

$$X = \frac{k_0 h}{2} \sin\theta \cos\theta \quad (4.28c)$$

$$Y = \frac{k_0 h}{2} \sin\theta \sin\theta \quad (4.28d)$$

เมื่อร่องทั้งสองนี้จะเป็นอาร์เรย์ขนาด 2 องค์ประกอบ ซึ่งมีขนาดเดียวกันแต่มีเฟสตรงกันข้าม วางแยกออกจากกันในแกน  $z$  ความระยะทาง  $h$  จะได้อาร์เรย์แฟคเตอร์เป็น

$$(AF)_z = 2j \sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos\theta\right) \quad (4.29)$$

ดังนั้นสนามไฟฟ้ารวมในระยะไกลจะเป็นผลคูณสมการ 4.28a และ 4.28b กับอาร์เรย์แฟคเตอร์ตามสมการ 4.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในระนาบสนามไฟฟ้า ( $\theta = 90^\circ, 0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ ) และ ( $270^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$ ) และสมการ 4.28a และ 4.28b จะมีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากสนามที่แผ่กระจายไปหนึ่งส่วนสี่รอบของแต่ละร่องจะถูกหักล้างจากสนามที่แผ่กระจายจากหนึ่งส่วนสี่รอบจากที่อื่นๆ และในลักษณะเดียวกันในระนาบสนามแม่เหล็ก ( $\theta = 0^\circ, 0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ ) สนามรวมจะมีค่าเป็นศูนย์เพราะว่าสมการที่ 4.29 ไม่มีค่า แสดงว่าสนามที่แผ่กระจายจากแต่ละร่องจะถูกหักล้างโดยสนามที่แผ่กระจายจากร่องอื่นๆ การที่ร่องทั้งสองไม่สามารถแผ่กระจายคลื่นได้ในระนาบหลักนั้นได้กล่าวไว้แล้วในตอนต้นและได้แสดงความหนาแน่นของกระแสไว้ในรูปที่ 4.7

### 4.3 การวิเคราะห์ด้วยวิธีโมเมนต์

โครงสร้างของสายไมโครสตริปและวัสดุฐานรองบนระนาบสร้างเงาตัวนำสมบูรณ์แสดงดังรูปที่ 4.8 สมมติให้ไมโครสตริปถูกกำหนดด้วยพื้นผิวด้าน  $S$  บนระนาบ  $x-y$  ที่ตำแหน่ง  $z = z'$  เมื่อ  $z' \leq d$  การแก้ปัญหาเชิงเลข (Numerical Solution) ของสายอากาศไมโครสตริปที่ใช้วิธีโมเมนต์ทั่วไปเป็นวิธี Galerkin ซึ่งได้กำหนดฟังก์ชันมาตรฐาน (Basic Function) และฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก (weighing function) ปัญหานี้สามารถกำหนดโดยควอไซกรีนฟังก์ชัน (quasi-Green's function) [7]

#### 4.3.1 ควอไซกรีนฟังก์ชัน

ในกระแสแม่เหล็กที่หายไปนั้น สนามที่แผ่กระจายในขอบเขตที่ 1 และขอบเขตที่ 2 เกิดขึ้นจากกระแสเชิงผิว  $J_s$  บนแผ่นสายอากาศถูกกำหนดโดยสมการ

$$H = \frac{1}{\mu} \nabla \times A$$

$$E = -j\omega A + \frac{1}{j\omega\epsilon\mu} \nabla(\nabla \cdot A)$$

$$(\nabla^2 + k^2)A = -\mu J_s \quad (4.30)$$

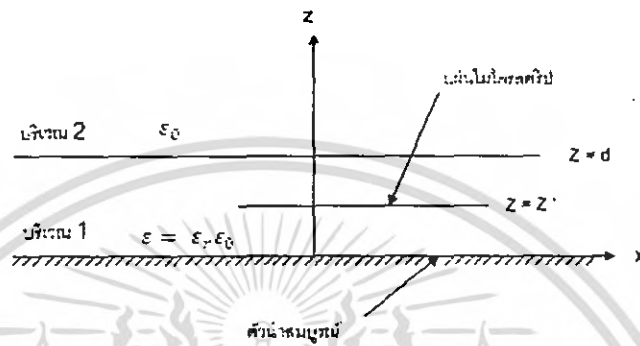
กระแสของแหล่งกำเนิด  $J_s$  คือแหล่งกำเนิดที่สร้าง  $J_s$  และคือกระแสไฟฟ้าบนสายส่งไมโคร

สตริปซึ่งถูกกำหนดโดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$j_i = I_0 \psi \quad (4.31)$$

สำหรับสายส่งแบบไมโครสตริปเราจะได้



รูปที่ 4.8 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปและวัสดุฐานรอง

$$\psi = \hat{z}(W_1 z')^{-\frac{1}{2}} \quad (4.32)$$

เมื่อ  $w_1$  เป็นความกว้างประสิทธิผลของสายส่ง สำหรับวัสดุฐานรองบางได้มีการประมาณ  $w_1$  เป็น

$w_1 = w + 2z'$  เมื่อ  $w$  เป็นความกว้างของสายส่งไมโครสตริปที่ป้อนสู่แผ่นสายอากาศ

ในขอบเขตที่ 1 เราคำนวณจากสมการ 4.30

$$A = A^1 \quad ; k = k_0(\epsilon_r)^{\frac{1}{2}} \quad (4.33)$$

ในขอบเขตที่ 2 จะได้

$$A = A^2 \quad ; k = k_0 \quad (4.34)$$

ศักย์เวกเตอร์  $A^1$  และ  $A^2$  สำหรับขอบเขตที่ 1 และ 2 ตามลำดับ สามารถแสดงโดยศักย์เวกเตอร์ควอไซกรีนฟังก์ชัน  $G_1^1$  และ  $G_2^1$  ตามลำดับ จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A^i(r) = \mu \int_S \bar{G}_A^1(r, r') \cdot J_s(r') ds' \quad (4.35)$$

สำหรับกระแสที่แผ่นสายอากาศ  $J_s$  บนระนาบ  $z = z'$  เมื่อ  $i = 1$  หรือ  $2$

ในทางตรงกันข้าม  $\bar{G}_A^1$  คือการแก้ปัญหาสมการ

$$(\nabla^2 + k^2)\bar{G}_A^1(r, r') = -\bar{I}_t\delta(r, r') \quad \text{สำหรับขอบเขตที่ 1} \quad (4.36)$$

$$(\nabla^2 + k_0^2)\bar{G}_A^1(r, r') = -\bar{I}_t\delta(r, r') \quad \text{สำหรับขอบเขตที่ 2} \quad (4.37)$$

โดยขึ้นอยู่กับเงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสมสำหรับแต่ละขอบเขต

เพื่อแก้สมการหา  $\bar{G}_A^1$  และ  $\bar{G}_A^2$  เราใช้การแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform) จากสมการ 4.36 และ 4.37 เทียบกับ  $x$  และ  $y$  ผลลัพธ์การแปลงฟูเรียร์ของ  $\bar{G}_A^1$  และ  $\bar{G}_A^2$  ถูกกำหนดโดยการบังคับให้เป็นไปตามเงื่อนไขขอบเขตบนองค์ประกอบที่ตัดกันของสนามดังนี้

$$\bar{E}_t^1(k_x, k_y, 0) = 0 \quad (4.38)$$

$$\bar{E}_t^1(k_x, k_y, d) = \bar{E}_t^2(k_x, k_y, d) \quad (4.39)$$

$$\bar{H}_t^1(k_x, k_y, d) = \bar{H}_t^2(k_x, k_y, d) \quad (4.40)$$

ศักย์แวกเตอร์ของกรีนฟังก์ชันสำหรับขอบเขตที่ 1 และ 2 หาได้จากสมการใช้การแปลงฟูเรียร์ผกผัน (inverse Fourier transform) ของ  $\bar{G}_A^1$  และ  $\bar{G}_A^2$  สำหรับขอบเขตไดโพลีกริกจะได้

$$\begin{aligned} \bar{G}_A^1(r, r') = & \frac{1}{2\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} dk_x dk_y [(\hat{x}\hat{x} + \hat{y}\hat{y})G_a(k_x, k_y, z, z') \\ & - [(\hat{x}\hat{x}k_x + \hat{y}\hat{y}k_y)G_b(k_x, k_y, z, z')] e^{jk_x(x-x') - jk_y(y-y')} \end{aligned} \quad (4.41)$$

เมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G_a(k_x, k_y, z, z') = -\frac{e^{-jk_{z1}(z-z')} - e^{-jk_{z1}|z-z'|}}{2jk_{z1}} \quad (4.42)$$

$$+ \frac{\sin(k_{z1}z)}{k_{z1}T_e} \{k_{z1}\cos[k_{z1}(d-z')] + jk_{z2}\sin[k_{z1}(d-z')]\}$$

$$G_b(K_x, K_y, z, z') = \frac{(\epsilon_r - 1)\sin(k_{z1}z')\cos(k_{z1}z)}{T_e T_m} \quad (4.43)$$

$$T_e = k_{z1}\cos(k_{z1}d) + jk_{z2}\sin(k_{z1}d) \quad (4.44)$$

$$T_m = \epsilon_r k_{z2}\cos(k_{z1}d) + jk_{z1}\sin(k_{z1}d) \quad (4.45)$$

ในสมการที่กล่าวมาข้างต้น

$$k_{z1} = \begin{cases} (\epsilon_r k_0^2 - k_t^2)^{1/2} & ; k_t^2 \leq \epsilon_r k_0^2 \\ -j(k_t^2 - \epsilon_r k_0^2)^{1/2} & ; \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.46)$$

$$k_{z2} = \begin{cases} (k_0^2 - k_t^2)^{1/2} & ; k_t^2 \leq k_0^2 \\ -j(k_t^2 - k_0^2)^{1/2} & ; \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.47)$$

$$\text{เมื่อ } k_t^2 = k_x^2 + k_y^2$$

#### 4.4 การสูญเสียในวัสดุฐานรองชนิดคอนกรีตทองคำ

คุณสมบัติของวัสดุฐานรองสายอากาศนั้นนับว่าเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อคุณสมบัติโดยรวมของสายอากาศ หากวัสดุฐานรองที่ใช้สร้างสายอากาศแบบไมโครสตริปมีการสูญเสีย (Loss) ในวัสดุฐานรองมากจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศด้อยลง ดังนั้นคุณสมบัติของวัสดุฐานรองจึงเป็นประเด็นหนึ่งที่จะต้องพิจารณาเพื่อความเหมาะสม ในปริภูมิพนธ์นี้จะได้พิจารณาสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปที่มีการรีโซแนนซ์อยู่ในโหมด  $TM_{100}$  โดยการวิเคราะห์แบบจำลองควาิตี้ซึ่งองค์ประกอบค่า  $Q$  รวมของแผ่นสายอากาศนั้นจะประกอบด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$Q_r$  เป็นค่า  $Q$  เนื่องจากความสูญเสียในการแผ่กระจาย

$Q_c$  เป็นค่า  $Q$  เนื่องจากความสูญเสียในตัวนำ

$Q_d$  เป็นค่า  $Q$  เนื่องจากความสูญเสียไดอิเล็กตริก

โดยที่  $Q_0$  สามารถหาได้จากค่าของ  $Q_r$ ,  $Q_c$  และ  $Q_d$  ดังสมการ

$$\frac{1}{Q_0} = \frac{1}{Q_r} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} \quad (4.48)$$

และสามารถเขียนความสัมพันธ์ของ  $Q_0$  และประสิทธิภาพ  $\eta$  ได้ว่า

$$\eta = \frac{Q_0}{Q_r} \quad (4.49)$$

โดยที่

$$Q_r = \frac{3}{8} \epsilon_r \frac{\lambda_0}{h}$$

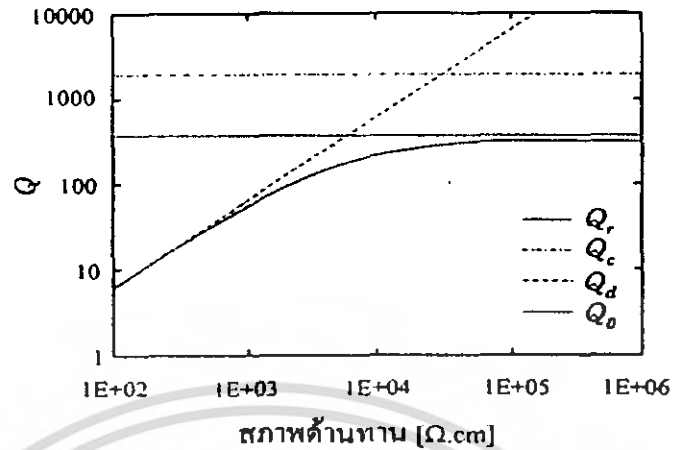
$$Q_c = \frac{h}{\delta_s}$$

$$Q_d = \frac{1}{\tan \delta}$$

เมื่อ  $\epsilon_r$ ,  $h$  และ  $\tan \delta$  เป็นค่าคงตัววัสดุฐานรอง ความหนาของวัสดุฐานรอง และแทนเจนต์การสูญเสียของวัสดุฐานรอง ตามลำดับ ส่วน  $\delta_s$  เป็นความหนาของแผ่นตัวนำ

การเปลี่ยนแปลงของ  $Q_d$  และ  $Q_0$  เปรียบเทียบกับสภาพความต้านทาน ( $\rho$ ) ของวัสดุฐานรอง แสดงดังรูปที่ 4.9 สังเกตเห็นได้ว่าเส้นโค้งของค่า  $Q_r$  และ  $Q_d$  ตัดกันที่ตำแหน่ง  $\rho_{th} = 5 \times 10^3$  [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] โดยที่  $Q_d$  จะมีความสำคัญเมื่อ  $\rho < \rho_{th}$  และทำให้คุณสมบัติของสายอากาศด้อยลง แต่ถ้า  $\rho > \rho_{th}$  จะทำให้ความสูญเสียในวัสดุฐานรองลดน้อยลง ซึ่งทำให้ได้สายอากาศที่มีคุณสมบัติโดยรวมดีขึ้นตามไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

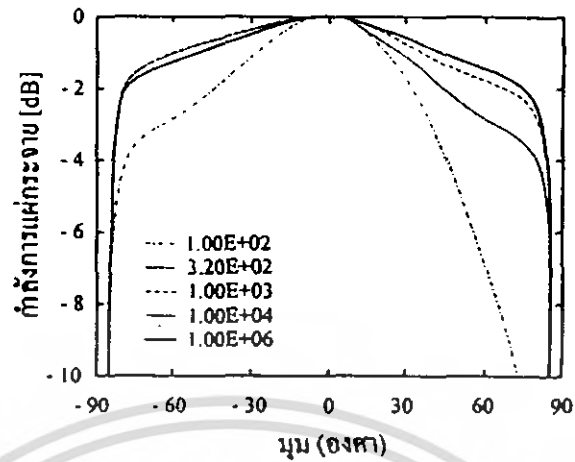


รูปที่ 4.9 องค์ประกอบ  $Q$  เปรียบเทียบกับสภาพความต้านทานของวัสดุฐานรอง

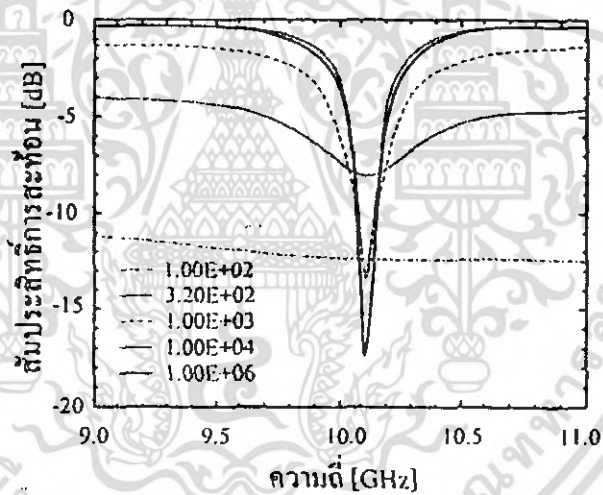
#### 4.5 แบบรูปการกระจายคลื่นของสายอากาศแผ่น

เนื่องจากวัสดุฐานรองที่มีค่าความต้านทานและค่าการสูญเสียที่แตกต่างกันนั้น จะมีผลต่อแบบรูปแบบการแผ่กระจายคลื่น โดยตรง ดังนั้นการวิเคราะห์ถึงรูปการแผ่กระจายที่ได้จากการสร้างสายอากาศแผ่นแบบ โมโนลิทริกบนวัสดุฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ จึงเป็นสิ่งที่ใช้พิสูจน์ถึงการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศว่ามีประสิทธิภาพแตกต่างจากการสร้างบนวัสดุฐานรองที่เป็นฉนวนแบบอื่นอย่างไร โดยในการวิเคราะห์หารูปแบบการแผ่กระจายคลื่นนี้ได้อาศัยคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์ โดยใช้โปรแกรมโมเมนต์ เพื่อหาคุณลักษณะของสายอากาศเช่น แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นตลอดจนการเนื่องจากการสะท้อนกลับ ซึ่งโปรแกรมนี้ได้อาศัยการวิเคราะห์ด้วยวิธีโมเมนต์ตั้งที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนต้น โดยสายอากาศที่สร้างขึ้นนั้นทำงานอยู่ในโหมด  $TM_{100}$

จากการเขียนแบบจะได้รูปแบบการแผ่กระจายสนามไฟฟ้าที่ค่า  $\rho$  ต่างๆ กัน แสดงดังรูปที่ 4.10 สมมติให้ระนาบกรวดมีขนาดใหญ่มาก เมื่อสภาพความต้านทานมีค่าต่ำกว่า  $10^3$  [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่ได้จะไม่สมมาตร เพราะว่าความบริสุทธิ์ของโมดรีโซแนนท์ลดลงเนื่องจากการลดลงขององค์ประกอบ  $Q$  แบบนอร์มัลของสัมประสิทธิ์สะท้อนกลับจะเพิ่มขึ้นตามการลดลงของสภาพความต้านทานได้แสดงดังรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่า อัตราขยายจะลดลงเมื่อ  $\rho$  น้อยกว่า  $10^4$  [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] และในรูปเดียวกันยังได้แสดงถึงประสิทธิภาพการแผ่กระจาย  $\eta$  ซึ่งได้คำนวณโดยใช้แบบจำลองควาตีอิกด้วย

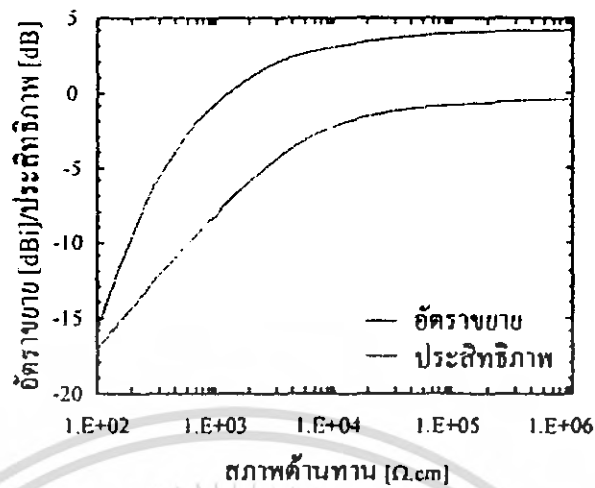


รูปที่ 4.10 แบบรูปการแผ่กระจายสนามไฟฟ้าบนวัสดุฐานรองที่  $\rho$  ต่างกัน



รูปที่ 4.11 สัมประสิทธิ์การสะท้อนบนวัสดุฐานรองที่  $\rho$  ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 อัตราขยายของสายอากาศและประสิทธิภาพเทียบกับสภาพความต้านทาน

#### 4.6 ขั้นตอนการออกแบบ

ในหัวข้อนี้เราจะมาพิจารณากันถึงขั้นตอนการออกแบบตลอดจนวิธีการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปรูปลิ่มเหลี่ยมคี่ ซึ่ง เป็นแบบที่ง่ายที่สุดสำหรับการออกแบบสายอากาศในลักษณะนี้ เนื่องจากปริยญาณิพันธ์ฉบับนี้ต้องการชี้ให้เห็นถึงคุณสมบัติของวัสดุฐานรองที่มีความเหมาะสม สำหรับการออกแบบสายอากาศได้อาศัยคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ โดยได้ใช้โปรแกรม MDS แต่อย่างไรก็ตามผู้ออกแบบยังคงต้องป้อนค่าเริ่มต้นให้กับคอมพิวเตอร์ก่อน ค่าที่ป้อนให้นี้จะถูกใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการเขียนแบบ (Simulate) ซึ่งผู้ออกแบบเป็นผู้กำหนดคุณสมบัติต่างๆ ของสายอากาศที่เราต้องการเช่น ความถี่รีโซแนนท์ อินพุตอิมพีแดนซ์ ขนาดของสายอากาศแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น ฯลฯ โดยอาศัยค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบดังนี้

ออกแบบที่ความถี่	$f_x = 10 \text{ GHz}$
สภาพยอมสัมพัทธ์	$\epsilon_r = 11.8$
ความหนาของวัสดุฐานรอง	$h = 0.38 \text{ mm}$
ความหนาของแผ่นตัวนำ	$t = 0.2 \times 10^{-3} \text{ mm}$
สภาพความนำ	$\sigma = 4.513 \times 10^7 \text{ S/m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำพารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านี้มาใช้เป็นค่าเริ่มต้นให้กับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยใน ส่วนของขั้นตอนการออกแบบแสดงได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การออกแบบในส่วนของสายอากาศแผ่น (Patch Antenna Part) โดยใช้ โปรแกรมโมเมนตัม พารามิเตอร์ต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.13

### 1. คำนวณค่า

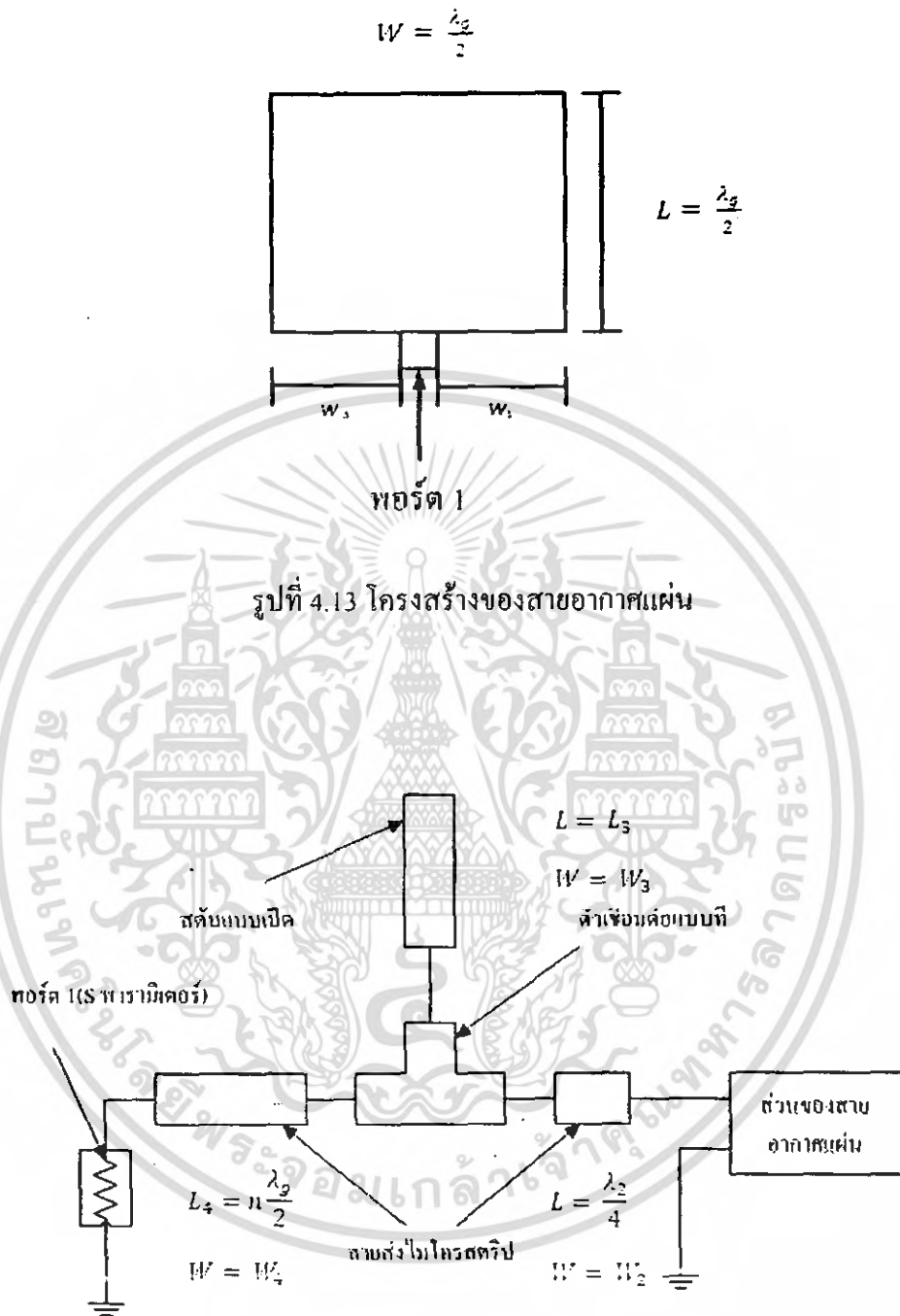
$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (4.46)$$

โดยที่

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_r}$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left( 1 + 2 \frac{h}{w_0} \right)^{-1/2}$$

2. กำหนดขนาดของแพทช์โดยให้  $w_1 = \frac{\lambda_g}{2}$  และ  $L_1 < \frac{\lambda_g}{2}$
3. ใส่พอร์ต ณ บริเวณตรงกลางขอบล่างของแพทช์โดยให้เป็นที่เหลื่อมจตุรัสขนาด  $\frac{w_1}{100}$
4. ทำการจำลอง (Simulate) โดยใช้โปรแกรมโมเมนตัม
5. คำนวณค่า  $Z_{in}$  จาก S-Parameter,  $S_{11}$  โดย  $Z_{in} = \frac{1+S_{11}}{(1-S_{11}) \cdot 50}$
6. แยกค่า  $Z_{in}$  ออกเป็นส่วนของค่าจริงและส่วนของค่าจินตภาพ คือ  $\text{Real}(Z_{in})$  และ  $\text{Img}(Z_{in})$  ตามลำดับ
7. พิจารณาส่วนของค่าจินตภาพของ  $Z_{in}$  โดยถ้าหากว่าค่าที่ได้มีค่าไม่เข้าใกล้ 0 ให้ทำการเปลี่ยนค่าของ  $L_1$  ใหม่แล้วทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 4 แต่ถ้าหากส่วนของค่าจินตภาพของ  $Z_{in}$  มีค่าเข้าใกล้ 0 และส่วนของค่าจริงของ  $Z_{in}$  มีค่าใกล้เคียง 50 ก็แสดงว่าค่า  $L_1$  ค่าใหม่นี้ใช้ได้

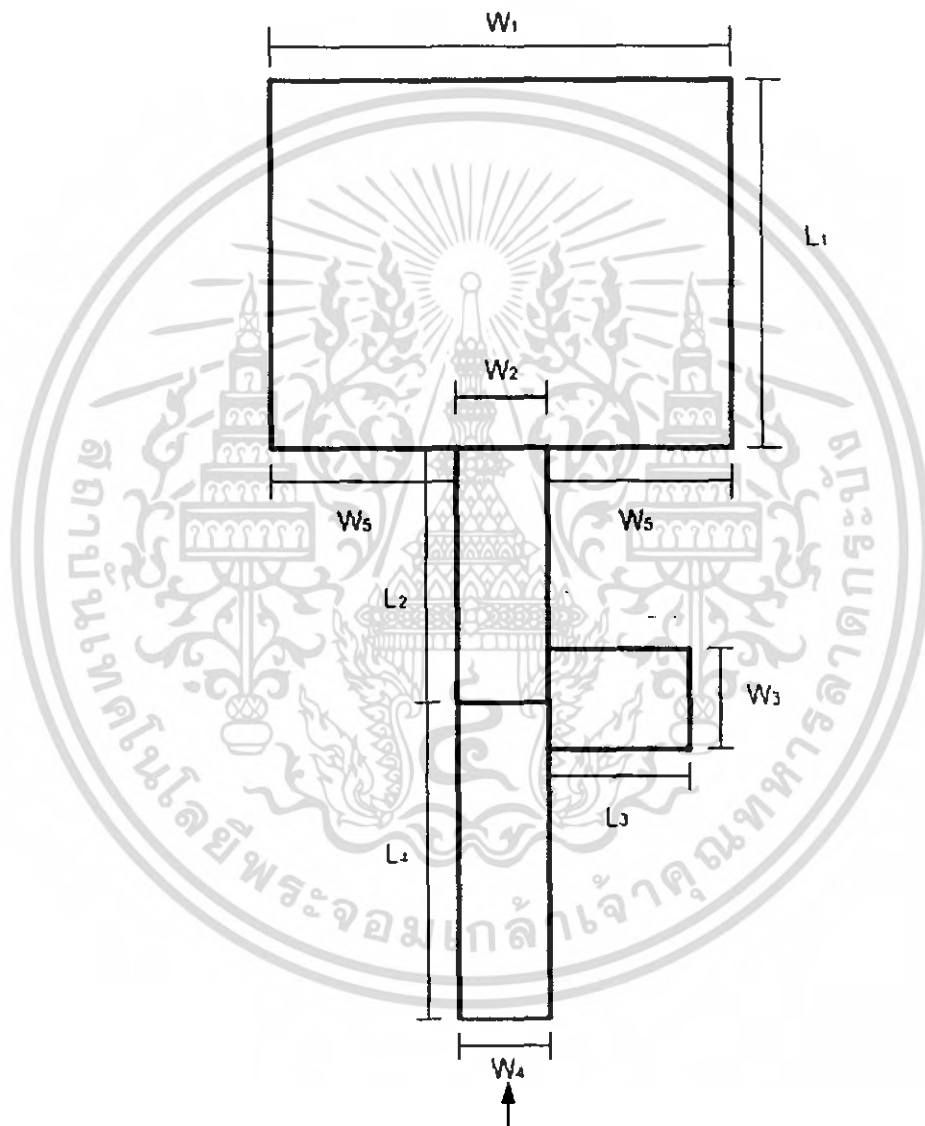


รูปที่ 4.14 โครงสร้างในส่วนของแมตซ์ซิ่ง

ขั้นตอนที่ 2 การออกแบบในส่วนของแมตซ์ซิ่ง (*Matching Part*) จากรูปที่ 4.14 โดยใช้โปรแกรม MDS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ใส่ข้อมูลทั้งหมดที่จำเป็นให้กับโปรแกรม MDS
2. คำนวณความกว้าง  $W$  ที่  $Z = 50$  โอห์ม โดยแทรกค่า  $W=W_2=W_3=W_4$
3. ทำการคำนวณและทดลองปรับค่า  $L_3$  จนกว่า  $\text{Real}(Z_{in})$  จะมีค่าเข้าใกล้  $50 \Omega$  และ  $\text{Im}g(Z_{in})$  มีค่าเข้าใกล้ 0 โดย  $Z_{in} = \frac{1+s_{11}}{(1-s_{11}) \times 50}$



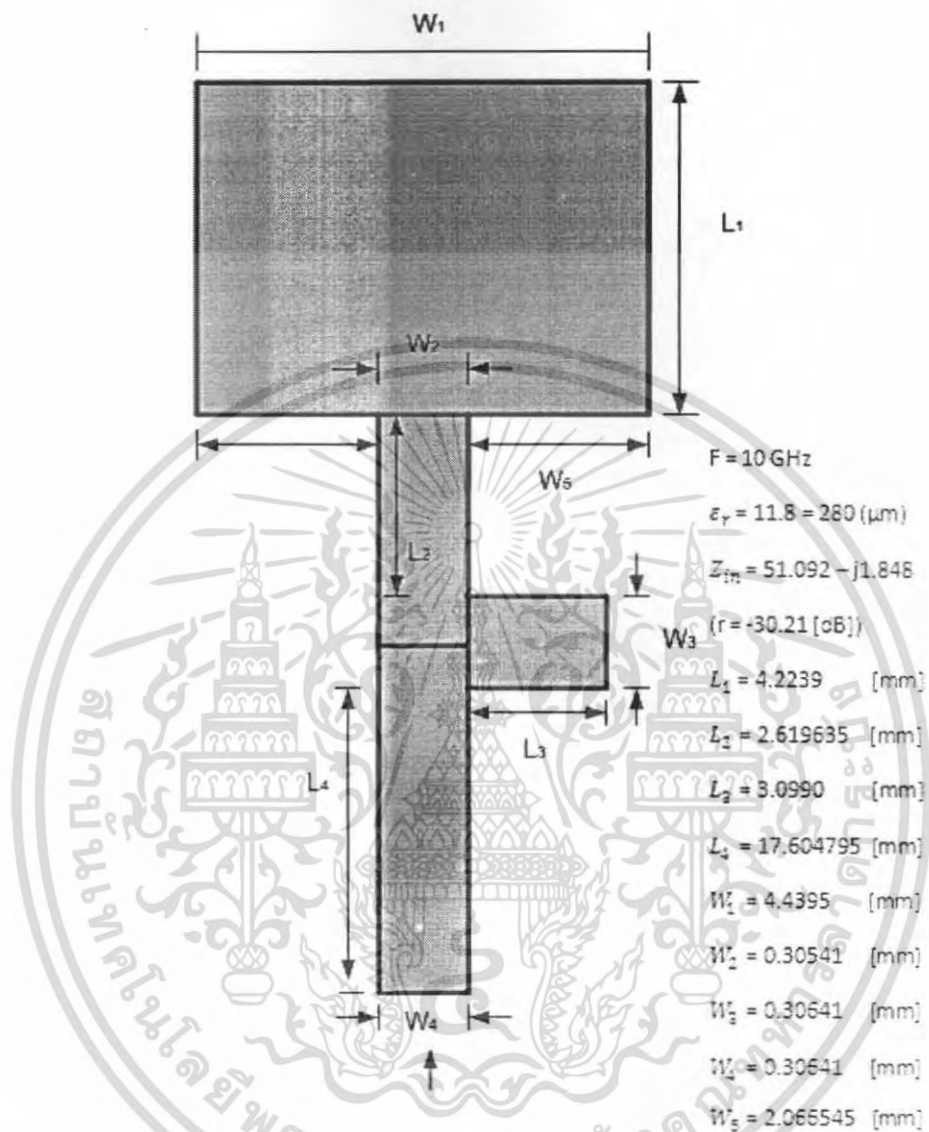
รูปที่ 4.15 ลักษณะโครงสร้างสายอากาศเมื่อนำสายอากาศแผ่นมารวมเข้ากับวงจรในส่วนของ  
แม็ทซ์ซึ่งเรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 3 การออกแบบส่วนของสายอากาศแผ่นเข้ากับส่วนของเมตซ์ซิ่ง แสดงผังรูปที่ 4.15 โดยใช้โปรแกรม MDS

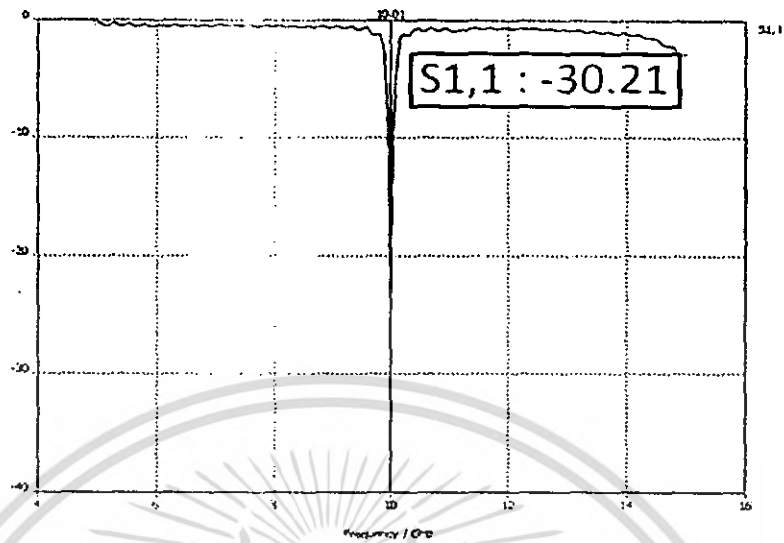
1. นำส่วนของวงจรเมตซ์ซิ่งที่ออกแบบโดยโปรแกรม MDS มาใส่ร่วมกับ *Layout* เดียวกันกับส่วนของสายอากาศแผ่นบนโปรแกรมโมเมนตัม
2. กำหนด *Port 1* ที่จุดเริ่มต้นของสายป้อนสัญญาณ
3. ทำการจำลองโดยใช้โปรแกรมโมเมนตัม
4. คำนวณค่าอินพุตอิมพีแดนซ์จากค่า  $S_{11}$  และตรวจสอบส่วนจริงของ  $Real(Z_{in})$  ว่ายังคงมีค่าใกล้เคียง 50 โอห์ม และส่วนจินตภาพ  $Img(Z_{in})$  มีค่าเข้าใกล้ 0 อยู่หรือไม่ถ้าไม่ปรับ  $L$ , แล้วเริ่มต้นใหม่ โดยค่าขนาดของ  $S_{11}, \Gamma(S_{11})$  ที่ใช้ได้คือ  $\Gamma(S_{11}) = -30 \text{ dB}$



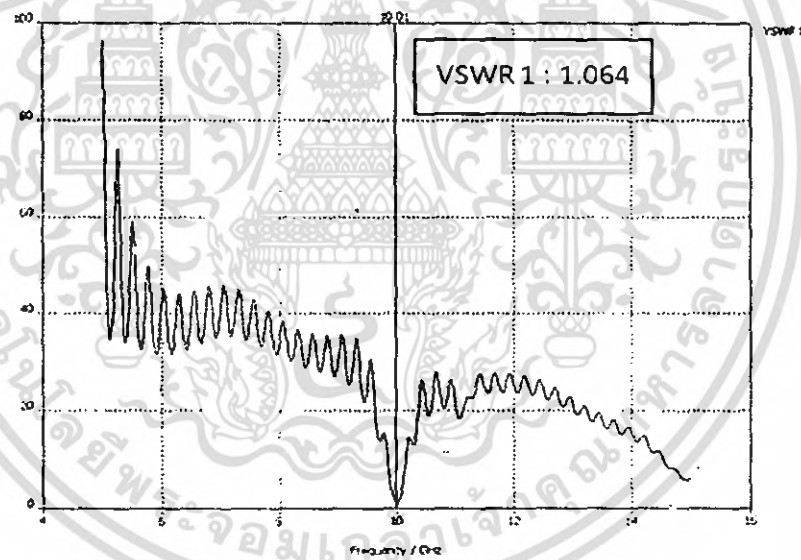


รูปที่ 4.16 ขนาดของสายอากาศและส่วนของเม็ทซ์ซึ่งหลังการออกแบบเรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17  $S_{11}$  ที่ได้จากโปรแกรม MDS



รูปที่ 4.18 VSWR (Voltage Standing Wave Ratio)

ตารางที่ 4.1 แสดงผล *simulation*

DesignFreq. (GHz)	Resonant Freq. (GHz)	S11 (dB)	Zin (Ohm)	VSWR
10	10.01	-30.210	51.092-j1.848	1.064

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตอิมพีแดนซ์ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับและความถี่

Frequency	Real( $Z_{in}$ )	Img( $Z_{in}$ )	dB( $S_{11}$ )
8.000e+09	1.397	-158.450	-0.044
8.080e+09	0.826	-117.555	-0.044
8.160e+09	0.557	-91.706	-0.044
8.240e+09	0.411	-73.584	-0.045
8.320e+09	0.324	-59.936	-0.046
8.400e+09	0.268	-49.170	-0.047
8.480e+09	0.220	-49.168	-0.047
8.560e+09	0.199	-32.452	-0.049
8.640e+09	0.187	-25.631	-0.051
8.720e+09	0.180	-19.439	-0.051
8.800e+09	0.178	-13.680	-0.058
8.880e+09	0.181	-8.203	-0.061
8.960e+09	0.185	-2.880	-0.064
9.040e+09	0.199	2.405	-0.069
9.120e+09	0.219	7.770	-0.074
9.200e+09	0.249	13.338	-0.081
9.280e+09	0.294	19.263	-0.089
9.360e+09	0.265	25.742	-0.089
9.440e+09	0.488	33.067	-0.118
9.520e+09	0.756	41.686	-0.155
9.600e+09	1.532	52.494	-0.253
9.680e+09	4.269	64.002	-0.561
9.760e+09	2.755	48.753	-0.247
9.840e+09	10.327	126.777	-0.481
9.920e+09	182.496	243.704	-1.686

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

Frequency	Real( $z_{in}$ )	Img( $z_{in}$ )	dB( $S_{11}$ )
10.00e+09	51.092	-1.848	-30.210
10.08e+09	20.398	75.205	-2.170
10.16e+09	19.761	144.252	-0.726
10.22e+09	285.765	897.304	-0.279
10.24e+09	36.942	275.246	-0.403
10.40e+09	145.077	-742.208	-0.219
10.48e+09	17.612	-281.538	-0.186
10.56e+09	6.115	-171.743	-0.167
10.64e+09	3.090	-121.619	-0.155
10.72e+09	1.831	-92.214	-0.145
10.80e+09	1.253	-72.446	-0.140
10.88e+09	0.937	-57.904	-0.139
10.96e+09	0.749	-46.497	-0.140
11.04e+09	0.633	-27.094	-0.142
11.12e+09	0.560	-29.021	-0.145
11.20e+09	0.514	-21.844	-0.150
11.28e+09	0.489	-15.264	-0.155
11.36e+09	0.479	-9.055	-0.161
11.44e+09	0.475	-3.039	-0.164
11.52e+09	0.496	2.953	-0.172
11.60e+09	0.532	9.086	-0.179
11.68e+09	0.586	15.542	-0.186
11.76e+09	0.666	22.547	-0.192
11.84e+09	0.782	30.408	-0.198
11.92e+09	0.954	39.577	-0.204
12.00e+09	1.22	50.772	-0.209

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7 สรุป

จากการวิเคราะห์โดยวิธีแบบจำลองควาวิคิ และวิธี โมเมนต์ในหัวข้อที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติของวัสดุฐานรองชนิดคอนกรีตค้ำ ซึ่งจากการวิเคราะห์ถ้ามีสภาพความต้านทาน ( $\rho$ ) ที่มากกว่า  $10^4$  [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] จะให้การสูญเสียที่เกิดขึ้นในวัสดุฐานรองและนอกจากนี้ยังจะทำให้ได้แบบรูปของสายอากาศแบบไมโครสตริปที่สมมาตรตามทฤษฎี จากผลที่ได้จากการเลียนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าวัสดุฐานรองชนิดคอนกรีตค้ำนี้ได้นำเสนอแนะสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุฐานรองสำหรับสายอากาศที่มีโครงสร้างแบบระนาบได้เป็นอย่างดี และเหมาะสมและในอนาคตอันใกล้นี้การที่จะรวบรวมสายอากาศที่มีลักษณะ โครงสร้างแบบระนาบเข้ากับอุปกรณ์แอกทีฟที่เป็นไปได้อย่างแน่นอน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### กระบวนการสร้างสายอากาศ

จากที่ได้ศึกษาคุณสมบัติและโครงสร้างของสายอากาศบนวัสดุฐานรองต่างๆ ตลอดจนถึงการวิเคราะห์และหลักการออกแบบโดยใช้พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่สำคัญของสายอากาศแผ่นแบบ ไมโครสตริป ดังที่กล่าวในบทที่ 2, 3 และ 4 เพื่อที่สามารถสร้างสายอากาศให้มีประสิทธิภาพสูงจึงได้นำเสนอวัสดุฐานรองใหม่ ซึ่งฐานรองที่ใช้เป็นวัสดุฐานรองใหม่นี้เป็นวัสดุฐานรองใหม่เป็นสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดเอ็น ที่ถูกเติมด้วยอะตอมทองคำ จะแสดงคุณสมบัติของไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ยังเป็นผลทำให้สภาพความต้านทานเปลี่ยนแปลงไปด้วย

กระบวนการสร้างของสายอากาศในปริภูมิพลาสมาเป็นกระบวนการสร้างที่ง่ายแบบทั่วไปทางด้านเซมิคอนดักเตอร์ โดยทำที่อุณหภูมิสูง ซึ่งขั้นตอนการสร้างได้แสดงในแผนภูมิรูปที่ 5.1

กระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำส่วนใหญ่จะเป็นกระบวนการสร้างในแนวระนาบ (Planar Process) ซึ่งรวมถึงสายอากาศระนาบด้วย กระบวนการสร้างในแนวระนาบได้เริ่มต้นสร้างตั้งแต่ปี ค.ศ. 1959 ด้วยจุดเด่นของกระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำแบบนี้เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการสร้างในยุคอื่นๆ เช่น วิธีการอัลลอยด์ เป็นต้น พบว่ากระบวนการสร้างในแนวระนาบมีข้อได้เปรียบสำหรับเป็นวงจรรวมคือ รอยต่อของสารกึ่งตัวนำจะถูกคลุมด้วยชั้นของซิลิคอน ไดออกไซด์ ซึ่งป้องกันมิให้ปฏิกิริยาโดยตรงกับสายอากาศหรือสิ่งเจือปนอื่นๆ เป็นผลทำให้เกิดกระแสรั่วไหลต่ำมาก ดังนั้นอุปกรณ์จึงมีความเชื่อถือได้สูง (High Reliability) และการออกแบบต้นแบบ และเทคนิคการจำกัดซึ่งใช้ในการกำหนดโครงสร้างซึ่งจะทำให้สามารถลดขนาดได้เล็กลง และสะดวกในการสร้างอุปกรณ์จำนวนมากๆ ได้พร้อมกันบนแผ่นผลึกซิลิคอนเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.1 กระบวนการสร้างสายอากาศ

### 5.1.1 ขั้นตอนทำกระจกต้านแบบ

หลังจากที่ได้ออกแบบวงจรเรียบร้อยแล้วบนกระดาษกราฟ จากนั้นจะนำมาเป็นต้นแบบในการตัดแผ่นพลาสติก ลามิเนต ประกอบด้วยไมลาร์ซีทเคลือบพลาสติกสีแดง เครื่องตัดนั้นเรียกว่าไมโครพล็อตเตอร์ เป็นใบมีดเลื่อนตัดได้ 2 แกน มีความละเอียดถึง  $0.1 \mu\text{m}$  ไปตำแหน่งที่ต้องการตัดแล้ว ทำการตัดตามข้อมูลที่เก็บไว้โดยจะตัดลอกเฉพาะพลาสติกสีแดงออกเหลือเป็นแผ่นไมลาร์ใส เมื่อได้ต้นแบบบนแผ่นไมลาร์แล้ว จากนั้นก็นำมาถ่ายย่อส่วน หากต้องการย่อส่วนลงมากๆ เช่น 20 เท่า เราก็จะใช้วิธีย่อส่วน 2 ครั้ง ครั้งแรกย่อต้นฉบับลง 20 เท่าลงบนฟิล์มกระจก (Phosphosilicate glass) จากนั้นนำฟิล์มกระจกไปย้อมซ้ำอีก 10 เท่า จะได้การถ่ายย่อส่วน 200 เท่านำไปพิมพ์ลวดลายลงบนแผ่นกระจกเรียบ เมื่อใช้เป็น Photomask กล้องถ่ายย่อส่วนเรียกว่า Step and Repeat Camera ใช้เวลาในการถ่าย 10-30 วินาที จากนั้นนำมาแช่น้ำยา Developer อีก  $1\frac{1}{2}$  นาที ล้างน้ำแล้วแช่ Fixer อีก 3 นาที เอาไปเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ) เป็นการจบขั้นตอนการออกแบบ และถ่ายมาส์คพร้อมที่จะนำไปใช้ในการถ่ายต้นแบบวงจรในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีได้



รูปที่ 5.1 กระจกมาส์ค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.1.2 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นซิลิคอน

### 5.1.2.1 เช็คุณภาพสมบัติ

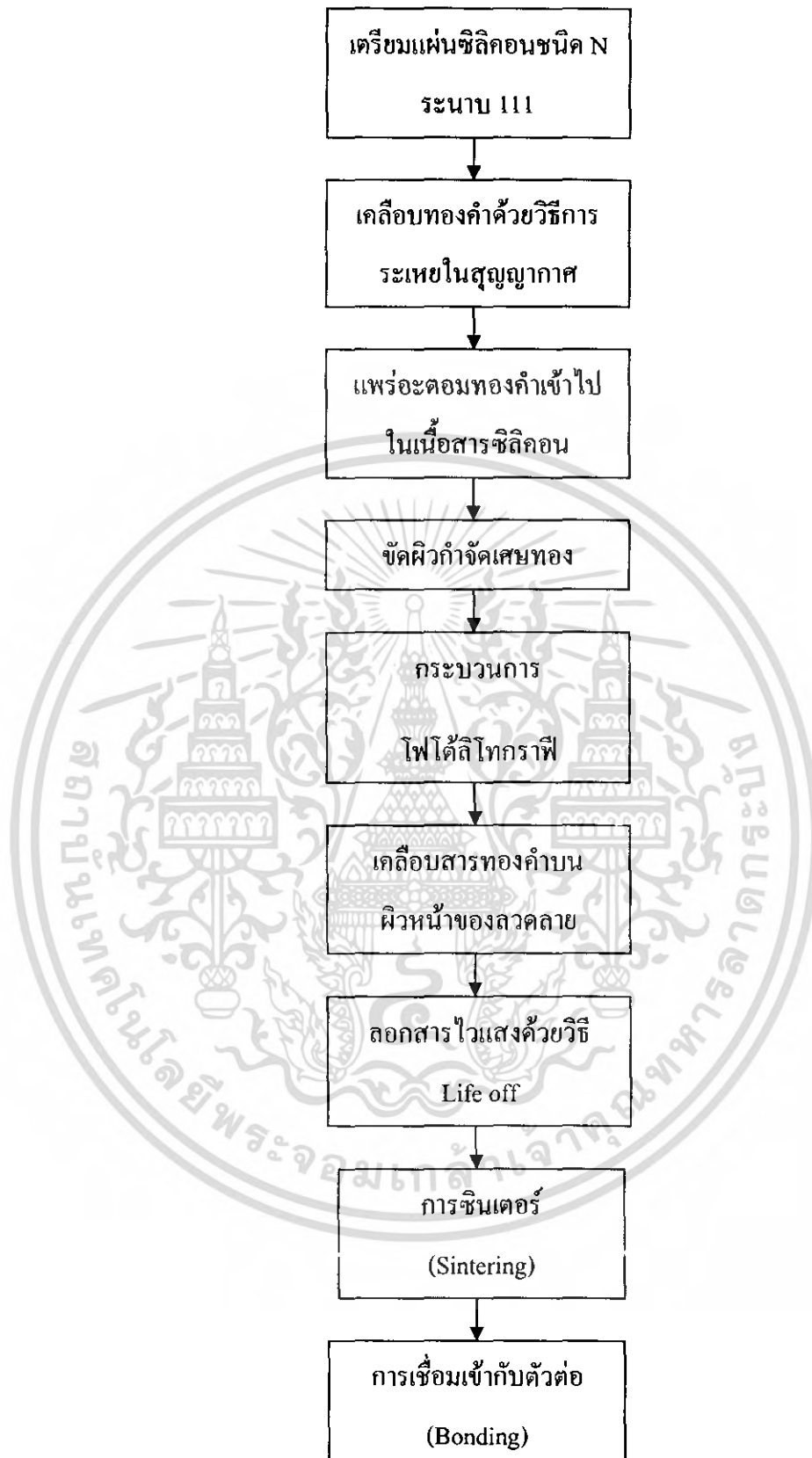
- แผ่นซิลิคอนชนิดเอ็ระนาบ(111)
- พิกัดความต้านทาน  $10^2$  [ $\Omega$ -cm]
- ความหนา  $380 \mu m$

## 5.1.3 กระบวนการเคลือบสารทองคำ (Au Evaporation)

ในกระบวนการเคลือบชั้นทองคำในสุญญากาศ (Gold Evaporation) โดยการใช้อุปกรณ์ (Vacuum evaporation) ได้ทำการเคลือบแผ่นผลึกซิลิคอนด้วยชั้นทองคำหนาประมาณ  $0.16 \mu m$

สำหรับเทคนิคการเคลือบสารในระบบสุญญากาศที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำหลายวิธี ในปริญญานิพนธ์นี้ได้ใช้เทคนิค Filament Evaporation

กระบวนการเคลือบด้วยไส้ (Filament Evaporation) เป็นวิธีที่ง่ายที่สุด สิ้นเปลืองน้อยไม่มีผลต่อการแผ่กระจายไอออน แต่วิธีนี้จะมีข้อเสียที่อายุการใช้งานของไส้ (Filament) จะสั้นสำหรับการเคลือบสารทองคำได้โดยทำให้สารทองคำนั้นได้รับความร้อนจากไส้หรือโบท (Boat) ที่ทำจากสารทังสเตน (Tungsten) หรือมอลิตินัม (Molybdenum)



รูปที่ 5.2 กระบวนการสร้างของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

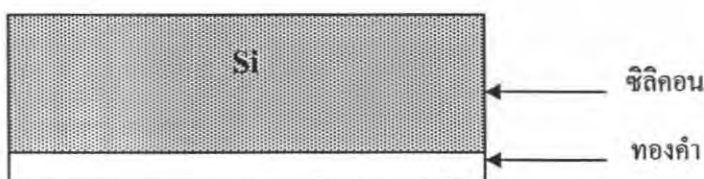


รูปที่ 5.3 ภาพตัดขวางของแผ่นผลึกซิลิคอน

ไส้หรือ โป๊ตนี้ จะให้ความร้อนออกมาจากการที่มีกระแสไฟฟ้าจำนวนมากไหลผ่าน โดยในขณะที่ทำการเคลื่อนสารทองคำ จะควบคุมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านไส้หรือ โป๊ตเพิ่มขึ้นทีละน้อยๆ จนกระทั่งสารทองคำที่วางอยู่ที่ไส้หลอมตัวเป็นของเหลวติดอยู่กับไส้ก็จะระเหยเป็นไอฟุ้งกระจายเคลือบแผ่นผลึกซิลิคอนที่วางใน chamber

ลำดับขั้นตอนของการเคลื่อนสารในสุญญากาศ

- 1) ทำความสะอาดและเตรียมผิวของแผ่นผลึกของแผ่นผลึกให้แห้ง
- 2) วางแผ่นผลึกลงใน chamber ที่ตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อให้สารที่เคลือบมีความหนาสม่ำเสมอ
- 3) ปิดวาล์วของ chamber ทำการดูดอากาศออกให้ความดันภายในให้ต่ำลงมาเหลือประมาณ  $10^{-3}$  มม. ของปรอท (Torr) โดยใช้ Rotary pump
- 4) ปิดวาล์วของ Rotary pump เปิดวาล์วของ Diffusion pump เพื่อทำให้ความดันใน chamber ลดลงเหลือราว  $3 \times 10^{-6}$  มม. ของปรอท (Torr)
- 5) เริ่มทำสารทองคำที่เคลือบให้เป็นไอ โดยมีกัมบังเพื่อมิให้สารที่เจือปนอยู่ ไม่เคลือบแผ่นผลึกซิลิคอน
- 6) ทำการเคลื่อนสารเชื้อทองคำลงบนแผ่นผลึกหน้าตามต้องการ ขณะทำการเคลื่อนสารแผ่นผลึกซิลิคอน บางครั้งควรให้ความร้อนบนแผ่นผลึกที่เหมาะสมเพื่อให้ชั้นของสารที่เคลือบติดแน่นกับแผ่นผลึกซิลิคอน
- 7) หยุดทำการเคลื่อนสาร ปล่อยให้ทุกอย่างใน chamber เย็นตัวลง 30 นาที
- 8) ปล่อยอากาศเข้าไปใน chamber อย่างช้าๆ จนความดันปกติแล้วยก chamber ขึ้น

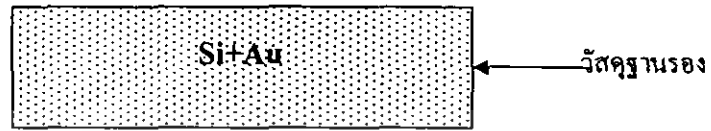


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 5.4 ภาพตัดขวางการเคลื่อนสารทองคำ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 5.1.4 กระบวนการแพร่อะตอมทองคำ (Au Diffusion)

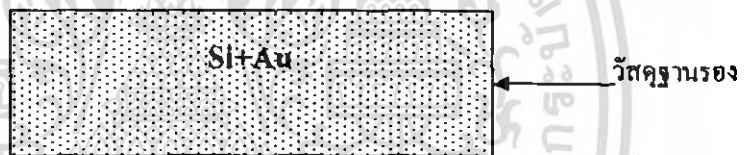
ในกระบวนการแพร่อะตอมทองคำลงในซิลิคอนนี้ ได้ทำที่อุณหภูมิ 1025 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง



รูปที่ 5.5 ภาพตัดขวางการแพร่อะตอมทองคำลงในแผ่นผลึกซิลิคอน

#### 5.1.5 การขัดผิวกำจัดเศษทอง (Au Lapping)

ได้ทำการ Lapping โดยใช้ผงขัดซิลิคอนคาร์ไบด์เบอร์ #1000, #2000 และ #4000 ตามลำดับเพื่อให้ผิวหน้าเรียบ



รูปที่ 5.6 ภาพตัดขวางหลังการ Lapping

#### 5.1.6 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

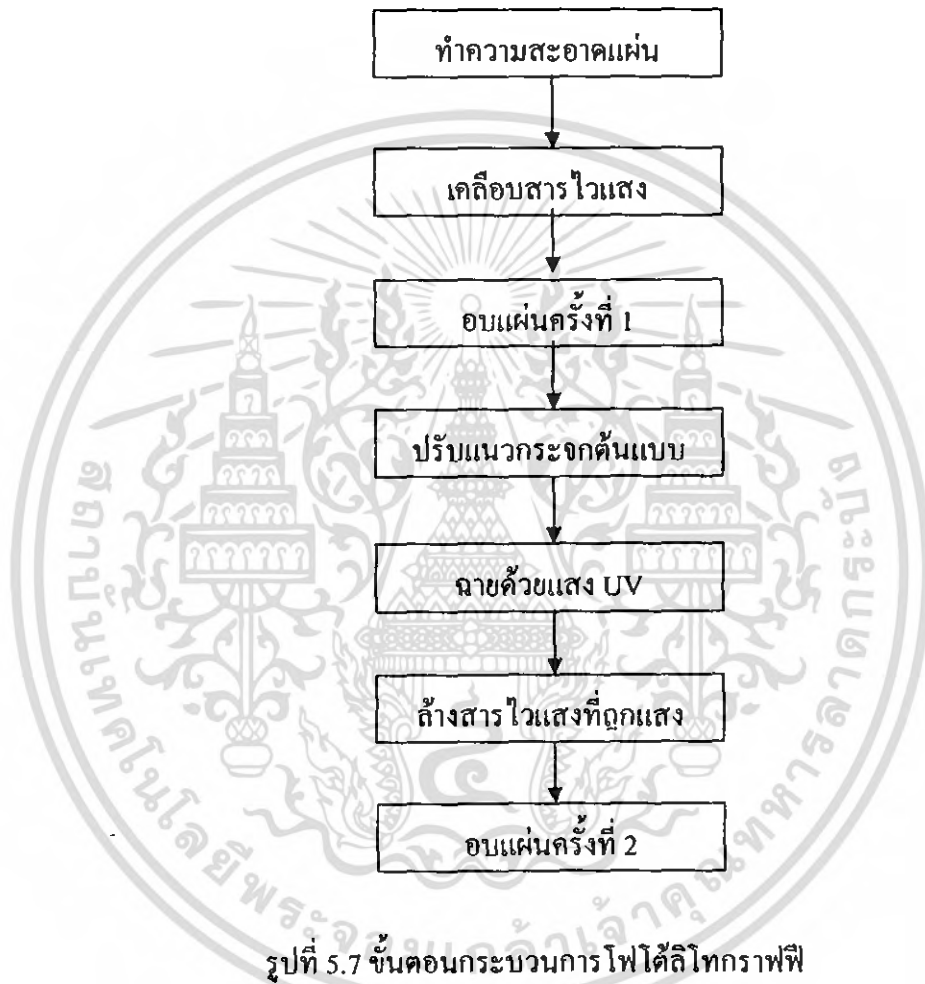
กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีเป็นขั้นตอนการถ่ายจากมาสก์ (Mask) ไปยังผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน ซึ่งขั้นตอนพื้นฐานของกระบวนการนี้ แสดงดังรูปที่ 5.9 สำหรับขั้นตอนโฟโตลิโทกราฟีต้องทำในห้องสะอาดสำหรับการปฏิบัติการเพื่อป้องกันฝุ่นละอองที่จะตกลงมาที่ฐานรองซิลิคอน ในขั้นตอนของน้ำยาไวแสงซึ่งจะทำให้เกิดจุดเสียขึ้นที่ลวดลายที่ถ่ายแบบลงไป จุดเสียที่เกิดขึ้นควบคุมไม่ให้เกิน 10% ไม่เช่นนั้นเมื่อถ่ายแบบครบทั้งกระบวนการซึ่งจะใช้มาสก์ ไม่ต่ำกว่า 7-8 แผ่น ทำให้อุปกรณ์ที่สร้างเสร็จมีโอกาสเสียหายมากกว่า 50% ดังนั้นห้องสะอาดจึงมีความจำเป็นมากสำหรับการโฟโตลิโทกราฟี

สำหรับขั้นตอนกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

- 1) ใช้สารไวแสง AZ 4620A + Acetone (1:1) ผสมให้เข้ากันที่ 600 rpm เวลา 5 วินาที
- 2) สปินเนอร์ (Spinner) ที่ 3000 rpm เป็นเวลา 30 วินาที

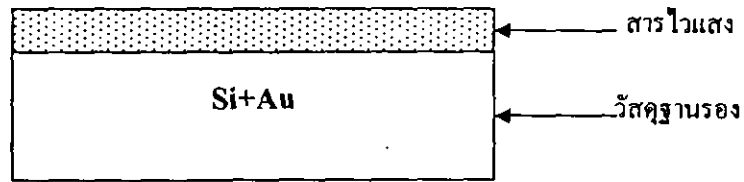
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หยดสาร ไวแสงบนแผ่นผลึกซิลิกอนที่ติดบนเป็นหมุนของสปินเนอร์ โดยตั้งความเร็วรอบสูงๆ เพื่อที่จะให้สาร ไวแสงเคลือบเป็นฟิล์มบางๆ บนแผ่นผลึกหนาประมาณ 3000 °A – 4000 °A โดยให้ความเร็วรอบ 3000 rpm เป็นเวลา 30 นาที ถ้าใช้ความเร็วรอบต่ำเกินไป ลักษณะของชั้นฟิล์มที่เคลือบแผ่นผลึกจะเกิดนูนตรงกลาง ถ้าความเร็วรอบที่สูงเกินไป ชั้นฟิล์มที่เคลือบก็จะกระจายไปนูนบริเวณขอบ ถ้าเคลือบหนาไป ผิวจะหยาบ ไม่เรียบ และที่สำคัญต้องระวังฝุ่นอย่างมาก



รูปที่ 5.7 ขั้นตอนกระบวนการโฟโวลิตโทกราฟี

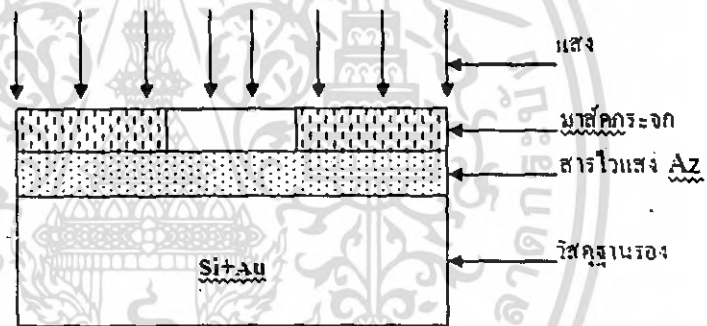
ลักษณะของชั้นฟิล์มที่เคลือบแผ่นผลึกจะเกิดนูนตรงกลาง ถ้าความเร็วรอบสูงเกินไป ชั้นฟิล์มที่เคลือบก็จะกระจายไปนูนที่บริเวณขอบ ถ้าเคลือบหนาไป ผิวจะหยาบ ไม่เรียบ และที่สำคัญต้องระวังฝุ่นอย่างมาก



รูปที่ 5.8 ภาพตัดขวางหลังจากเคลือบสารไวแสง

### 5.1.7 การฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเล็ต (Exposed to UV)

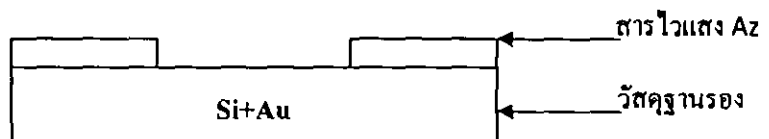
เมื่อจุ่มมาสก์เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็เป็นการฉายด้วยแสง U.V. (Ultra violet) ซึ่งเป็นแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นตั้งแต่ช่วง 193 – 436 นาโนเมตร และเพื่อให้แบบที่ถูกฉายมีความละเอียดแสงที่ต้องมีความพอดี การฉายแสงในแนวเส้นตรง (Alignment Expose) นั้นใช้เวลา 5 วินาที



รูปที่ 5.9 ภาพตัดขวางขั้นตอนการฉายแสง

### 5.1.8 การล้างสารไวแสง (Development)

การ Development เป็นการสร้างลวดลายบนหน้ายาไวแสงที่ผ่านการฉายแสงด้วย developer ในน้ำยาไวแสง (AZ Developer) แบบบวม ส่วนที่ถูกแสงจะถูกละลายออกไปด้วยน้ำบริสุทธิ์ โดยใช้เวลาประมาณ 1 ~ 2 นาที



รูปที่ 5.10 ภาพตัดขวางหลังจาก developer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ (Prebake) 90 °C โดยใช้เวลา 10 นาที อยู่ในเตาอบเพื่อให้ส่วนที่เป็นชั้นฟิล์มต้องทำให้ฟิล์มติดแน่นยิ่งขึ้น

### 5.1.9 กระบวนการเคลือบสารทองคำ (Au Evaporation)

ขั้นตอนและกระบวนการนี้เหมือนกับกระบวนการในขั้นตอนที่ 3 ทุกประการ



รูปที่ 5.11 ภาพตัดขวางกระบวนการเคลือบสารทองคำ

### 5.1.10 กระบวนการลอกฟิล์ม (Resist Removal Process หรือ Lift off Process)

ทำการลอกฟิล์มโดยใช้ (Acetone หรือ AZ-remove)



รูปที่ 5.12 ภาพตัดขวางของชิ้นงานที่ได้หลังจากการลอกฟิล์มออกแล้ว



(ก) ด้านหน้า



(ข) ด้านหลัง

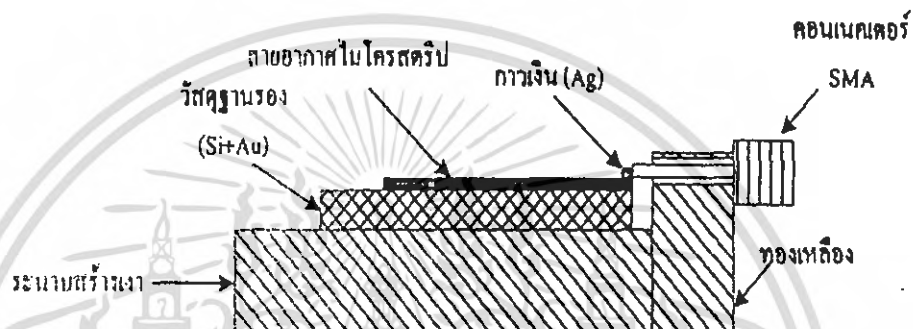
### รูปที่ 5.13 ชิ้นงานเมื่อทำการลอกฟิล์มออกแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.11 กระบวนการซินเตอร์ (Sintering)

ทำการซินเตอร์ที่อุณหภูมิประมาณ 250 ~ 300 °C เพื่อให้ส่วนสายอากาศกับเนื้อซิลิคอนยึดติดกันแน่นยิ่งขึ้น

### 5.1.12 กระบวนการเชื่อมต่อ



รูปที่ 5.14 โครงสร้างภาพตัดขวางของสายอากาศที่ได้หลังการเชื่อมต่อ

## 5.2 สรุป

ในบทนี้ได้แสดงถึงกระบวนการสร้างสายอากาศแผ่นแบบโทโนลิทริกบนฐานรองซิลิคอนที่ถูกโคปทองคำ แผ่นสลิคซิลิคอนที่นำมาสร้างเป็นชนิดเอ็น มีสภาพความต้านทาน  $10^2$  [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] สภาพความยอมสัมพัทธ์ ( $\epsilon_r$ ) 11.8 และระนาบ (111) ได้ใช้สารเจือทองคำบริสุทธิ์โคปด้วยวิธีสร้างที่ง่ายแบบทั่วไป ด้วยกระบวนการทางเซมิคอนดักเตอร์ (Semiconductor Process) โดยใช้ความร้อนในการระเหยในสุญญากาศ และแพร่สารเจืออะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1025 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ส่วนกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีเป็นการสร้างรูปแบบ (Pattern) ของสายอากาศ ด้วยการเคลือบสารไวแสง AZ 4620A หรือ AZ 5200E โดยใช้ สปีนเนอร์ 3000 rpm แล้วทำการอบที่อุณหภูมิ 90 °C โดยใช้เวลา 10 นาที จากนั้นนำไปฉายรังสีอัลตราไวโอเลต (UV) แล้วทำการ Developer ด้วย AZ (สำหรับ Developer) ก็จะได้ลวดลายสายอากาศ แล้วจึงนำไปเคลือบด้วยสารทองคำอีกครั้ง หลังจากนั้นนำฟิล์มออก ก็จะได้สายอากาศบนซิลิคอนตามที่ต้องการ และเพื่อให้การยึดติดของสายอากาศกับฐานรองแน่น ก็ทำการซินเตอร์ที่อุณหภูมิประมาณ 250 ~ 300 °C จากนั้นนำไปเชื่อมต่อเข้ากับคอนเนคเตอร์ SMA แล้วทำการทดสอบคุณสมบัติการแผ่กระจายของสายอากาศต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### การทดลองและผลการทดลอง

โดยปกติแล้ววัสดุฐานรองสำหรับสายอากาศที่มีโครงสร้างในลักษณะที่เป็นระนาบ (Planar) เช่นสายอากาศแผ่นไมโครสตริป สายอากาศแบบร่องบนระนาบสร้างเงา (Ground plane) ตลอดจนสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป นั้นจะเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวน (Insulator) แต่ยอมให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางผ่านได้ วัสดุฐานรองที่มีคุณสมบัติดังกล่าวนี้ในปัจจุบันมีอยู่ด้วยกันมากมายหลายชนิด โดยวัสดุแต่ละชนิดจะมีความเหมาะสมกับลักษณะงานที่แตกต่างกันไป

สำหรับซิลิคอนแล้ว โดยปกติจะเป็นวัสดุที่ให้ค่าสภาพความต้านทานที่ค่อนข้างต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่เป็นฉนวน ดังนั้นการที่จะทำให้ซิลิคอนมีสภาพความต้านทานสูงขึ้นได้นั้น จะต้องนำสารชนิดอื่นมาเจือปน สำหรับสำหรับในปริญญานิพนธ์นี้โดยเลือกใช้สารทองคำเป็นสารที่นำมาโคปให้กับสารซิลิคอนจากการศึกษาและสังเกตผลการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากสารทองคำที่โคปลงในซิลิคอน โดยผ่านกระบวนการต่าง ๆ ทางเคมีคอนดัคเตอร์ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 5

#### 6.1 การทดลองและผลการทดลองของสายอากาศไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโคปทองคำ

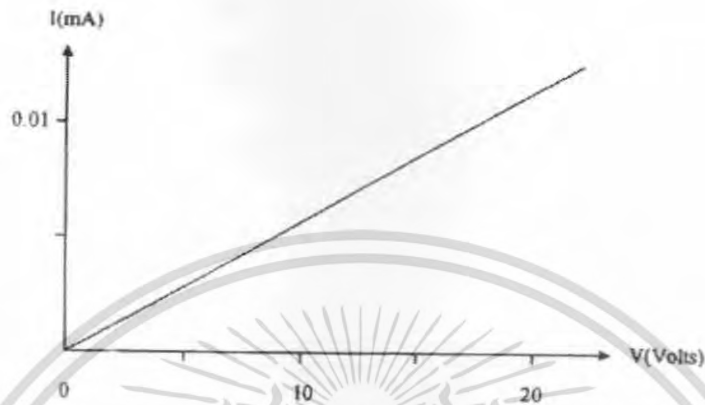
##### 6.1.1 การทดลองวัดพารามิเตอร์ของชั้นสาร

เพื่อเป็นการพิสูจน์ว่าแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นที่เติมอะตอมทองคำแล้วมีอะตอมของทองคำเข้าไปอยู่ในเนื้อซิลิคอนจริง จึงทำการทดสอบค่าความต้านทานของเนื้อสารที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเติมอะตอมของทองคำเข้าไปแล้ว โดยทำการตัดชิ้นสารออกเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด  $2 \times 5$  mm และจากการวัดค่าความหนาของชั้นสารได้ค่าประมาณ  $380 \mu\text{m}$  แล้วทำการทดสอบหาความต้านทานโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันต่อไป

หลังจากนำแผ่นซิลิคอนที่ถูกโคปด้วยทองคำแล้วมาวัดด้วยอุปกรณ์โฟร์พอยท์ โพรบจะวัดความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดัน ดังแสดงในรูปที่ 6.1 จากกราฟพบว่าความต้านทานของชั้นสารซิลิคอนชนิดเอ็นที่เติมอะตอมทองคำเข้าไปมีค่ามากกว่า  $10^6 [(\Omega \cdot \text{cm})]$  โดยมีพารามิเตอร์ ดังนี้คือสภาพยอม  $\epsilon_r = 11.8$ , ความหนา,  $h = 0.38$  mm., ความหนาของแผ่นตัวนำ,  $t = 0.2 \times 10^3$  mm. และค่าความนำของแผ่นตัวนำ  $\sigma = 4.513 \times 10^7$  (S/m) ดังนั้นซิลิคอนซึ่งถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

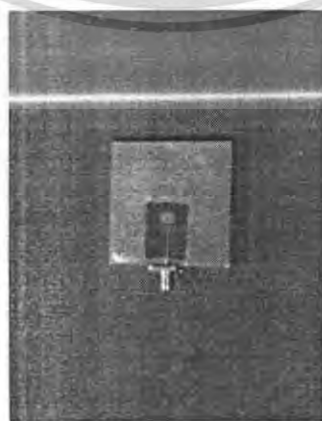
โคปด้วยทองคำนี้จึงสามารถนำไปใช้งานเป็นวัสดุฐานรองของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นที่เติมอะตอมทองคำ โคปทองคำ

#### 6.1.2 การทดสอบความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศ

เมื่อได้วัสดุฐานรองที่มีคุณสมบัติตรงตามความต้องการแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการสร้างสายอากาศแผ่นไมโครสตริปบนฐานรองดังกล่าว จากนั้นนำไปทำการทดสอบหาสัมประสิทธิ์ในการสะท้อนกลับของสายอากาศลดจนคุณสมบัติในการแผ่กระจายคลื่น สายอากาศแผ่นแบบโมโนลิทริกบนวัสดุฐานรองซิลิคอน โคปทองคำนั้น ได้ใช้ค่าที่ได้จากการออกแบบในบทที่ 4 โดยอาศัยขั้นตอนการสร้างดังอธิบายรายละเอียดในบทที่ 5 ซึ่งสายอากาศแผ่นแบบโมโนลิทริกบนวัสดุฐานรองซิลิคอน โคปทองคำที่สร้างเสร็จสมบูรณ์แล้วนั้น ได้แสดงไว้ในรูปที่ 6.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 6.2 สายอากาศแผ่นแบบโมโนลิทริกบนวัสดุฐานรองซิลิคอน โคปทองคำ

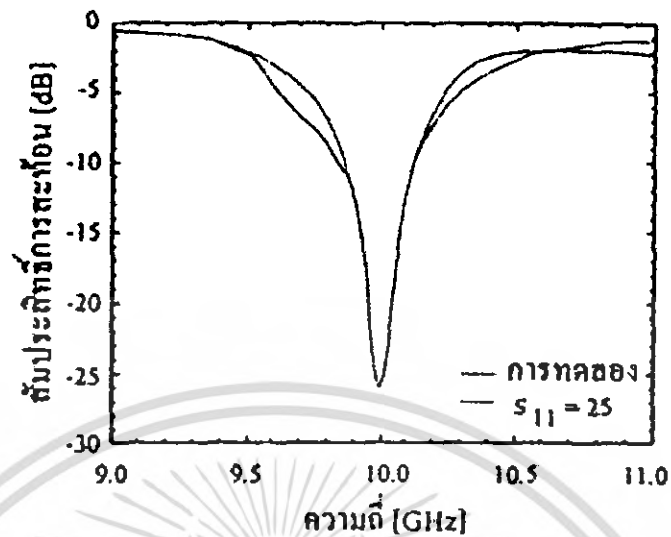
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก่อนการทดสอบหาคุณสมบัติการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ได้ทำการสร้างขึ้นมานั้น จำเป็นที่จะต้องทราบความถี่ โขแนนท์ของสายอากาศเสียก่อน สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการระบุความถี่ โขแนนท์ของสายอากาศ ถูกวัดโดยอาศัยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) รุ่น HP8510C แสดงไว้ในรูปที่ 6.3 ผลการทดสอบวัด แสดงไว้ในรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.3 เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) ที่ใช้ในการทดลองรุ่น HP8510C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

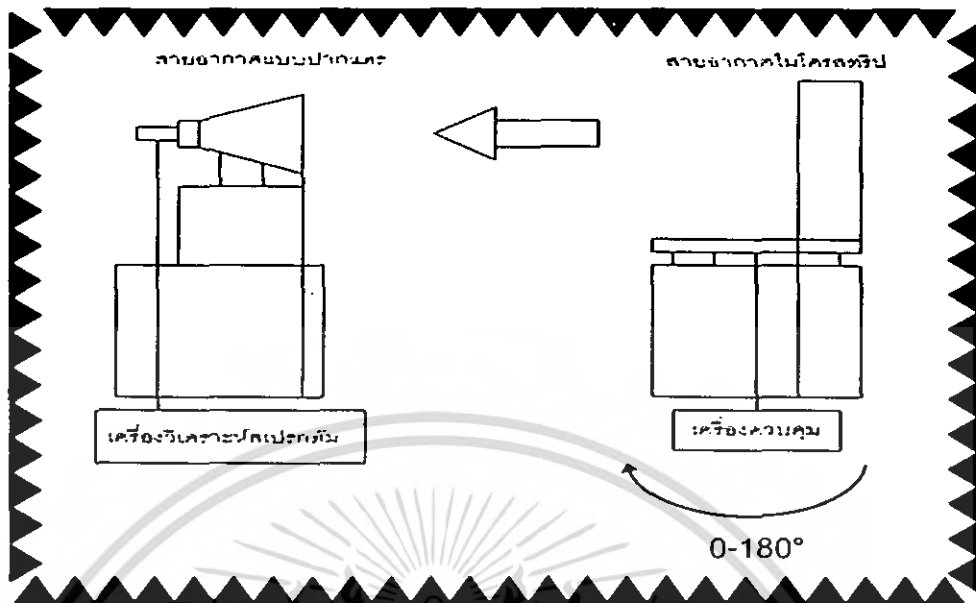


รูปที่ 6.4 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศแผ่นแบบ โมโนลิทริกบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโคปทองคำ

จากรูปที่ 6.4 สังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนว่าสายอากาศที่ได้ทำการสร้างขึ้นนั้นมีความถี่รีโซแนนท์ใกล้เคียงกับทฤษฎี ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าค่าความถี่ที่ได้ออกแบบไว้ สาเหตุของความผิดพลาดของความถี่รีโซแนนท์นี้น่าจะเกิดจากการส่งผ่านกำลังงานจากสายโคแอกเชียลไปยังสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

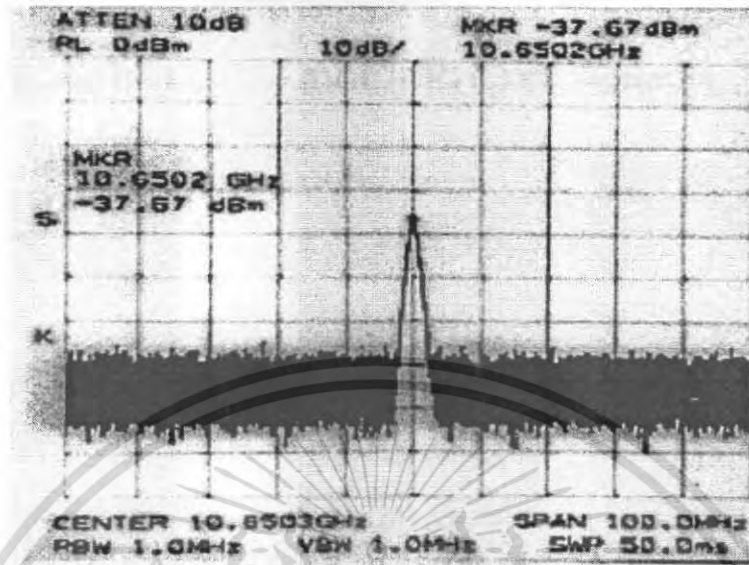
### 6.1.3 การทดสอบแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น

ในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองสารกึ่งตัวนำที่โคปทองคำเนื่องจากสายอากาศไมโครสตริปเป็นสายอากาศที่มีอัตราการขยายต่ำ ดังนั้นการวัดรูปแบบการแผ่กระจายคลื่น (pattern) จึงทำการทดสอบโดยกำหนดให้สายอากาศไมโครสตริปที่สร้างบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโคปทองคำเป็นสายอากาศทางด้านส่งวางให้ห่างจากสายอากาศปากแตรซึ่งเป็นสายอากาศทางด้านรับ โดยมีระยะห่างระหว่างสายอากาศตัวรับตัวส่ง 1.5 เมตร โดยมีอุปกรณ์ในการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 6.5



รูปที่ 6.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสายอากาศภายในห้อง

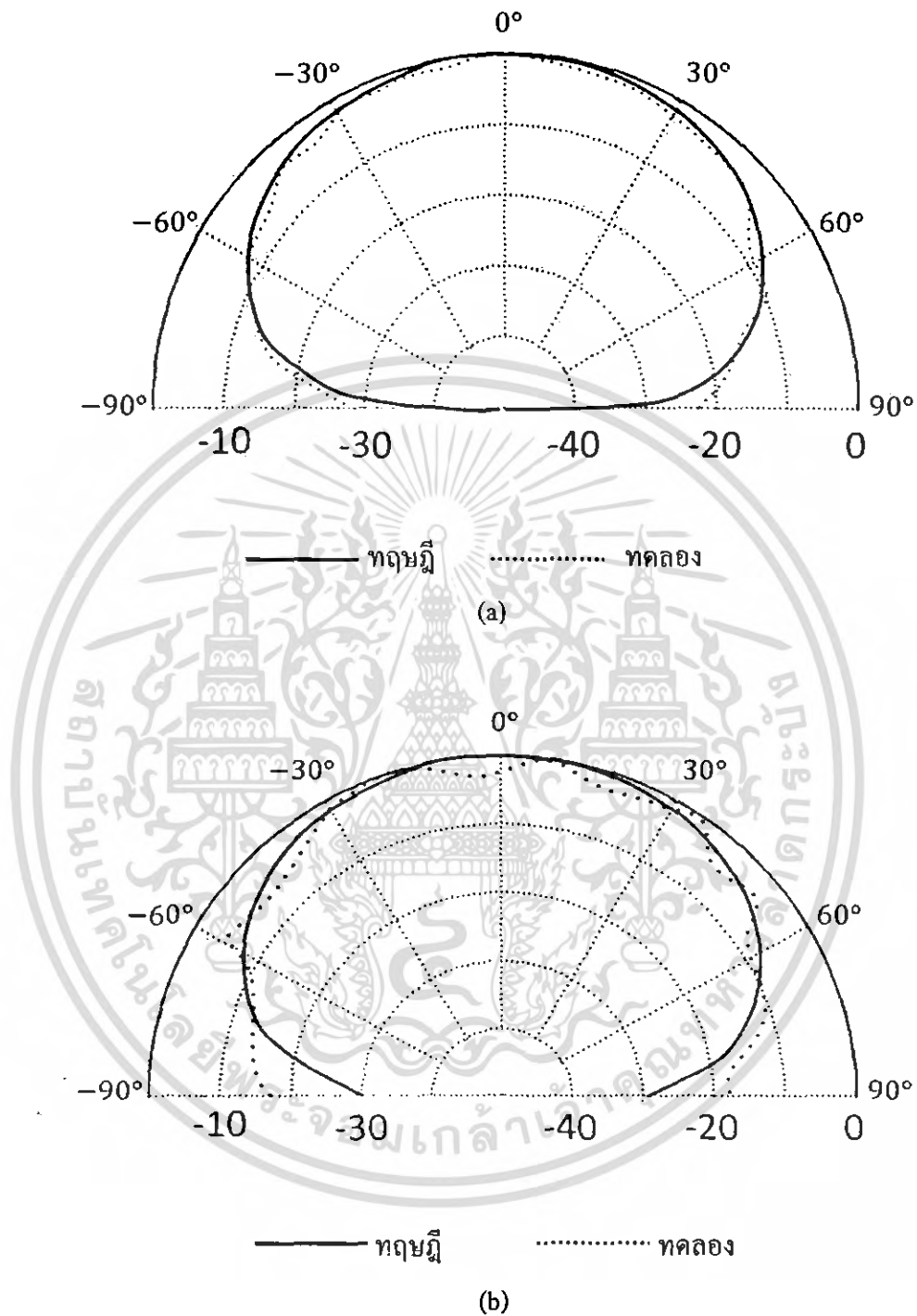
สายอากาศไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองซิลิกอน ไดโพลทงค่าถูกใช้เป็นสายอากาศสำหรับแผ่กระจายคลื่น (โมดการส่ง) โดยมีสายอากาศปากแตร (Horn Antenna) เป็นตัวรับ โดยมีระยะห่างระหว่างสายอากาศตัวรับและตัวส่ง 1.5 เมตร สัญญาณที่รับได้จากสายอากาศปากแตร จะถูกนำมาแสดงยังเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม รูปที่ 6.5 แสดงสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศปากแตรเมื่อสายอากาศตัวส่ง (สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองซิลิกอน ไดโพลทงค่า) ซึ่งถูกกระตุ้นด้วยกำลังงาน 0dBm



รูปที่ 6.6 สัญญาณที่รับได้จากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม

แบบรูปของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) และสนามแม่เหล็ก (H-plane) ที่วัดได้แสดงไว้ในรูปที่ 6.6 (a) และ (b) ตามลำดับ ซึ่งสังเกตเห็นได้ว่าลักษณะของแบบรูปที่วัดได้จะมีความสอดคล้องกับแบบรูปในทางทฤษฎีเป็นอย่างมาก ดังนั้นสายอากาศแผ่นบนวัสดุฐานรองชนิดคอนโคปทองคำที่ทำการสร้างขึ้นนี้จึงมีคุณสมบัติขั้นพื้นฐานของสายอากาศที่ถูกต้องและเป็นไปตามทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.7 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นแบบโมนอลิตรีคบนวัสดุฐานรอง  
ซิลิคอนโคปทองคำในระนาบ (a) สนามไฟฟ้า (b) สนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 7

### บทสรุป

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอสายอากาศแผ่นแบบโมโนลิทริกบนวัสดุฐานรองซิลิคอนสำหรับสายอากาศรวมแบบแอกทีฟ ซึ่งวัสดุฐานรองซิลิคอนเป็นสารชนิดเอ็ระนาบ (111) สภาพความต้านทาน  $10^2 [\Omega \cdot \text{cm}]$  และมีสภาพยอมสัมพัทธ์  $\epsilon_r = 11.8$  ได้ทำการระเหยในสุญญากาศด้วยทองคำบริสุทธิ์ที่ความร้อนสูง และแพร่อะตอมทองคำในแผ่นผลึกซิลิคอนด้วยอุณหภูมิ  $1025^\circ \text{C}$  เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ด้วยกระบวนการสร้างในลักษณะเดียวกับกระบวนการทางเคมีคอนดักเตอร์ จากการวัดและการทดสอบวัสดุฐานรองซิลิคอนที่เติมอะตอมทองคำ โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน [4] จะเห็นว่าสภาพความต้านทานเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ขณะที่ยังไม่ได้เติมอะตอมทองคำสภาพความต้านทานมีค่าเป็น  $10^2 [\Omega \cdot \text{cm}]$  และเมื่อเติมอะตอมทองคำในแผ่นผลึกซิลิคอนแล้วจะเห็นได้ว่า สภาพความต้านทานเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งมีค่ามากกว่า  $10^6 [\Omega \cdot \text{cm}]$  ด้วยคุณสมบัติดังกล่าว จึงได้มีแนวคิดนำเอาวัสดุฐานรองซิลิคอนที่เติมด้วยอะตอมทองคำ มาใช้เป็นวัสดุฐานรองของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป ซึ่งเป็นวัสดุฐานรองใหม่สำหรับสายอากาศแบบระนาบด้วยคุณสมบัติของวัสดุฐานรองซิลิคอนที่เติมอะตอมทองคำนั้น นอกจากจะมีสภาพยอมสัมพัทธ์ ( $\epsilon_r$ ) ที่สูงแล้ว ยังสามารถใช้งานที่ความถี่สูงได้อีกด้วย จึงเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้ขนาดของสายอากาศลดลงได้ ในงานวิจัยที่ผ่านมา คุณสมบัติเบื้องต้นของสายอากาศรวมแบบแอกทีฟนั้น ได้ถูกอธิบายไว้แล้วใน [1-3], [9] แต่บางสิ่งกลับถูกละทิ้งไปในบทความเหล่านั้น ปัญหาเรื่องขนาดของสายอากาศสำหรับสายอากาศรวมแบบแอกทีฟนั้นเป็นสิ่งที่ต้องทำการแก้ไข เมื่อสายอากาศรวมแบบแอกทีฟถูกสร้างขึ้นมาในกรรมวิธีโมโนลิทริก (Monolithic) ซึ่งกำลังได้รับความนิยมกันอยู่ในเทคโนโลยี MMIC ดังนั้นคุณสมบัติของวัสดุฐานรองซิลิคอนที่เติมอะตอมทองคำนี้จะเป็นวัสดุฐานรองของสายอากาศแบบระนาบที่ทำให้ขนาดของสายอากาศลดลงได้

### การศึกษาและวิเคราะห์

นอกจากผลที่ได้จากการทดลองแล้ว ยังได้ทำการพิสูจน์ผลเหล่านี้ด้วยการวิเคราะห์ในทางทฤษฎี Electromagnetics เช่น ค่าสภาพความต้านทาน ได้พิจารณาค่า  $Q$  ที่ได้รับผลกระทบจากค่าสภาพความต้านทานค่าต่างๆ กัน และพิจารณาคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่น ที่มีสภาพความต้านทานค่าต่างๆ กันด้วย โดยอาศัยทฤษฎีการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองควาตีในกรณีค่า  $Q$  และในส่วนคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศนั้นได้วิเคราะห์ด้วยวิธีโมเมนต์ จึงยืนยันเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติของวัสดุฐานรองได้ว่า สารกึ่งตัวนำแผ่นผลึกซิลิคอนที่ถูกเติมด้วยอะตอมทองคำนั้น จะทำให้มีสภาพความต้านทานสูงขึ้นจากเดิมที่มีสภาพความต้านทาน  $10^2 [\Omega \cdot cm]$  ดังนั้นจึงเป็นวัสดุฐานรองที่มีคุณสมบัติดีสำหรับสายอากาศ ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 4.9 - 4.12 และผลการทดลองในรูปที่ 6.1, 6.5 และ 6.6 ตามลำดับ

### การออกแบบสายอากาศแผ่นแบบโมนอลิธิกรบนฐานรองซิลิคอน

สำหรับการออกแบบได้ทำการออกแบบโดยใช้โปรแกรมMDS ในการจำลองพฤติกรรมของสายอากาศ ซึ่งปริญญานิพนธ์นี้ได้ออกแบบสายอากาศแผ่นไมโครสตริปองค์ประกอบเดี่ยวทำงานที่ความถี่ 10 GHz และได้ออกแบบสายป้อนสัญญาณแบบไมโครสตริปด้วยโปรแกรมเดียวกัน เมื่อออกแบบเสร็จเรียบร้อยแล้วจึงได้ทำในขั้นตอนของการสร้างต่อไป

### กระบวนการสร้าง

กระบวนการสร้างสายอากาศในปริญญานิพนธ์นี้ ได้ทำตามกระบวนการทางเซมิคอนดักเตอร์ที่ง่าย ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 5 เมื่อผ่านกระบวนการแพร่อะตอมทองคำในซิลิคอนเรียบร้อยแล้ว จากนั้นจึงทำกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี เพื่อสร้างลวดลายของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปแบบ โมนอลิธิกร โดยใช้สารไวแสง AZ 4620A หรือ AZ5200E ซึ่งสปีนเนอร์ที่ความเร็ว 3000 rpm/นาที แล้วอบฟิล์มครั้งแรก (Prebake) ที่อุณหภูมิ  $90^\circ C$  เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นจึงนำไปฉายแสงอุลตราไวโอเลต (UV) เป็นเวลา 5 วินาที เสร็จแล้วจึงทำการ Development ด้วย AZ Developer แล้วก็นำฟิล์มไปอบอีกครั้ง (Postbake) ที่อุณหภูมิ  $90^\circ C$  เป็นเวลา 10 นาที ในขั้นตอนนี้จะได้ลวดลายของสายอากาศ ขึ้นต่อไปเป็นนำไปเคลือบด้วยทองคำในสุญญากาศอีกครั้ง ซึ่งตรงกับกระบวนการที่ 2 ในบทที่ 5 หลังจากเสร็จขั้นตอนนี้แล้วจึงนำไปเข้ากระบวนการนำสารไวแสงออก (Photoresist removal หรือ Lift off ) แล้วก็จะได้สายอากาศบนวัสดุฐานรองซิลิคอน และเพื่อให้สายอากาศยึดติดแน่นกับฐานรองจึงใช้ทำการ Sintering ที่อุณหภูมิประมาณ  $350^\circ C - 380^\circ C$  ในขั้นตอนนี้ยังต้องให้ความระมัดระวังเป็นอย่างมาก เพราะอาจทำให้ตัวแผ่นสายอากาศได้รับความเสียหายได้ เมื่อผ่านกระบวนการนี้แล้วจึงนำไปบอนด์เพื่อเชื่อมเข้ากับหัวต่อ (Connector) ทางด้านจุดป้อนสัญญาณ ในการเชื่อมต่อโดยใช้สารซิลเวอร์ (Silver : Ag) หรือที่เรียกกันว่า “กราวด์เงิน” ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำได้ยากและอาจมีผลกระทบต่อคุณสมบัติของสายอากาศได้ จากนั้นจึงนำสายอากาศไปทดสอบ ความถี่รีโซแนนซ์ของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปแบบโมนอลิธิกร ได้แสดงในรูปที่ 6.2 และจากนั้นได้ทำการทดสอบแบบรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นแบบโมโนลิทริก ในการทดสอบทั้งหมดได้ทำในห้องไร้การสะท้อนคลื่น ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายในการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศแผ่นโมโนลิทริกบนวัสดุฐานรองซีลิกอน

### การทดลองและผลการทดลอง

ผลที่ได้จากการทดสอบได้แสดงไว้ในบทที่ 6 สำหรับขั้นตอนในการทดสอบต้องเตรียมเครื่องมือวัดคือเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum Analyzer) และเครื่องกำเนิดสัญญาณให้พร้อม การทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศแผ่นแบบโมโนลิทริกบนวัสดุฐานรองซีลิกอน โคปทองคำ ได้ทำการทดสอบภายในห้อง โดยให้สายอากาศแผ่นไมโครสตริปแบบโมโนลิทริกบนวัสดุฐานรองซีลิกอนเป็นตัวแผ่กระจายคลื่น และมีสายอากาศปากแตรเป็นตัวรับคลื่น ระยะห่างระหว่างสายอากาศที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นกับสายอากาศปากแตรประมาณ 1.5 เมตร สัญญาณที่ได้สังเกตเห็นได้ด้วยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมดังแสดงในรูปที่ 6.6 พบว่าสายอากาศที่สร้างขึ้น ทำงานที่ความถี่ 10.6502 GHz กำลังงานที่ได้รับเท่ากับ -37.67 dBm และในรูปที่ 6.7(a) ได้แสดงแบบรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและในรูปที่ 6.7(b) แสดงแบบรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก จากการสังเกตแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะเห็นได้ว่าแบบรูปเป็นไปตามทฤษฎี ดังนั้นจึงเป็นการแสดงว่าซีลิกอนโคปทองคำที่นำมาใช้เป็นวัสดุฐานรองสำหรับสายอากาศแผ่นแบบโมโนลิทริกนี้เป็นวัสดุฐานรองที่ดีและมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับวงจรรวมทางไมโครเวฟแบบโมโนลิทริก (MMIC)

## เอกสารอ้างอิง

- [1] P.Tangtisanon, S. Promwong, K. Hayata, T. Goi, H. Shiomi and S. Kawasaki, "Active Integrated Antenna Composed of Patch Resonator in Feedback Loop," TJSAP'97, pp.127-130, May, 1997.
- [2] S.Kawasaki and T.Itoh, "Quasi-Optical Planar Arrays with FETs and Slots," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.41, no.10, pp.1838-1844, Oct. 1993.
- [3] S.Kawasaki, "High Efficient Spatial Power Combining Utilizing Active Integrated Antenna Technique," IEICE Trans. Electron., vol.E80-C, no. 6, pp. 800-805, June 1997.
- [4] สมเกียรติ สุภเดช, วิศุทธิ์ จิตรุ่งเรือง, จิรวินน์ ปานกลาง, อนุชา เรืองพานิช และ มนชนก ศรีเสือขาม, "ความคล่องตัวของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดเอ็นที่เติมอะตอมทองคำ," การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 13, หน้า 280-290, พฤศจิกายน 2533
- [5] H. Kimura, K. Kasai, T. Kurosu and M. Iida, "Spike Current Response in Gold Doped Silicon," RESTECS'96, pp. E54-57, July 1996.
- [6] C.A. Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design, 2<sup>nd</sup> Ed., John Wiley & Sons Inc., 1997.
- [7] S. Drabowitch, et al., *Modern Antennas*, London: Chapman & Hall, 1998.
- [8] S. Promwong, P. Rawiwan, N. Chinda, U. Sritheeravirojana, P. Tangtisanon and S. Kawasaki, "Characteristics of Gold doped Silicon Substrate for Monolithic Microstrip Patch Antenna," IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication System, Dec. 1999.
- [9] Y. Takimoto, "Recent Activities on Millimeter Wave Indoor LAN System Development in Japan," The 1995 IEEE MTT-S Int'l Microwave Symposium, Orlando, FL, pp. 405-408, May 1995.
- [10] สมเกียรติ สุภเดช, วังจรรวมเบื้องต้น. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พิมพ์ครั้งที่ 1, พ.ศ. 2525.
- [11] H. Pues and A. Van de Capelle, "Accurate transmission line model for the Rectangular microstrip antenna," Proc. IEEE, vol. 131, pt. H, no.6, pp. 334-340, Dec 1984.
- [12] I.J. Bahl, "Design of microstrip antennas covered with a dielectric layer," IEEE Trans on Antenna & Propagation, March 1982.

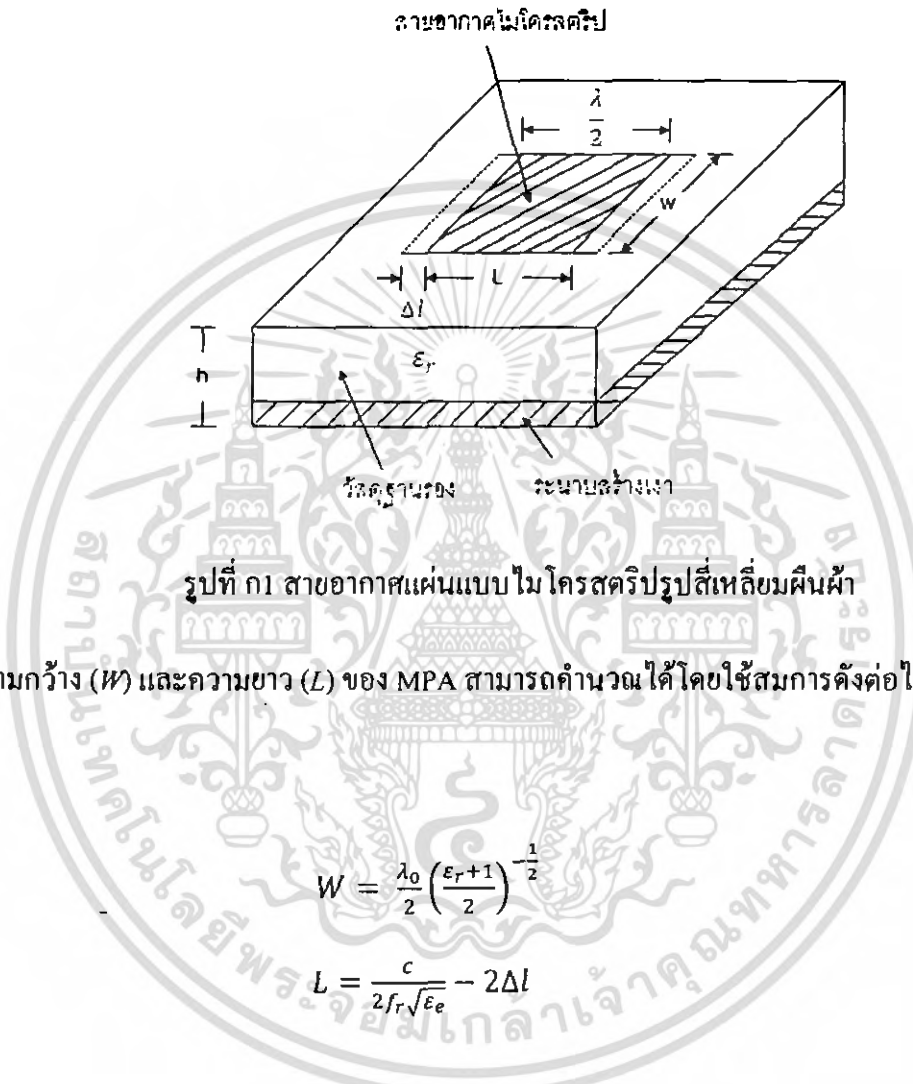


# ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การคำนวณขนาดของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า



รูปที่ ก1 สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ความกว้าง (W) และความยาว (L) ของ MPA สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการดังต่อไปนี้ [8][9]

$$W = \frac{\lambda_0}{2} \left( \frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{-\frac{1}{2}} \tag{ก.1}$$

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_e}} - 2\Delta l \tag{ก.2}$$

อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายอากาศ ( $Z_c$ ) หาได้จาก

$$Z_c = \frac{\eta}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \frac{h}{W_e} \tag{ก.3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แอดมิตแดนซ์ของสายอากาศ ( $Y$ ) สามารถคำนวณได้จาก

$$\begin{aligned}
 Y_s &= G_s + jB_s \\
 &= \frac{1}{\pi\eta_0} \left[ (wSi(w)) + \left( \frac{\sin w}{w} \right) \cos - 2 \left( 1 - \frac{s^2}{24} \right) + \frac{s^2}{12} \left( \frac{1}{3} + \frac{\cos w}{w^2} + \frac{\sin w}{w^3} \right) \right] \\
 &\quad + jY_c \tan(\beta\Delta l)
 \end{aligned} \tag{ก.4}$$

แอดมิตแดนซ์ร่วมระหว่างช่องการแผ่กระจายของ MPA สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$Y = G_m + jB_m = G_s F_g K_g + jB_s F_b K_b \tag{ก.5}$$

ดังนั้น อินพุตอิมพีแดนซ์ ( $Z_{pin}$ ) ของ MPA สามารถคำนวณได้จาก

$$Z_{pin} = \frac{Y_s + Y_c \coth(\psi)}{Y_c^2 + Y_s^2 - Y_m^2 + 2Y_s + Y_c \coth(\psi) - 2Y_m + Y_c \operatorname{cosech}(\psi)} \tag{ก.6}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### กระบวนการสร้างสายอากาศแผ่นไมโครสตริปแบบโมนอลิทริกบนวัสดุฐานรองซิลิคอน

#### 1. กระบวนการเตรียมแผ่นและการทำความสะอาด

##### 1.1 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นซิลิคอนและการตรวจสอบคุณสมบัติ

- แผ่นซิลิคอนชนิด ระบุ (111)
- พิกัดความต้านทาน  $100 [\Omega \cdot \text{cm}]$
- ความหนา  $380 \mu\text{m}$

##### 1.2 ทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิคอนครั้งแรก

- ทำความสะอาดผิวในน้ำบริสุทธิ์ด้วยเครื่องสั่นความถี่สูง 2 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในกรดไนตริก  $\text{HNO}_3$  เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดเศษ โลหะที่ผิว
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ )

##### 1.3 การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นแบบมาตรฐาน

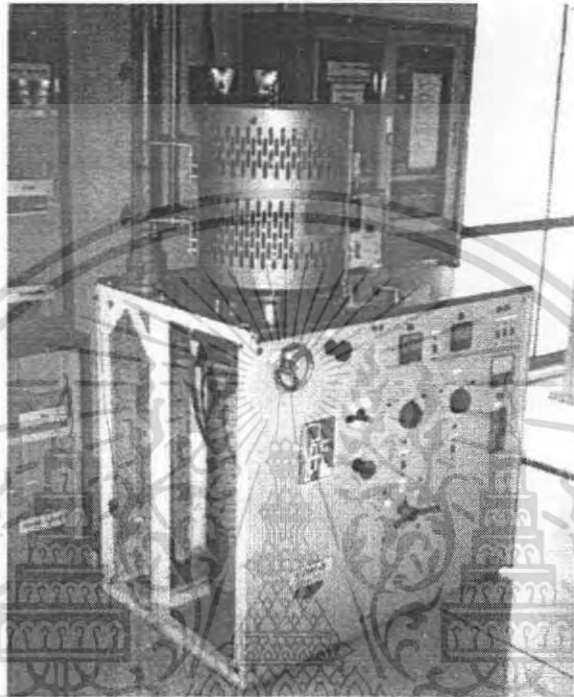
- ต้มใน ไตร โคล โทเอททีลีน (Trichloroethylene) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดไขมัน
- ทำความสะอาดในอะซิโตน (Acetone) ด้วยเครื่องสั่นความถี่สูง 3 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

##### 1.4 การ Slice Etching

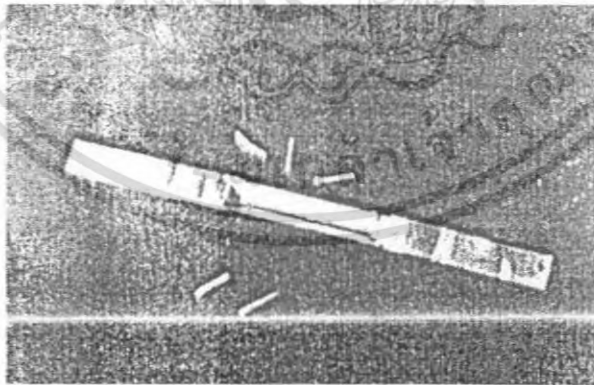
- จุ่มในสารละลาย (กรดกัดแก้ว) HP 5% 10 วินาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. กระบวนการระเหยสารทองคำในสุญญากาศ



รูปที่ ข1 อุปกรณ์เคลื่อนในสุญญากาศ



รูปที่ ข2 ฐานแบบ โป้ดและชิ้นทองคำ

- ทำความสะอาดและเตรียมผิวแผ่นผลึกให้แห้ง
- วางแผ่นผลึกลง chamber ที่ตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อให้ชั้นสารที่เคลือบมีความหนาสม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ปิดวาล์วของ chamber ทำการดูดอากาศออกให้ความดันภายในต่ำลงมาเหลือประมาณ  $10^{-3}$  Torr โดยใช้ Rotary pump
- ปิดวาล์วของ Rotary pump เปิดวาล์วของ Diffusion pump เพื่อให้ความดันใน chamber ลดลงเหลือราว  $10^{-6} - 10^{-7}$  Torr
- เริ่มทำสารทองคำที่เคลือบให้เป็นไอ โดยมีกำบังเพื่อมิให้สารที่เจือปนอยู่ไปเคลือบผลึกซิลิคอน
- ทำการเคลือบสารเจือสารทองคำบนแผ่นผลึกให้หนาตามต้องการ ขณะทำการเคลือบสารทองคำบนแผ่นผลึกซิลิคอน บางครั้งควรให้ความร้อนบนแผ่นผลึกที่เหมาะสมเพื่อให้ชั้นสารทองคำที่เคลือบติดแน่นกับแผ่นผลึกซิลิคอน
- หยุดทำการเคลือบสาร ปล่อยให้ทุกอย่างใน chamber เย็นตัวลง 30 นาที
- ปล่อยอากาศเข้าไปใน chamber อย่างช้าๆ จนความดันเป็นปกติ แล้วยก chamber ขึ้น

### 3. กระบวนการแพร่สารทองคำ (Au Diffusion)



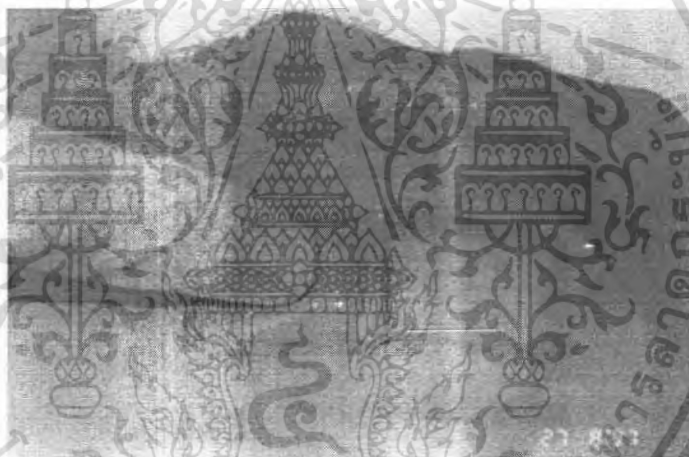
รูปที่ ข3 เต้าแพร่อะตอมทองคำในแผ่นผลึกซิลิคอน

- เตรียมแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการเคลือบสารด้วยทองคำวางบน โป้ตแล้ว
- ทำการเปลี่ยนท่อหลอดแก้วที่ใช้สำหรับการแพร่อะตอมทองคำ
- หาระยะที่อุณหภูมิ  $1025^{\circ}$  ก่อนที่จะนำเอาแผ่นซิลิคอนที่แพร่ด้วยสารทองคำเข้าเตา
- เมื่อตรวจสอบระยะอุณหภูมิเสร็จแล้วนำแผ่นซิลิคอนที่แพร่ด้วยสารทองคำแล้วเข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ใช้เวลาในการแพร่อะตอมทองคำลงในแผ่นผลึกซิลิคอน 6 ชั่วโมง
- เมื่อครบ 6 ชั่วโมงตอนเอาแผ่นซิลิคอนที่เติมอะตอมทองคำลงไปออกจากท่อ หลอดแก้วอย่างรวดเร็ว แล้วจุ่มลงในลิควิดไนโตรเจน (Liquid Nitrogen) เพื่อหยุดปฏิกิริยาของทองคำ
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน  $N_2$

#### 4. กระบวนการขัดผิวหน้าแผ่นซิลิคอนโพลีทอง (Au Lapping)



รูปที่ ข4 การขัดผิวหน้าซิลิคอนโพลีทอง

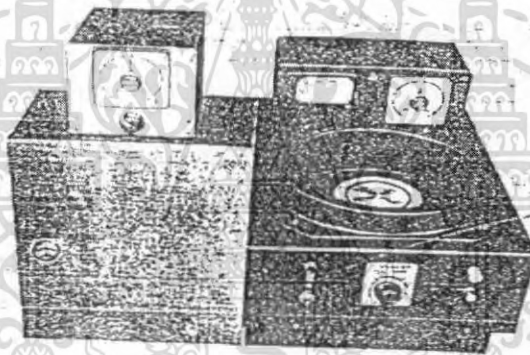
- น้ำแผ่นซิลิคอน โพลีทองคำเคลือบด้วยอิเล็กทริกซ์แวก (electronic vax) ด้านที่ไม่ต้องการขัดผิว แล้วทำการขัดผิวหน้าที่ Evaporates ทอง ให้เรียบ
- ทำการเล็บปิ้งด้วยผงขัดคาไบร์ #1000
- ทำความสะอาด จุ่มในน้ำ
- ทำการเล็บปิ้งด้วยผงขัดคาไบร์ #2000
- ทำความสะอาดจุ่มในน้ำ
- ทำการเล็บปิ้งด้วยผงขัดคาไบร์ #4000
- ทำความสะอาดจุ่มในน้ำ
- ละลายแวกออกจากแผ่นซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ต้มใน Trichlocthylenene เป็นเวลา 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 3 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน  $N_2$

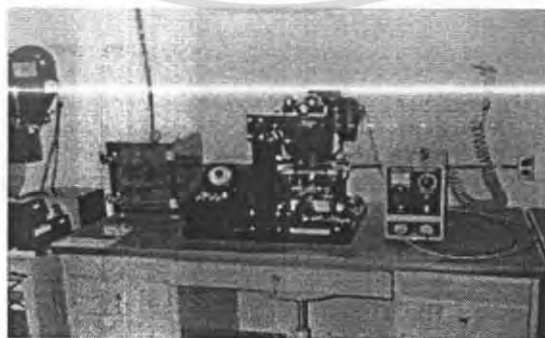
### 5. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

- เคลือบสารไวแสงชนิดบวก (AZ4620A) spin 3000 rpm.



รูปที่ ข5 เครื่องสปรินเนอร์

- อบฟิล์มที่  $90^{\circ}C$  10 นาที (Prebake)
- Alignment Expose เป็นเวลา 5 นาที



รูปที่ ข6 เครื่อง Alignment Expose

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Develop ฟิล์ม โดย
  - AZ Developer แก้วที่หนึ่ง 30 วินาที
  - AZ Developer แก้วที่สอง 30 วินาที
  - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
  - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
  - เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

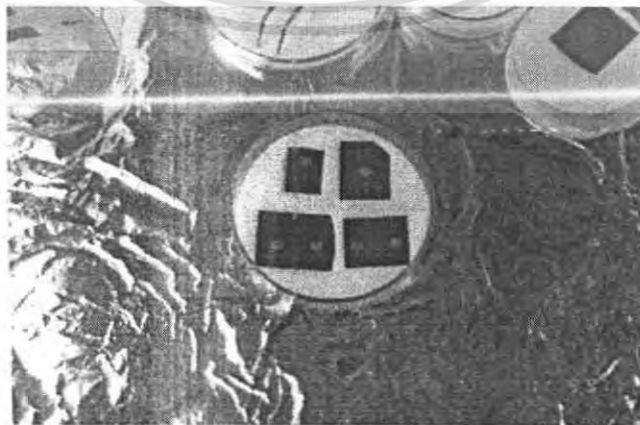
6. กระบวนการระเหยทองคำในสุญญากาศ (Au Evaporated) ครั้งที่ 2

- กระบวนการนี้เหมือนกับกระบวนการ Au Evaporated ในกระบวนการที่ 2 ทุกประการ

7. กระบวนการลอกฟิล์ม (Resist Removal Process) หรือ (Lift Off Process)

- จุ่มลงใน Acetone แก้วที่หนึ่ง 1 นาที
- จุ่มลงใน Acetone แก้วที่สอง 1-3 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

8. กระบวนการซินเตอร์ริง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ ๖7 หลังจากทำการซินเตอร์ริง อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Temp 350° C – 380° C
- ทำการ Sintering เป็นเวลา 5 นาที

### 9. กระบวนการเชื่อมต่อ



รูปที่ ข8 การเชื่อมต่อ

- ใช้เงิน (Ag) อย่างเหมาะสมในการเชื่อมต่อกับคอนเนคเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

### การวัดหาค่าพิกัดความต้านทาน

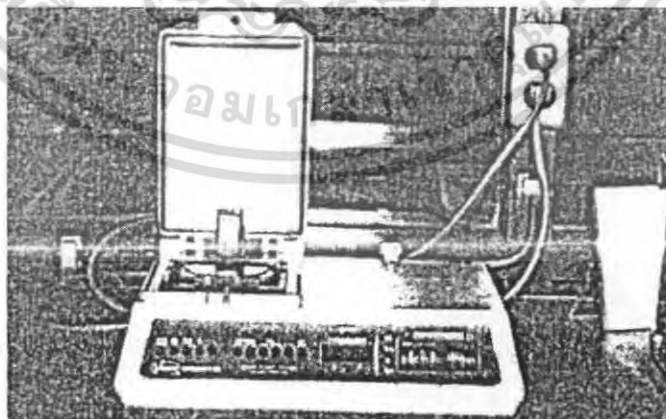
ในสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิคอน นิยมวัดหาค่าแผ่นความต้านทานด้วยวิธีโพร์พอยท์โพรบ ดังแสดงในรูปที่ ค1

ในการวัดเข็ม โลหะที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าทั้งสี่ จะถูกกดลงผิวของแผ่นผลึกซิลิคอน เข็มโลหะดังกล่าวจะห่างจากกันเป็นระยะ  $s$  เท่าๆกัน จากนั้นจะป้อนไบอัสทำให้เกิดกระแส  $I$  ไหลผ่านเข็มโลหะที่อยู่ริมขอบสุด คือ เข็มที่ 1 และ 4 กระแสดังกล่าวจะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมผลึกสารกึ่งตัวนำ โดยวัดแรงดันตกคร่อม ( $V$ ) ระหว่างขั้วของเข็มโลหะด้านใน

เมื่อทราบค่าแผ่นความต้านทาน ( $R_s$ ) แล้ว สามารถหาค่าพิกัดความต้านทาน ( $\rho$ ) ได้โดย

$$\rho = R_s \times \text{ความหนา} \quad (\text{ค.1})$$

ในกรณีนี้แผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำมีความยาวเบะความกว้างมากกว่าระยะห่างระหว่างเข็มโลหะ



รูปที่ ค1 เครื่องโพร์พอยท์โพรบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้