สายอากาศแผ่นแบบโมโนลิตริกบนวัสดุฐานรองซิลิคอน สำหรับสายอากาศรวมแบบแอกทีฟ

A MONOLITHIC PATCH ANTENNA ON A SILICON SUBSTRATE FOR ACTIVE INTEGRATED ANTENNA

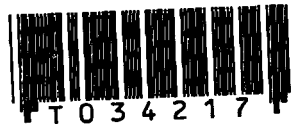
สถาพร พรหมวงศ์
SATHAPORN PROMWONG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2542
ISBN 974-622-578-2

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สายอากาศแผ่นแบบโมโนลิตริกบนวัสดุฐานรองซิลิคอน สำหรับสายอากาศรวมแบบแอกทีฟ

A MONOLITHIC PATCH ANTENNA ON A SILICON SUBSTRATE FOR ACTIVE INTEGRATED ANTENNA



สถาพร พรหมวงศ์

SATHAPORN PROMWONG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2542

ISBN 974-622-578-2

วพ.
ส182ส
2542

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน...34217...
วัน, เดือน, ปี 8 ต.ค. 2542

A MONOLITHIC PATCH ANTENNA ON A SILICON SUBSTRATE FOR ACTIVE INTEGRATED ANTENNA

SATHAPORN PROMWONG

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
1999

ISBN 974-622-578-2

COPYRIGHT 1999

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สายอากาศแผ่นแบบโมโนลิตริกบนวัสดุฐานรองซิลิคอน สำหรับสายอากาศรวมแบบแอกทีฟ
นักศึกษา	นายสถาพร พรหมวงศ์
รหัสประจำตัว	38061259
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2542
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. ประกิจ ตังติสานนท์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอสายอากาศแผ่นแบบโมโนลิตริกบนวัสดุฐานรองซิลิคอน สำหรับสายอากาศรวมแบบแอกทีฟ ในวัสดุฐานรองซิลิคอนซึ่งถูกโดปด้วยทองคำบริสุทธิ์ที่ความร้อนสูง ทำให้มีคุณสมบัติสภาพความต้านทานสูงขึ้นจากซิลิคอนบริสุทธิ์ ซึ่งเป็นวัสดุฐานรองใหม่สำหรับสายอากาศแผ่นแบบโมโนลิตริก และเป็นวัสดุฐานรองที่มีคุณสมบัติดีสำหรับสายอากาศแผ่นแบบโมโนลิตริกอีกทั้งยังง่ายต่อการสร้างเข้าด้วยกันกับวงจรรวมแอกทีฟ นอกจากนี้แล้ววัสดุฐานรองซิลิคอนยังมีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (ε_r) สูง ทำให้สามารถสร้างสายอากาศให้มีขนาดเล็กได้ ดังนั้นสามารถพัฒนาสร้างเป็นสายอากาศรวมแบบแอกทีฟ รวมทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับวงจรรวมย่านไมโครเวฟแบบโมโนลิตริก (MMIC) ในงานวิจัยนี้จะอธิบายทฤษฎีและหลักการที่ใช้ และทำการวัดคุณสมบัติการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ได้สร้างขึ้นในย่านความถี่เอกซ์ (10 GHz) เปรียบเทียบกับทฤษฎีรวมทั้งเหตุผลของความแตกต่างระหว่างแบบรูปที่ได้จากการวัดกับทฤษฎี

Thesis Title	A Monolithic Patch Antenna on a Silicon Substrate for Active Integrated Antenna
Student	Mr. Sathaporn Promwong
Student ID.	38061259
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	1999
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Prakit Tangtisanon

ABSTRACT

This thesis presents a monolithic silicon substrate for active integrated antenna. 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 (ε_r) silicon substrate can be applied to monolithic microwave integrated circuit (MMIC). Theory and the measurement for the dispersion characteristic of the fabricated antenna for X-band (10 GHz) was shown in the thesis. The measurement results compared with the theoretical ones were demonstrated as well.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงด้วยดี ผู้เขียนกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ประกิจ ตังติสานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูง ที่ได้ช่วยกรุณาให้คำแนะนำ ชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหา ฝึกฝนให้ผู้เขียนมีความสามารถในการทำงานวิจัยได้ ตลอดจนได้ตรวจทานต้นฉบับของวิทยานิพนธ์นี้

ขอกราบขอบพระคุณท่านที่ได้มีส่วนช่วยในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ดังนี้

- Prof. Dr. Shigeo Kawasaki ในการช่วยคำแนะนำและแนวคิดในการทำวิจัย
- Prof. Dr. Hideki Kimura ในการช่วยแนะนำกระบวนการสร้างและอนุเคราะห์ทางด้านอุปกรณ์
- Prof. Dr. Masamori Iida ในการช่วยกรุณาให้ใช้ห้องปฏิบัติ การประดิษฐ์ชิ้นงาน
- Prof. Dr. Jun-ichi Takada ในการช่วยแนะแนวทางการวิเคราะห์ทางทฤษฎี
- Miss Takako Ohashi ในการช่วยติดต่อประสานงานทางอาจารย์ประเทศญี่ปุ่น
- รศ. ดร. วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง ในการช่วยแนะนำและกระบวนการสร้าง
- รศ. สมศักดิ์ เชียรศิริกุล ในการช่วยแนะนำและอำนวยความสะดวกในการสร้าง
- อาจารย์และเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการสร้างชิ้นงาน

ขอกราบขอบพระคุณ บิดาและมารดา ที่ช่วยเหลือและให้กำลังใจในการทำงานกับผู้เขียนมาโดยตลอด

ขอกราบขอบพระคุณ มูลนิธิเพื่อการศึกษาคอมพิวเตอร์และการสื่อสารที่ได้มอบทุนเพื่อการศึกษาตลอดระยะเวลาระหว่างการศึกษาในระดับปริญญาโท

ขอกราบขอบพระคุณทบวงมหาวิทยาลัยที่มอบทุนประเภท ก. ให้ไปดูงานวิจัย ณ ประเทศญี่ปุ่น ในปี พ.ศ. 2540

ขอกราบขอบพระคุณโครงการความร่วมมือระหว่างสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังกับมหาวิทยาลัยโตไกที่สนับสนุนทุนไปดูงานวิจัย ณ ประเทศญี่ปุ่น ด้วยทุนประเภท 2

ขอกราบขอบพระคุณโครงการความร่วมมือระหว่างไทย-ญี่ปุ่น (NRCT-JSPS) ที่ให้ทุนไปดูงานวิจัยที่ประเทศญี่ปุ่นปี พ.ศ. 2541

สถาพร พรหมวงศ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญตาราง.....VII

สารบัญภาพ.....VIII

สัญญลักษณ์.....X

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 บทนำ.....1

1.2 วัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์.....2

1.3 หลักการใหม่ในวิทยานิพนธ์ 2

1.4 โครงประกอบของวิทยานิพนธ์.....3

บทที่ 2 สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป.....5

2.1 บทนำ.....5

2.1.1 ข้อดีและข้อเสียของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป.....6

2.1.2 การนำไปประยุกต์ใช้งาน.....6

2.2 คุณสมบัติพื้นฐานของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป.....7

2.3 การป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป.....8

2.4 การแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป.....11

2.5 ตัวแปรแสดงคุณภาพ (quality factor) แบนด์วิดท์ และประสิทธิภาพ.....11

2.6 บทสรุป 14

บทที่ 3 ทฤษฎีซิลิคอนโดปทองคำ.....15

3.1 บทนำ.....15

3.2 ทฤษฎี.....15

3.2.1 สัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมทองคำในซิลิคอน.....16

3.2.2 ระดับพลังงานของอะตอมทองคำในซิลิคอน.....18

3.2.3 ค่าพิกัดความต้านทานของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยทองคำ.....19

3.3 การวัดพารามิเตอร์ของวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทอง.....19

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.1 การวัดค่าพิกัดความต้านทาน....19
3.3.2 การวัดค่าความต้านทานแผ่น....21
3.4 สรุป....22

บทที่ 4 การวิเคราะห์และการออกแบบ....23
4.1 กล่าวนำ....23
4.2 การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองคาวิตี้....23
4.3 การวิเคราะห์ด้วยวิธีโมเมนต์....34
4.3.1 ควอไซกรีนฟังก์ชัน....34
4.4 การสูญเสียในวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ....37
4.5 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่น....38
4.6 ขั้นตอนการออกแบบ....40
4.7 สรุป....46

บทที่ 5 กระบวนการสร้างสายอากาศ....48
5.1 กระบวนการสร้างของสายอากาศ....48
5.1.1 ขั้นตอนการเตรียมกระจกต้นแบบ 48
5.1.2 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นซิลิคอน....49
5.1.3 การเคลือบสารทองคำด้วยวิธีการระเหยในสูญญากาศ....49
5.1.4 การแพร่อะตอมทองคำ 51
5.1.5 ขัดผิวกำจัดเศษทองคำ (Au Lapping)....52
5.1.6 กระบวนการโฟโต้ลิโทกราฟฟี....52
5.1.7 การฉายแสง UV....54
5.1.8 การล้างสารไวแสงส่วนที่ถูกแสงออก....54
5.1.9 การเคลือบสารทองคำบนลวดลาย....54
5.1.10 การลอกฟิล์มด้ยวิธีการ Lift off 55
5.1.11 การซินเตอร์ (Sintering)....55
5.1.12 การเชื่อมเข้ากับตัวต่อ....55

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2 สรุป....56

บทที่ 6 การทดลองและผลการทดลอง....57

6.1 การทดลองวัดพารามิเตอร์ของชิ้นสาร....57

6.2 การทดสอบความถี่รีโซแนนท์ของสายอากาศ....58

6.3 การทดสอบแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น....59

บทที่ 7 สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ....62

เอกสารอ้างอิง....66

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก การคำนวณขนาดของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า..67

ภาคผนวก ข การสร้างสายอากาศแผ่นแบบโมโนลิตริกบนวัสดุฐานรองซิลิคอน....69

ภาคผนวก ค การวัดหาค่าพิกัดความต้านทาน....75

ภาคผนวก ง บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์....76

ประวัติผู้เขียน....89

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 การเปรียบเทียบสายอากาศที่มีโครงสร้างเป็นระนาบเรียบชนิดต่าง ๆ.....5

3.1 ค่า correction สำหรับโฟร์พอยท์โพรบ เมื่อใช้วัดแผ่นบาง.....21

3.2 Correction factor ของ ρ เมื่อ t ไม่น้อยกว่า S มาก.....22

4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตอิมพีแดนซ์ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับและความถี่.....45

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

2.1 สายอากาศไมโครสตริปและระบบพิกัด.....8

2.2 รูปร่างของแผ่นสายอากาศไมโครสตริปแบบต่าง ๆ 8

2.3 การป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศไมโครสตริป.....9

2.4 วงจรสมมูลย์ของการป้อนสัญญาณตามรูปที่ 2.3.....10

2.5 ประสิทธิภาพและแบนด์วิดท์ต่อความสูงของวัสดุฐานรองที่ความถี่รีโซแนนซ์ของ
สายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยใช้วัสดุฐานรองที่แตกต่างกัน 2 ชนิด.....13

3.1 ตัวอย่างโครงสร้างซิลิคอนโดปทองคำ.....15

3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมของธาตุชนิดต่าง ๆ.....16

3.3 การแพร่ของอะตอมทองคำเข้าไปอยู่ระหว่างอะตอมซิลิคอน 17

3.4 Solid Solubility ของสารเจือชนิดต่าง ๆ ในซิลิคอน 17

3.5 ไดอะแกรมระดับพลังงานของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมทองคำ.....18

3.6 การวัดค่าพิกัดความต้านทานโดยวิธีโฟร์พอยท์โพรบ.....20

4.1 การแผ่กระจายประจุและความหนาแน่นของกระแสบนแผ่นสายอากาศไมโครสตริป.....23

4.2 โครงสร้างทางเรขาคณิตของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....24

4.3 โครงสร้างของสนามสำหรับสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....28

4.4 ความหนาแน่นกระแสสมมูลบนด้านทั้ง 4 ของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....29

4.5 ร่องสำหรับแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่มผืนผ้า
และกระแสแม่เหล็กสมมูล.....30

4.6 แบบรูปในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสำหรับแผ่นไมโครสตริปร่องเดี่ยว
และทั้งสองร่อง.....31

4.7 ความหนาแน่นกระแสบนร่องที่ไม่มีการแผ่กระจายคลื่นสำหรับสายอากาศไมโครสตริป
รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....31

4.8โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปและวัสดุฐานรอง.....35

4.9 องค์ประกอบ Q เปรียบเทียบกับสภาพความต้านทานของวัสดุฐานรอง.....38

4.10 แบบรูปการแผ่กระจายสนามไฟฟ้าบนวัสดุฐานรองที่ ρ ต่างกัน.....39

4.11 สัมประสิทธิ์การสะท้อนบนวัสดุฐานรองที่ ρ ต่างกัน.....39

4.12 อัตราขยายของสายอากาศและประสิทธิภาพเทียบกับสภาพความต้านทาน.....39

4.13 โครงสร้างของสายอากาศแผ่น.....41

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.14 โครงสร้างในส่วนของแมตซ์ชิ่ง....41
4.15 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศเมื่อนำสายอากาศแผ่นมารวมเข้ากับวงจรใน ส่วนของแมตซ์ชิ่งเรียบร้อยแล้ว....42
4.16 ขนาดของสายอากาศและส่วนแม็ตซ์ชิ่งหลังการออกแบบเรียบร้อยแล้ว....43
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตอิมพีแดนซ์กับความถี่....44
4.18 S_{11} ที่ได้จากโปรแกรมโมเมนตัม....44
5.1 กระจกมาร์ค....49
5.2 กระบวนการสร้างของสายอากาศ....50
5.3 ภาพตัดขวางแผ่นผลึกซิลิคอน....51
5.4 ภาพตัดขวางการเคลือบสารทองคำ....51
5.5 ภาพตัดขวางการแพร่อะตอมทองคำลงในแผ่นผลึกซิลิคอน....52
5.6 ภาพตัดขวางหลังการ Lapping....52
5.7 ขั้นตอนขบวนการโฟโต้ลิโทกราฟฟี....53
5.8 ภาพตัดขวางหลังจากเคลือบสารไวแสง....53
5.9 ภาพตัดขวางขั้นตอน Exposure....54
5.10 ภาพตัดขวางหลังจาก Developer....54
5.11 ภาพตัดขวาง Au Evaporation....54
5.12 ภาพตัดขวางของชิ้นงานที่ได้หลังจากการลอกฟิล์มออกแล้ว....55
5.13 ชิ้นงานเมื่อทำการลอกฟิลม์แล้ว....55
5.14 โครงสร้างภาพตัดขวางของสายอากาศที่ได้หลังการ Bonding....55
6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น ที่เติมอะตอมทองคำโดปทองคำ....58
6.2 สายอากาศแผ่นแบบโมโนลิตริกบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ....58
6.3 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศแผ่นแบบโมโนลิตริกบนวัสดุฐานรอง ซิลิคอนโดปทองคำ....59
6.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสายอากาศภายในห้องไร้การสะท้อน....60
6.5 สัญญาณที่รับได้จากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม....60
6.6 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นแบบโมโนลิตริกบนวัสดุฐานรอง ซิลิคอนโดปทองคำในระนาบ (a) สนามไฟฟ้า (b) สนามแม่เหล็ก....61

สัญญลักษณ์ (List of Symbol)

สัญลักษณ์	ความหมาย
$A, \overline{A}$	Vector magnetic potentials (ศักย์แม่เหล็กเวกเตอร์)
BW	Bandwidth (ความกว้างแถบ)
D, D_w	Directivities (สภาพเจาะจงทิศทาง)
E	Electric field (สนามไฟฟ้า)
E_ρ, E_θ, E_ϕ	Components of E (องค์ประกอบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า)
F	Vector electric potentials (ศักย์ไฟฟ้าเวกเตอร์)
F_ρ, F_θ, F_ϕ	Components of F (องค์ประกอบของศักย์ไฟฟ้าเวกเตอร์)
F, F_a, F_d	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	Conductances (ความนำ)
G_d, G_e, G_s	Gains (อัตราการขยาย)
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_s	Electric current densities (ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า)
K_{nm}	Normalized wave number (จำนวนคลื่นแบบนอร์แมลไลซ์)
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)
MPA	Microstrip patch antenna (สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป)

Q	Quality factor (ตัวประกอบคุณภาพ (Q))
Q_r	Total quality factor (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 (ความหนาสตริป)
$tan\delta$	Loss tangent of dielectric material (แทนเจนต์การสูญเสียของวัสดุไดอิเล็กตริก)
W_p	Width of microstrip antenna (ความกว้างสายอากาศแบบไมโครสตริป)
Z_{in}	Input impedance (อิมพีแดนซ์ด้านเข้า)
ε	Permittivity (สภาพยอม)
ε_{eff}	Effective relative permittivity (สภาพยอมสัมพัทธ์ประสิทธิผล)
ε_r	Relative permittivity (สภาพยอมสัมพัทธ์)
ε_0	Free-space permittivity (สภาพยอมในอวกาศว่าง)
γ	Propagation constant (ค่าคงตัวการแพร่กระจาย)
λ_m	Wavelength in microstrip (ความยาวคลื่นในไมโครสตริป)
λ_g	Wavelength in waveguide (ความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น)
λ_0	Free-space wavelength (ความยาวคลื่นในอวกาศว่าง)
μ	Permeability (สภาพคล่องตัว)
μ_0	Free-space permeability (สภาพความคล่องตัวในอวกาศว่าง)
Γ, Γ_{mn}	Reflection coefficients (สัมประสิทธิ์การสะท้อน)
σ	Conductivity (สภาพนำ)
Ω	Ohms (โอห์ม)
ϕ	Electrostatic Potential Azimuth angle (มุมแอซิมัทศักย์ไฟฟ้าสถิต)
θ	Angle (มุม)

สัญลักษณ์	ความหมาย
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_A	ความหนาแน่นสารเจือผู้รับ
N_{Au}	ความหนาแน่นของอะตอมทองคำ
N_B	ความหนาแน่นสารเจือเดิม
N_C	ความหนาแน่นสารเจือในคอลเลคเตอร์
N_D	ความหนาแน่นอะตอมผู้ให้
N_O	ความหนาแน่นสารเจือสูงสุดที่ผิว
N_T	ความหนาแน่นของศูนย์กลางการรวมตัว
n	ความหนาแน่นของอิเลคตรอน

T	อุณหภูมิสมบูรณ์
ρ	พิกัดความต้านทาน
ρ_s	ความต้านทานแผ่น
μ	ความคล่องตัวของพาหะ
μ_e	ความคล่องตัวของอิเลคตรอน
μ_h	ความคล่องตัวของโฮล
μ_n	ความคล่องตัวของอิเลคตรอน
μ_p	ความคล่องตัวของโฮล
ρ	พิกัดความต้านทาน
ρ_s	พิกัดความต้านทานแผ่น
σ	ความนำไฟฟ้าจำเพาะ

บทที่ 1
บทนำ

1.1 บทนำ

การวิจัยค้นคว้าในการใช้ประโยชน์จากคลื่นไมโครเวฟ (Microwave) และคลื่นมิลลิเมตร (Millimeter-wave) มีมากขึ้น ซึ่งสายอากาศรวมแบบแอกทีฟ (Active Integrated Antenna: AIA) ได้ใช้เทคนิคควอไซออปติคอล (Quasi-Optical Technique) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมอยู่ในปัจจุบัน ด้วยจุดเด่นที่มีโครงสร้างกระทัดรัด ขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และใช้ต้นทุนต่ำ ตลอดจนมีเสถียรภาพทางด้านความถี่สูงและเป็นระบบการสื่อสารแบบไร้สาย [1]

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

สำหรับจุดมุ่งหมายของการประดิษฐ์สายอากาศแบบระนาบที่ถูกป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ เพื่อเป็นการง่ายขึ้นในการรวมเข้ากับ MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) ของวงจร RF ในภาคแรก แต่อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดในการใช้กับวงจรมาก ๆ ยังคงต้องพิจารณาต่อไป และในปัจจุบันยังคงมีการพัฒนาเทคโนโลยีของสายอากาศขึ้นมาอย่างต่อเนื่องซึ่งได้แก่ สายอากาศแบบโมโนลิตริกที่รวมอยู่ในสายอากาศรวมแบบแอกทีฟและการประยุกต์ไปใช้งานเช่น ระบบแลนด์ไร้สายภายใน และเรดาร์ป้องกันการชนของรถยนต์ [9]

ดังนั้นจึงได้นำความรู้เกี่ยวกับสายอากาศแบบระนาบซึ่งได้แก่ สายอากาศแผ่นบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงจุดที่มีประสิทธิภาพต่ำ, มีประสิทธิภาพในการแผ่กระจายคลื่นต่ำ และเกิดการสูญเสียเนื่องจากคลื่นผิว จากรายละเอียดข้างต้น จะเห็นถึงปัญหาหลายอย่างในการใช้งานที่ความถี่สูง และผลที่ได้จากสายอากาศแผ่นคือ มีอัตราขยายและประสิทธิภาพต่ำ ซึ่งมีสาเหตุจากการดัปปลิ้ง โพลาไรเซชัน และการที่ต่อเข้าด้วยกันหลายชิ้น แต่อย่างไรก็ตามจุดด้อยต่าง ๆ สามารถแก้ไขได้โดยการสร้างให้เหมาะสมโดยให้ทำงานในสารกึ่งตัวนำโดยใช้ซิลิกอนโดปทองคำ

การวิเคราะห์สายอากาศส่วนใหญ่จะอาศัยทฤษฎีทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในการแก้ปัญหาต่างๆ ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้วิธีการวิเคราะห์ซึ่งได้แก่ แบบจำลองดาวิดี้และวิธีโมเมนต์ (Moment Method) และได้แสดงถึงการประดิษฐ์สายอากาศแผ่นแบบโมโนลิตริกบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโดป

ทองคำ ซึ่งเป็นวัสดุฐานรองที่ดีดังที่ได้เปรียบเทียบกับข้อมูลจากการทดลองกับการวิเคราะห์จากทฤษฎี และได้แสดงถึงการใช้อุณหภูมิสูงในการปฏิบัติการสร้าง ซึ่งมีข้อจำกัดในการทำสารซิลิคอนกับสารทองคำบริสุทธิ์เพื่อแก้ไขให้ดีขึ้น โดยได้นำมาสร้างเป็นสายอากาศ ซึ่งมีสภาพความต้านทาน (Resistivity) สูงกว่า 10^6 [$\Omega \cdot cm$] ข้อมูลนี้ได้จากการวัดเปรียบเทียบกับกราฟความสัมพันธ์กระแสและแรงดันที่ได้จากทฤษฎี และการสูญเสียที่เปลี่ยนแปลงไปตามพารามิเตอร์โดยการวิเคราะห์ด้วยวิธีโมเมนต์ สำหรับสายอากาศแบบระนาบบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ ได้ทำการประดิษฐ์ขึ้นจริง และได้ทำการวัดทดสอบเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดกับผลทางทฤษฎี รวมทั้งเหตุผลความแตกต่าง ได้แสดงไว้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ครบถ้วนแล้ว

1.2 วัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์

จากที่กล่าวมาในตอนต้น เป็นการแนะนำเกี่ยวกับหลักการและข้อดีของสายอากาศแผ่นแบบโมโนลิตริกบนวัสดุฐานรองซิลิคอน และเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีสายอากาศ ซึ่งสาระในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาวัสดุฐานรองสำหรับสายอากาศที่มีความเหมาะสม เพื่อวิจัยหลักการเบื้องต้นของสายอากาศรวมแบบแอกทีฟ ทั้งนี้ได้นำมาใช้เป็นประโยชน์เพื่อประกอบการอธิบายแสดงทฤษฎีของสายอากาศรวมแบบแอกทีฟ และใช้เป็นอุปกรณ์ในการศึกษาทดลองให้แก่นักศึกษา วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังที่จะให้เป็นแนวทางในการศึกษาเพื่อสร้างสรรค์และพัฒนาให้แก่นักศึกษา นำไปประยุกต์และพัฒนาสำหรับใช้งานในด้านเทคโนโลยีอีเล็กทรอนิกส์และเทคโนโลยีการสื่อสารต่อไป

1.3 หลักการใหม่ในวิทยานิพนธ์

เสนอวัสดุฐานรองใหม่สำหรับสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป โดยปกติแล้วสายอากาศแผ่นไมโครสตริปจะถูกสร้างบนวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก ก็ยังมีปัญหาเรื่องขนาดของสายอากาศอยู่ แต่ในปัจจุบันนั้นมีความต้องการคุณสมบัติของสายอากาศที่มีประสิทธภาพสูง ขนาดเล็ก และมีน้ำหนักเบา จึงมีแนวคิดใช้วัสดุฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำ คือซิลิคอน แต่ลำพังสารซิลิคอนอย่างเดียวก็ไม่สามารถใช้งานที่ความถี่สูงได้ จึงได้เติมอะตอมทองคำในแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น ระนาบ (111) มีสภาพความต้านทาน 10^2 [$\Omega \cdot cm$] และมีสภาพยอมสัมพัทธ์ $\varepsilon_r = 11.8$ ทำให้มีคุณสมบัติในการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าและมีความเป็นอินทรินซิก (Intrinsic) มากขึ้น ในกระบวนการสร้างนั้นเป็นกระบวนการทางเซมิคอนดัคเตอร์ โดยวิธีการใช้ความร้อนสูง และนอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติทำให้สภาพความต้านทานสูง จากการวัดเทียบกับความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดัน ซึ่งปรากฏว่ามีสภาพความต้านทานมากกว่า 10^6 [$\Omega \cdot cm$] ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับวัสดุฐานรองที่ดีสำหรับสายอากาศแผ่น แล้วใช้งานที่ความถี่สูงได้ ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบสายอากาศ ทำงานที่ความถี่ 10

บทที่ 5 จะได้กล่าวในกระบวนการสร้าง หลักการและขั้นตอนต่าง ๆ ของการสร้างสายอากาศแผ่นไมโครสตริปแบบโมโนลิตริกบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ ขั้นตอนการสร้างแต่ละกระบวนการ เช่นกระบวนการแพร่สารเจือทองคำในเนื้อสารซิลิคอน โดยกระบวนการทางเซมิคอนดัคเตอร์ โดยระเหยสารเจือทองคำด้วยความร้อน และการแพร่ (Diffusion) อะตอมทองคำลงในแผ่นผลึกซิลิคอน จากนั้นก็เป็นกระบวนการโฟโต้ลิโทกราฟฟี่ (Photolithography) จะได้กล่าวถึงวิธีการใช้สารไวแสงและทำการฉายด้วยแสงอัลตราไวโอเลต การพัฒนารูป (Development) และกระบวนการสุดท้ายเป็นการสร้างลวดลายของสายอากาศบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ โดยเทคนิคการ Lift off โดยน้ำยาสารเคมีเพื่อการให้สารไวแสงออก (Resist Removal) ซึ่งจะได้สายอากาศแผ่นไมโครสตริปแบบโมโนลิตริกบนฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ จากนั้นจึงทำการซินเตอริง (Sintering) เพื่อให้สายอากาศติดแน่นกับฐานรอง และนำไปบอนดิ้ง (Bonding) ที่จุดป้อนสัญญาณของสายอากาศเพื่อทำการทดสอบและการใช้งาน ในหัวข้อสุดท้ายเป็นการสรุปกระบวนการสร้างต่างๆ ของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปแบบโมโนลิตริกบนฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ

บทที่ 6 ได้กล่าวถึงการทดสอบและผลที่ได้จากการทดสอบสายอากาศแผ่นไมโครสตริปแบบโมโนลิตริกบนฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ การวัดค่าสภาพความต้านทาน ของฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ จากนั้นจึงนำไปทดสอบความถี่รีโซแนนท์ของสายอากาศ และทำการทดสอบคุณสมบัติการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปบนฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ และหัวข้อสุดท้ายจะได้สรุปการทดลองและผลการทดลองต่าง ๆ ในบทนี้

บทที่ 7 เป็นบทสรุปและเสนอแนะผลการศึกษาและทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทั้งหมด พร้อมทั้งได้เสนอแนะแนวทางในการศึกษาและการพัฒนา ให้แก่ผู้ที่สนใจจะศึกษาเรื่องสายอากาศแผ่นไมโครสตริปแบบโมโนลิตริกบนฐานรองซิลิคอนโดปทองคำต่อไป

บทที่ 2
สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป

2.1 บทนำ

แนวคิดเกี่ยวกับสายอากาศแผ่นไมโครสตริป เริ่มขึ้นครั้งแรกเมื่อต้นปี 1953 และเมื่อ 20 ปีที่ผ่านมานี้ ได้มีการสร้างสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปขึ้นมา โดยได้ใช้หลักการและเทคนิคของโฟโต้เทค (Photo-Tech) โดยวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกประกอบด้วยทองแดงหรือทอง และได้มีการพัฒนาทำให้มีคุณสมบัติทางกลศาสตร์ดีขึ้น อีกทั้งยังช่วยลดแทนเจนต์การสูญเสีย (Loss Tangent) ที่จะเกิดขึ้นด้วย สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปได้สร้างขึ้นครั้งแรกในปี 1970 ต่อจากนั้นมาก็ได้มีการวิจัยและพัฒนาสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปอย่างต่อเนื่อง โดยมีข้อดีคือ น้ำหนักเบา ขนาดเล็ก ราคาถูก โครงสร้างเป็นระนาบ และสามารถสร้างเป็นวงจรรวม (IC) ได้

ได้มีการพัฒนาสายอากาศชนิดอื่นที่มีโครงสร้างเป็นระนาบเรียบคล้ายกับสายอากาศแผ่นไมโครสตริป เช่น สายอากาศแบบร่องด้วยสายส่งสตริป (Stripline Slot Antenna) สายอากาศแผ่นแบบโพรงด้านหลัง (Cavity Backed Printed Antenna) และสายอากาศแบบไดโพลแผ่น (Printed Dipole Antenna) โดยที่ได้เปรียบเทียบคุณสมบัติของสายอากาศชนิดต่าง ๆ ไว้ในตารางที่ 2.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่า สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป จะมีคุณสมบัติโดยรวมดีกว่าสายอากาศชนิดอื่น

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบสายอากาศที่มีโครงสร้างเป็นระนาบเรียบชนิดต่าง ๆ

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

2.1.1 ข้อดีและข้อเสียของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป

ข้อดีของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศชนิดอื่นที่ใช้ในย่านความถี่ไมโครเวฟ โดยมีการความถี่ใช้งานอยู่ในช่วง 100 MHz ถึง 50 GHz คือ

- น้ำหนักเบา, ขนาดเล็ก, โครงสร้างเป็นแผ่นราบ ซึ่งสามารถทำเป็นรูปต่างๆ ได้ง่าย
- ราคาถูก กระบวนการสร้างไม่ยุ่งยาก
- มีลักษณะบาง ทำให้ติดตั้งเข้ากับยานพาหนะได้ง่าย
- ง่ายในการติดตั้งบนจรวดและดาวเทียม
- สายอากาศมีการแผ่กระจายตามแนวภาคตัดขวางน้อย
- สามารถทำให้มีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นหรือวงกลมได้ง่ายเพียงเปลี่ยนตำแหน่งของจุดป้อน
- สามารถทำเป็นสายอากาศสองความถี่ได้ง่าย
- ไม่ต้องใช้โพรงด้านหลัง
- ไมโครสตริปสามารถเชื่อมต่อเข้ากับการออกแบบที่ประกอบด้วยอุปกรณ์โซลิดสเตท (solid state) เช่น วงจรออสซิลเลเตอร์ วงจรขยาย, สวิตช์, ตัวเลื่อนเฟสได้ง่าย
- สามารถสร้างให้มีการป้อนและการแมตช์อิมพีแดนซ์ ได้พร้อมๆ ในโครงสร้างสายอากาศ

อย่างไรก็ตาม สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปยังมีข้อเสียเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศชนิดอื่น คือ

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

หมายเหตุ ปัจจุบันสายอากาศถูกพัฒนาเรื่อย ๆ จนจะแก้ข้อเสียได้หมดแล้ว

2.1.2 การนำไปประยุกต์ใช้งาน

ในทางปฏิบัติ ได้มีการนำสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปไปออกแบบใช้งานในด้านต่าง ๆ มากมาย ข้อดีของสายอากาศไมโครสตริปมีมากกว่าข้อเสีย ในการนำสายอากาศไมโครสตริปไปประยุกต์ใช้งาน เช่น

- การสื่อสารทางดาวเทียม
- ดอปเปลอร์ และเรดาร์อื่นๆ
- การติดต่อทางวิทยุสื่อสาร
- การสั่งงานและการควบคุม
- การวัดสภาพแวดล้อมและการส่งสัญญาณระยะไกล
- องค์ประกอบส่วนป้อนของสายอากาศที่มีโครงสร้างซับซ้อน
- ตัวรับที่ใช้ในการเดินเรือ
- ตัวกระจายคลื่นทางการแพทย์

2.2 คุณสมบัติพื้นฐานของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป

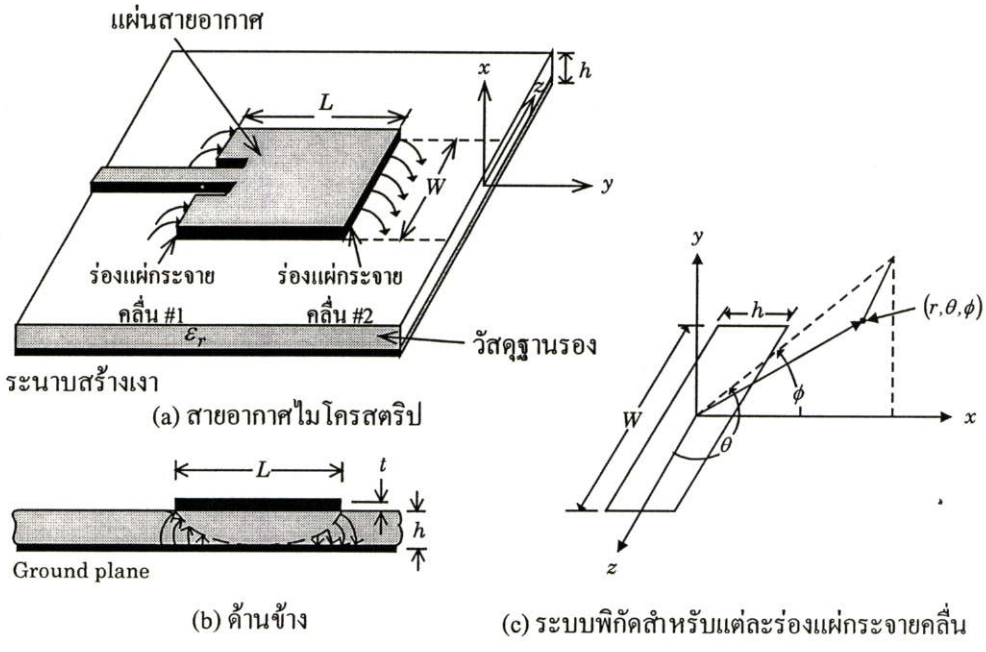
ลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแสดงดังรูปที่ 2.1(a) ซึ่งประกอบด้วยแผ่นตัวนำที่บางมากวางอยู่บนวัสดุฐานรอง ส่วนอีกด้านหนึ่งของวัสดุฐานรองจะเป็นระนาบสร้างเงา

วัสดุฐานรองสำหรับนำมาสร้างสายอากาศไมโครสตริปนั้นมีด้วยกันหลายชนิด โดยปกติแล้วสภาพยอมสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกนั้นจะอยู่ในช่วง $2.2 \le \varepsilon_r \le 12$ และสิ่งที่สำคัญในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปคือความหนาของวัสดุฐานรอง (h) การออกแบบโดยใช้สภาพยอมสัมพัทธ์ในช่วงต่ำๆ จะทำให้สายอากาศมีประสิทธิภาพสูง และมีแบนด์วิดท์กว้างขึ้น แต่ข้อเสียก็คือสายอากาศจะมีขนาดใหญ่ตามไปด้วย สำหรับวัสดุฐานรองที่บางและมีสภาพยอมสัมพัทธ์สูงนั้น ส่วนใหญ่จะนำมาใช้ร่วมกับวงจรทางไมโครเวฟ เนื่องจากต้องการให้ฟริงกิง (Fringing) ของสนามแคบ เพื่อทำให้เกิดการคัปปลิ้ง (Coupling) และการแผ่กระจายคลื่นน้อยที่สุด และยังทำให้วงจรมีขนาดเล็กลงอีกด้วย แต่ก็จะทำให้มีการสูญเสียมากขึ้น ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพและแบนด์วิดท์ลดลง ดังนั้นสายอากาศไมโครสตริปและวงจรไมโครเวฟจึงสามารถนำมาใช้ร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

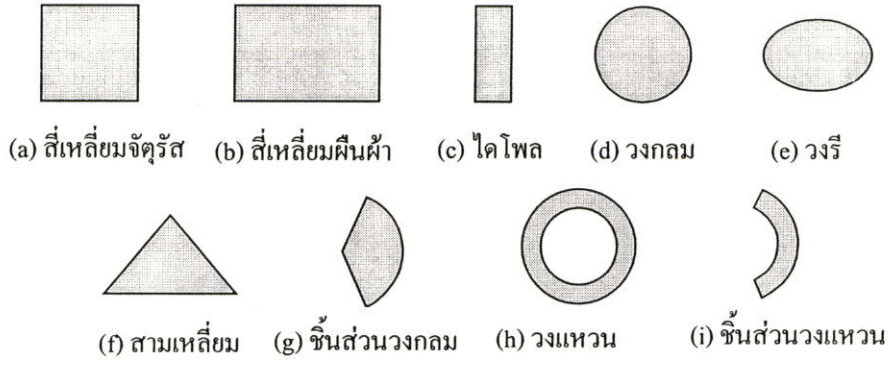
บ่อยครั้งที่เรามักเรียกสายอากาศไมโครสตริปว่า "สายอากาศแผ่น" (Patch Antenna) โดยปกติส่วนที่ทำหน้าที่แผ่กระจายคลื่นและส่วนที่ใช้ในการป้อน สัญญาณให้กับสายอากาศจะอยู่บนวัสดุฐานรองเดียวกัน ส่วนที่ใช้แผ่กระจายคลื่นหรือแพ็ทซ์นี้อาจมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้า เป็นแผ่นบางๆ หรือไดโพล วงกลม วงรี สามเหลี่ยม หรือรูปร่างอื่นๆ อีกก็ได้ ซึ่งในรูปที่ 2.2 ได้แสดงลักษณะของแผ่นไมโครสตริปรูปร่างต่าง ๆ ไว้แล้ว

ลักษณะของแผ่นแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้า ไดโพลและวงกลมเป็นแบบที่นิยมใช้กันมากที่สุด เนื่องจากง่ายต่อการวิเคราะห์และการสร้าง อีกทั้งยังมีคุณสมบัติในการแผ่กระจายคลื่นที่ดี แผ่นสายอากาศแบบไดโพลเป็นแบบที่มีโพลาไรเซชันไขว้ (Cross Polarization) น้อยที่สุด เนื่องจากโดยธรรมชาติแล้วจะมีแบนด์วิดท์ที่กว้างและใช้พื้นที่ในการสร้างน้อย และเหมาะสมในการ

สร้างเป็นแถวลำดับ โดยทั้งสายอากาศองค์ประกอบเดี่ยว (Single Element) และแบบแถวลำดับนั้น สามารถทำให้มีลักษณะการโพลาไรซ์ได้ทั้งแบบเชิงเส้น (Linear) และวงกลม (Circular)



รูปที่ 2.1 สายอากาศไมโครสตริปและระบบพิกัด

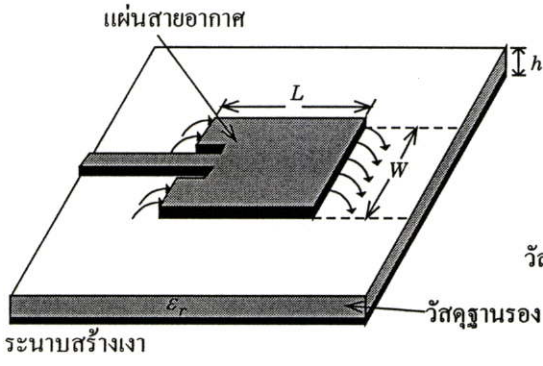


รูปที่ 2.2 รูปร่างของแผ่นสายอากาศไมโครสตริปแบบต่างๆ

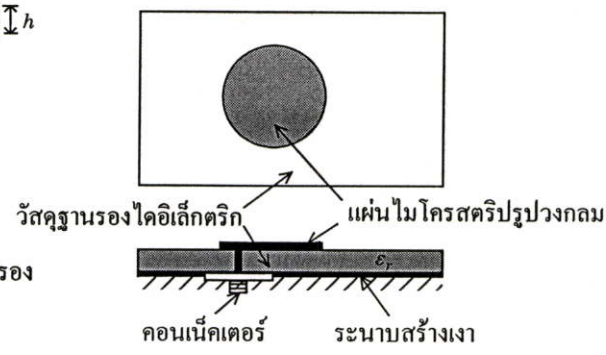
2.3 การป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป

การป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศไมโครสตริปนั้นสามารถทำได้หลายวิธี แต่ที่นิยมนั้นจะมีอยู่ด้วยกัน 4 วิธีคือ การป้อนสัญญาณด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป สายโคแอกเชียล การคัปปลิ้งผ่านช่องเปิด (Aperture) และการคัปปลิ้งด้วยการวางไว้ใกล้กัน (Proximity) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และวงจรสมมูลของการป้อนสัญญาณในแต่ละแบบแสดงดังรูปที่ 2.4 ลักษณะของสายป้อนสัญญาณแบบไมโครสตริปจะเป็นแผ่นตัวนำ ซึ่งปกติแล้วจะมีความกว้างน้อยกว่าความกว้างของ

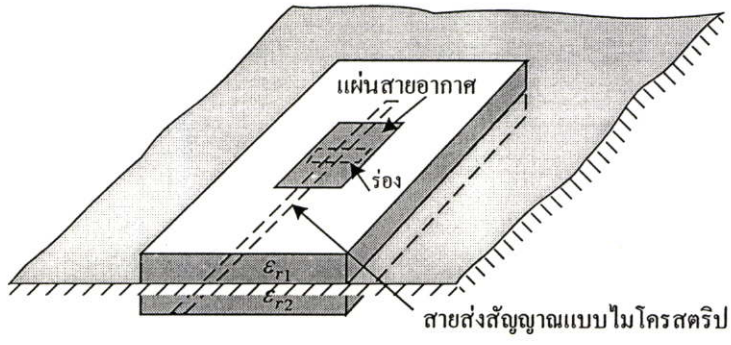
แพ็ทซ์มาก การป้อนสัญญาณด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปจะง่ายต่อการสร้างและการแมตช์อิมพีแดนซ์โดยการควบคุมตำแหน่งจุดป้อน อีกทั้งยังค่อนข้างง่ายต่อการวิเคราะห์ แต่ถ้าความหนาของวัสดุฐานรองเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดคลื่นผิวมากขึ้น และยังทำให้เกิดการแผ่กระจายปลอมปนจากตัวป้อนสัญญาณอีกด้วย ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วการป้อนด้วยวิธีนี้จะมีแบนด์วิดท์ประมาณ 2-5%



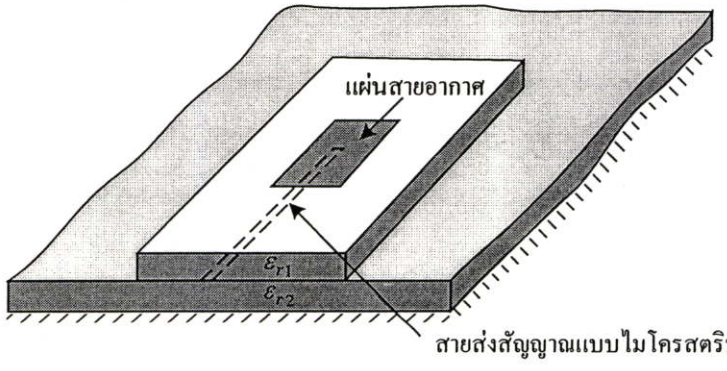
(a) การป้อนสัญญาณด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป



(b) การป้อนด้วยโพรบ

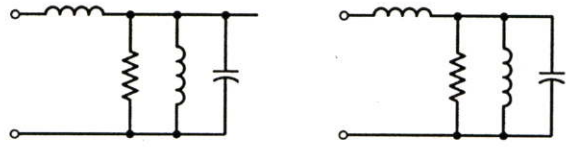


(c) การป้อนสัญญาณด้วยการคัปปลิ้งผ่านช่องเปิด

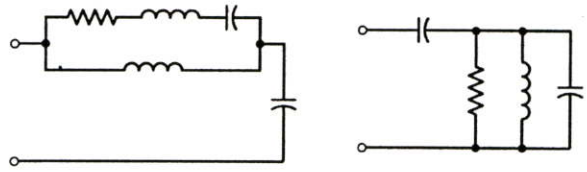


(d) การป้อนสัญญาณด้วยการวางไว้ใกล้กัน

รูปที่ 2.3 การป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศไมโครสตริป



(a) สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป (b) โพรบ



(c) การคัปปลิ้งผ่านช่องเปิด (d) การคัปปลิ้งด้วยการวางไว้ใกล้กัน

รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลย์ของการป้อนสัญญาณตามรูปที่ 2.3

การป้อนสัญญาณด้วยสายโคแอกเชียล ตัวนำด้านในของสายโคแอกเชียลจะต่ออยู่กับแพ็ทซ์ที่ทำหน้าที่แผ่กระจายคลื่น ในขณะที่ตัวนำด้านนอกของสายจะต่ออยู่กับระนาบสร้างเงา การป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศไมโครสตริปแบบนี้เป็นแบบที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากง่ายต่อการสร้างและการแมตช์อิมพีแดนซ์ และมีการแผ่กระจายปลอมปนน้อย แต่วิธีนี้ยังคงทำให้แบนด์วิดท์แคบและยากต่อการสร้างแบบจำลอง

การป้อนสัญญาณทั้งแบบไมโครสตริปและแบบสายโคแอกเชียล โดยธรรมชาติแล้วจะไม่สมมาตรกัน ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดโมดในอันดับที่สูงกว่าขึ้น (Higher Order Mode) ทำให้การแผ่กระจายมีโพลาไรซ์ไขว้เกิดขึ้น เพื่อที่จะแก้ปัญหาเหล่านี้จึงต้องอาศัยการป้อนสัญญาณด้วยการคัปปลิ้งผ่านช่องเปิด ดังแสดงในรูปที่ 2.3(c) และ 2.3(d) การคัปปลิ้งผ่านช่องเปิดดังแสดงในรูปที่ 2.3 (c) เป็นแบบที่สร้างได้ยากที่สุดในทั้ง 4 แบบ และยังคงมีแบนด์วิดท์ที่แคบ การคัปปลิ้งในลักษณะนี้จะช่วยลดการแผ่กระจายปลอมปนได้ ลักษณะโครงสร้างของการคัปปลิ้งผ่านช่องเปิดนั้นจะประกอบด้วยวัสดุฐานรอง 2 ชั้นถูกแยกออกจากกันด้วยระนาบสร้างเงา ด้านล่างของวัสดุฐานรองแผ่นล่างสุดจะเป็นสายป้อนสัญญาณแบบไมโครสตริป ซึ่งพลังงานจะถูกคัปปลิ้งผ่านร่อง (Slot) ที่อยู่บนระนาบสร้างเงาไปยังตัวแผ่กระจายคลื่น โดยปกติแล้ววัสดุฐานรองด้านล่างจะเป็นวัสดุที่มีสภาพยอมสัมพัทธ์สูง ส่วนวัสดุฐานรองอันบนจะเป็นวัสดุที่มีสภาพยอมสัมพัทธ์ต่ำกว่า ระนาบสร้างเงาที่แบ่งวัสดุฐานรองทั้งสองออกจากกันนั้นจะช่วยป้องกันส่วนที่แผ่กระจายคลื่นออกจากส่วนป้อนสัญญาณ ซึ่งจะช่วยลดการแผ่กระจายปลอมปนและทำให้ได้โพลาไรเซชันที่บริสุทธิ์ขึ้น โดยทั่วไปแล้วการแมตช์อิมพีแดนซ์ทำได้โดยการควบคุมความกว้างของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปและควบคุมความยาวของร่อง การคัปปลิ้งผ่านร่องนี้สามารถสร้างแบบจำลองได้โดยอาศัยทฤษฎีของ Bethe ซึ่งจะพิจารณาเกี่ยวกับการคัปปลิ้งผ่านช่องเปิดเล็ก ๆ บนระนาบของตัวนำ การป้อนสัญญาณทั้ง 4 แบบนี้ การคัปปลิ้งโดยการวางไว้ใกล้ๆ กันนี้จะมีแบนด์วิดท์กว้างที่สุด อีก

ทั้งยังง่ายต่อการสร้างแบบจำลองและมีการปลอมปนของการแผ่กระจายคลื่นต่ำ แต่การสร้างก็ยังทำได้ยากอยู่

2.4 การแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป

สนามการแผ่กระจายของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปจะเกิดจากสนามขอบระหว่างขอบของตัวนำสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปกับระนาบสร้างเงา กระบวนการของการแผ่กระจายคลื่นจะเกิดจากสายส่งไมโครสตริปวงจรเปิด ได้มีการทดสอบการแผ่กระจายคลื่นจากความไม่ต่อเนื่องของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป โดยมีการวิเคราะห์อยู่บนพื้นฐานการไหลของกระแสในตัวนำ วิธีนี้สามารถใช้คำนวณหาผลกระทบของการแผ่กระจายที่มีต่อค่าตัวร่วม Q ของรีโซเนเตอร์ไมโครสตริป การวิเคราะห์เบื้องต้นบนสนามในแบบช่วงว่าง โดยเปิดขอบของไมโครสตริปและระนาบสร้างเงา ดังนั้นการวิเคราะห์แบบนี้ผลของการแผ่กระจายทั้งหมดตัวประกอบคุณภาพจะกล่าวถึงในส่วนของขนาดรีโซเนเตอร์ (Resonator) ความถี่ในการใช้งานสัมพันธ์กับสภาพยอมสัมพัทธ์และความหนาของวัสดุฐานรอง ผลทฤษฎีและการทดลอง แสดงให้เห็นว่าความถี่สูงการแผ่กระจายจะสูญเสียมากที่ตัวนำและไดอิเล็กตริก ซึ่งเป็นข้อยืนยันได้ว่าการแผ่กระจายของวงจรเปิดสายส่งแบบไมโครสตริปจะใช้กำลังงานมาก เมื่อทำการสร้างสายอากาศโดยที่วัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกมีความหนาน้อย

2.5 ตัวแปรแสดงคุณภาพ (quality factor) แบนด์วิดท์ และประสิทธิภาพ

ตัวแปรแสดงคุณภาพ แบนด์วิดท์ และประสิทธิภาพเป็นตัวเลขคุณค่า (Figure of Marit) ของสายอากาศ ซึ่งมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน และไม่สามารถแยกออกมาพิจารณาเฉพาะแต่ละอย่างเพื่อให้ได้ค่าที่ดีที่สุด (Optimize) ได้ นี่จึงเป็นเครื่องหมายที่แสดงว่า เมื่อต้องการเพิ่มประสิทธิภาพด้านใดด้านหนึ่งให้กับสายอากาศจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพด้านอื่นๆ ของสายอากาศด้อยลงตามไปด้วย

ตัวแปรแสดงคุณภาพเป็นตัวเลขคุณค่าที่แสดงการสูญเสียของสายอากาศ ปกติแล้วคือการสูญเสียเนื่องจากการแผ่กระจาย ความนำ Ohmic ของไดอิเล็กตริกและการสูญเสียเนื่องจากคลื่นผิว ดังนั้นตัวแปรแสดงคุณภาพรวม Q_0 จึงเป็นค่าความสูญเสียรวมทั้งหมดและปกติจะอยู่ในรูป

$$\frac{1}{Q_0}=\frac{1}{Q_r}+\frac{1}{Q_c}+\frac{1}{Q_d}+\frac{1}{Q_{sw}} \tag{2.1}$$

โดยที่ Q_0 คือ ตัวแปรแสดงคุณภาพรวม

Q_r คือ ตัวแปรแสดงการสูญเสียเนื่องจากการแผ่กระจายคลื่น (คลื่นในอากาศ)

Q_c คือ ตัวแปรแสดงการสูญเสียเนื่องจากความนำไฟฟ้า

Q_d คือ ตัวแปรแสดงการสูญเสียเนื่องจากไดอิเล็กตริก

Q_{sw} คือ ตัวแปรแสดงการสูญเสียเนื่องจากคลื่นผิว

สำหรับวัสดุฐานรองที่บางมาก ๆ ความสูญเสียเนื่องจากคลื่นผิวก็จะมีค่าน้อยมากๆ จนสามารถละทิ้งได้ แต่สำหรับวัสดุฐานรองที่หนาขึ้นจะต้องนำค่านี้มาพิจารณาด้วย ความสูญเสียเหล่านี้สามารถทำให้ลดลงได้โดยอาศัยคาวิตี้

สำหรับวัสดุฐานรองที่บางมาก ๆ ($h << \lambda_o$) สำหรับแพ็ทซ์รูปร่างใด ๆ (ประกอบด้วยสี่เหลี่ยมผืนผ้าและวงกลม) สูตรโดยประมาณสำหรับหาค่าของตัวแปรแสดงคุณภาพของความสูญเสียหลายๆ อย่าง สามารถเขียนได้ว่า

$$Q_c = h\sqrt{\pi f \mu \sigma} \tag{2.2}$$

$$Q_d = \frac{1}{\tan \delta} \tag{2.3}$$

$$Q_r = \frac{2\omega\varepsilon_r}{hG_{1/1}} K \tag{2.4}$$

โดยที่ $\tan\delta$ คือค่าแทนเจนท์ของความสูญเสียของวัสดุฐานรอง , σ คือสภาพความนำไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้าระหว่างแพ็ทซ์และระนาบสร้างเงา, $G_{1/1}$ คือความนำรวมต่อหน่วยความยาวของช่องเปิดที่แผ่กระจายและ

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

สำหรับช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าในโมด TM^x_{010}

$$K = \frac{L}{4} \tag{2.5a}$$

$$G_{1/1} = \frac{G_{rad}}{W} \tag{2.5b}$$

ค่า Q_r ตามสมการ 2.4 เป็นสัดส่วนผกผันกับค่าความสูงของวัสดุฐานรองและสำหรับวัสดุฐานรองบางมาก ๆ ค่านี้จะเป็นตัวแปรที่สำคัญ

แบนด์วิดท์ของสายอากาศก็จะเป็นสัดส่วนผกผันกับค่า Q_0 ของสายอากาศด้วย ซึ่งถูกนิยามโดย

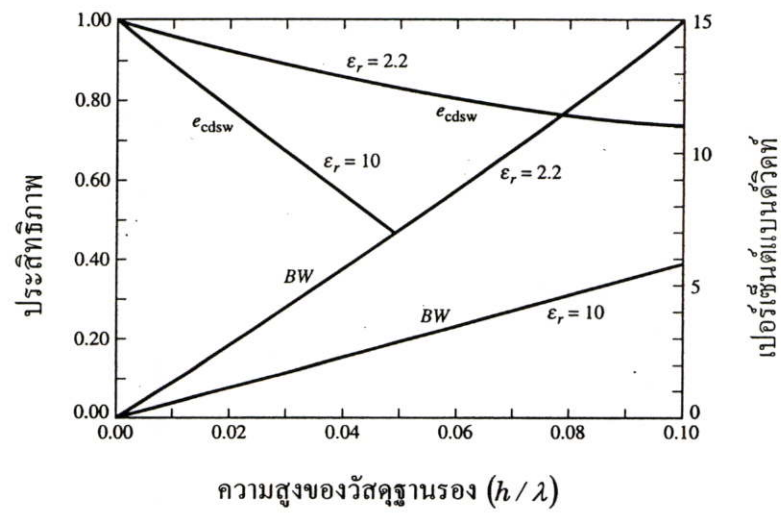
$$\frac{\Delta f}{f_o} = \frac{1}{Q_0} \tag{2.6}$$

อย่างไรก็ตามสมการ 2.6 นี้อาจจะไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้เลย ถ้าไม่ได้พิจารณาถึงการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่จุดอินพุตของสายอากาศ คำจำกัดความของแบนด์วิดท์ที่ให้ความหมายดีขึ้นควรจะครอบคลุมตลอดย่านความถี่ โดยที่ค่า VSWR ที่จุดต่ออินพุตจะมีค่าเท่ากับหรือน้อยกว่าค่ามากที่สุดที่ต้องการ เมื่อสมมติให้ VSWR มีค่าเป็น 1 ที่ความถี่ที่ต้องการ สมการที่แก้ไขมาจากสมการ 2.6 ซึ่งนำการแมตซ์อิมพีแดนซ์มาพิจารณาด้วยนั้นจะได้เป็น

$$\frac{\Delta f}{f_o} = \frac{VSWR - 1}{Q_0\sqrt{VSWR}} \tag{2.6a}$$

โดยทั่วไปแล้วแบนด์วิดท์จะเป็นสัดส่วนกับปริมาตร ซึ่งสำหรับสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความถี่รีโซแนนท์คงที่ สามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} \text{BW} \sim \text{volume} &= \text{พื้นที่} \times \text{ความสูง} = \text{ความกว้าง} \times \text{ความยาว} \times \text{ความสูง} \\ &\sim \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r}}\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r}}\sqrt{\varepsilon_r} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r}} \end{aligned} \tag{2.7}$$



รูปที่ 2.5 ประสิทธิภาพและแบนด์วิดท์ต่อความสูงของวัสดุฐานรองที่ความถี่รีโซแนนท์ของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยใช้วัสดุฐานรองที่แตกต่างกัน 2 ชนิด

ดังนั้นแบนด์วิดท์จึงเป็นสัดส่วนผกผันกับค่ารากที่สองของสภาพยอมสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง การเปลี่ยนแปลงของแบนด์วิดท์ของสายอากาศไมโครสตริป ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความสูงของวัสดุฐานรองที่ทำการนอร์มอลไลซ์แล้วสำหรับวัสดุฐานรอง 2 แบบแสดงดังรูปที่ 2.5 ซึ่งจะเห็นได้ว่าแบนด์วิดท์จะเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของวัสดุฐานรองสูงขึ้น

ประสิทธิภาพการแผ่กระจายของสายอากาศถูกนิยามให้เป็นสัดส่วนของกำลังงานที่แผ่กระจายออกไปต่อกำลังงานอินพุต ซึ่งสามารถแสดงในเทอมของตัวแปรแสดงคุณภาพสำหรับสายอากาศไมโครสตริปได้ด้วย

$$e_{cdsw} = \frac{1/Q_r}{1/Q_0} = \frac{Q_0}{Q_r} \tag{2.8}$$

โดยที่ Q_0 กำหนดให้ตามสมการ (2.1) การเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพซึ่งเป็นฟังก์ชันของความสูงของวัสดุฐานรองสำหรับสายอากาศไมโครสตริปที่มีวัสดุฐานรองต่างกันสองชนิดแสดงดังรูปที่ 2.5

2.6 บทสรุป

ในบทนี้ได้ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของสายอากาศแบบไมโครสตริป การประยุกต์ไปใช้งานเพื่อใช้เป็นแนวทางในการนำความสัมพันธ์ของค่าต่าง ๆ และการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศแผ่นไมโครสตริป รวมทั้งการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป การพิจารณาถึงแบนด์วิดท์และประสิทธิภาพของสายอากาศ ที่กล่าวมาข้างต้นนี้จะเป็นพื้นฐานในการคาดการณ์ล่วงหน้า และการวิเคราะห์ที่มีหลักการถูกต้อง

บทที่ 3
ทฤษฎีซิลิคอนโดปทองคำ

3.1 บทนำ

การเติมสารเจือลงในแผ่นผลึกซิลิคอน สามารถกระทำได้โดยการแพร่ (Diffusion) ปกติการแพร่หมายถึงการเคลื่อนที่ของอนุภาคจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปสู่ที่ ๆ มีความเข้มข้นต่ำกว่า การแพร่สารในกระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำนั้น เป็นการแพร่ภายในของแข็ง ซึ่งปรากฏการณ์ของการแพร่แบบนี้ จะเกิดขึ้นได้ก็เฉพาะในภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง ๆ (เช่น ประมาณ $1000\,^{\circ}C$) กล่าวคือในขณะอุณหภูมิสูง ๆ อะตอมของสารใด ๆ ก็สามารถแพร่เข้าสู่สารของแข็งนั้น อาจถูกกำหนดได้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusivity:D) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับสภาพความคล่องตัว (Mobility: μ) ตามกฎของไอน์สไตน์ ดังนี้

$$D = \frac{kT}{q} \cdot \mu \tag{3.1}$$

โดยที่ q คือขนาดประจุของอิเล็กตรอน

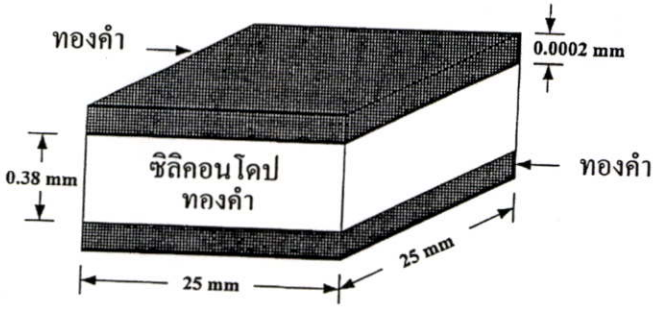
k คือค่าคงตัวของโบส์ตมันน์

T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์

μ คือค่าคล่องตัวของอนุภาค ($\mathrm{cm}^2/V-\mathrm{sec}$)

3.2 ทฤษฎี

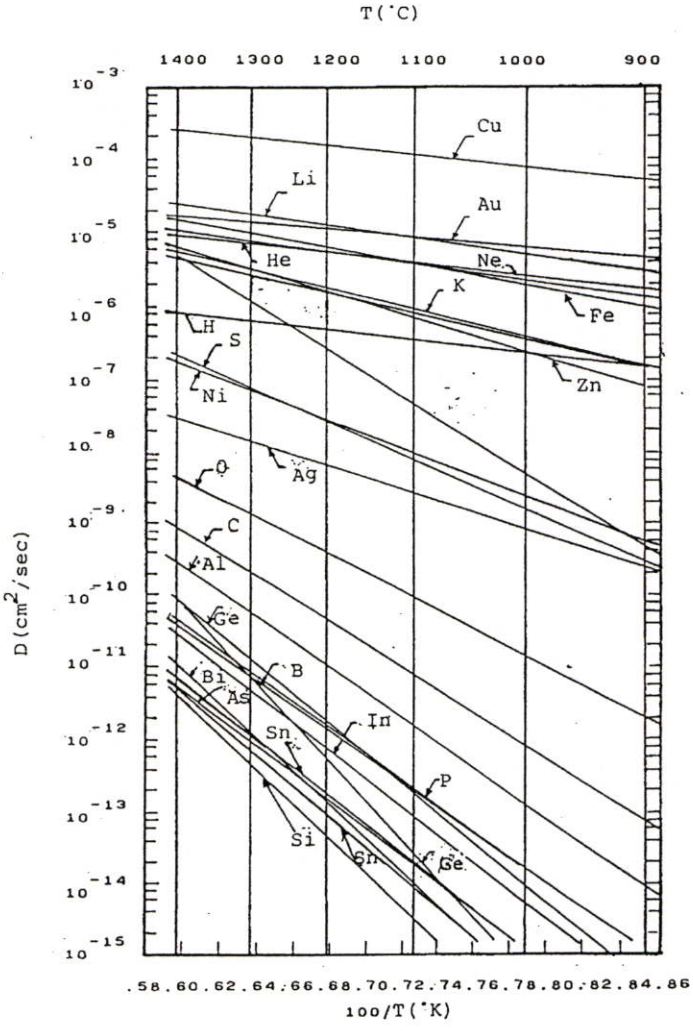
สารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดเอ็น ที่ถูกเติมอะตอมทองคำ ดังแสดงตัวอย่างโครงสร้างในรูปที่ 3.1 จะแสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากทองคำในเนื้อสารซิลิคอนชนิดเอ็นจะมีพฤติกรรมซึ่งพอกล่าวสรุปเป็นข้อ ๆ ได้ดังนี้ [4]



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างโครงสร้างซิลิคอนโดปทอง

3.2.1 สัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมทองคำในซิลิคอน

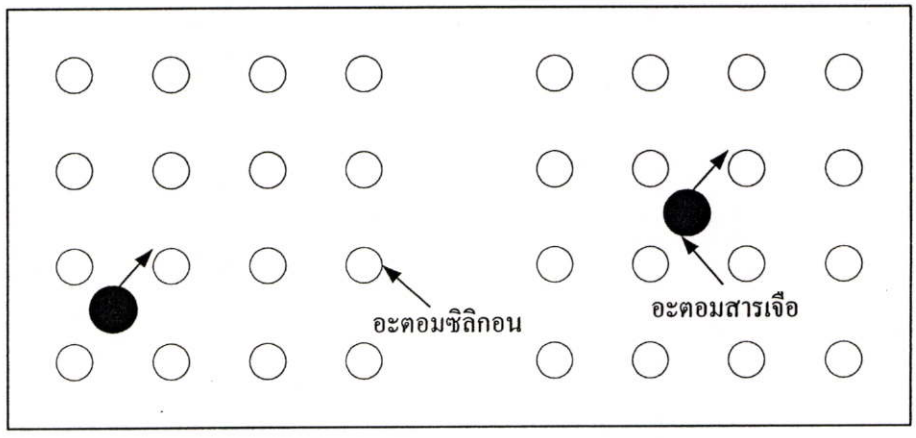
ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมของธาตุชนิดต่าง ๆ (D) ในซิลิคอนกับอุณหภูมิ (T) แสดงดังรูปที่ 3.2 พบว่าเมื่อพิจารณาว่าอะตอมทองคำเป็นสารเจือระดับลึกจะมีสัมประสิทธิ์การแพร่เป็นไปตามกราฟ คือ ประมาณ 2.5×10^{-5} cm^2/sec ที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส เช่นที่อุณหภูมิ 1100°C จะมี $D=9\times10^{-6}$ cm^2/sec เป็นต้น ดังนั้นจึงสามารถควบคุมปริมาณของอะตอมทองคำในซิลิคอนได้ โดยการควบคุมอุณหภูมิการแพร่ของอะตอมทองคำ การแพร่ของอะตอมทองคำจะแพร่เข้าไปอยู่ระหว่างอะตอม (Interstitial) ของซิลิคอน โดยไม่มีพันธะใด ๆ ยึดกับอะตอมของซิลิคอน ดังแสดงในรูป 3.3 นั้นอัตราการแพร่ชนิดนี้จะเร็วกว่าอัตราการแพร่แบบเข้าไปแทนที่ (Sub-Stitutional Diffusion) [4],[10]



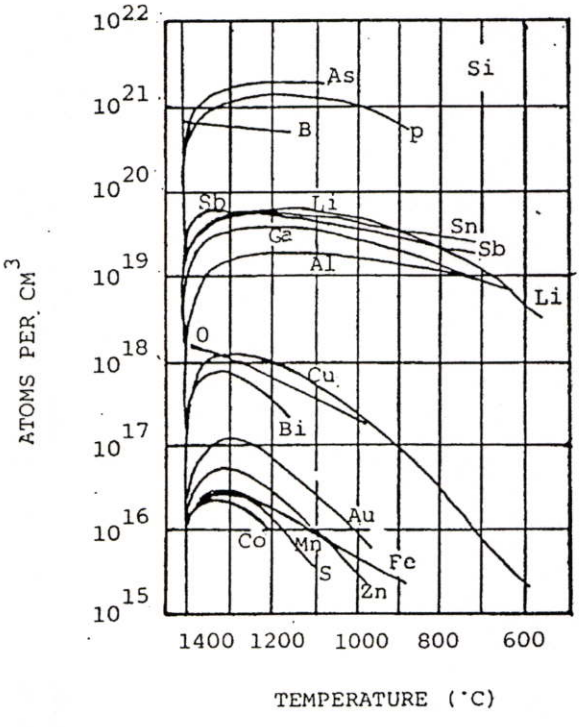
รูปที่ 3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมของธาตุชนิดต่าง ๆ

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การแพร่อะตอมของทองคำเข้าไปในซิลิคอน จะช่วยทำให้อัตราการรวมตัวกันใหม่ (Recombination Rate) มีค่าสูงขึ้น เป็นผลให้อายุของพาหะ (Carrier Life Time) มีค่าลดลง บางทีเราเรียกทองคำว่าเป็น Carrier life time killer ผลดังที่กล่าวมานี้ จะทำให้ Switching speed ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำมีค่ามากขึ้น และทองคำจะมีค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่สูงด้วย การแพร่ทองคำ นิยมทำกันมากกับสิ่งประดิษฐ์หรือวงจรรวมที่นำมาใช้งานเป็นประเภท สวิทช์ เช่น สวิทช์ชิ่งไดโอด สวิทช์ชิ่งทรานซิสเตอร์ และวงจรรวมทางดิจิตอลแบบต่าง ๆ เป็นต้น สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้พัฒนานำมาเป็นฐานของสายอากาศ



รูปที่ 3.3 การแพร่ของอะตอมทองคำเข้าไปอยู่ระหว่างอะตอมซิลิคอน [10]



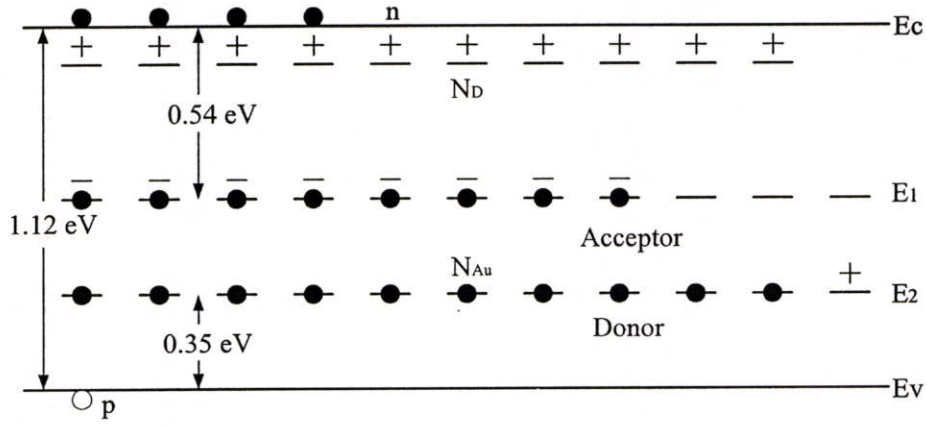
รูปที่ 3.4 Solid Solubility ของสารเจือชนิดต่าง ๆ ในซิลิคอน

34217

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

3.2.2 ระดับพลังงานของอะตอมทองคำในซิลิคอน

เมื่อเติมอะตอมทองคำลงในซิลิคอนจะเกิดระดับพลังงาน deep donor level โดยจะอยู่เหนือจากแถบวาเลนซ์ (Valance Band) 0.35 eV และเกิด deep acceptor level ใต้แถบความนำ (Conduction Band) ลงมา 0.54 eV สำหรับระดับพลังงานของทองคำในซิลิคอนที่สภาวะต่าง ๆ [4],[10] แสดงได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ไดอะแกรมระดับพลังงานของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมทองคำ

ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมทองคำดังแสดงไดอะแกรมระดับพลังงาน และสามารถหาความหนาแน่นของอะตอมทองคำในซิลิคอนได้ดังสมการ

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

N_{Au} : ความหนาแน่นของทองคำ

n_{00} : ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนก่อนการแพร่ทองคำ

n_0 : ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนหลังการแพร่ทองคำ

n_i : ความหนาแน่นของคลื่นพาห์อินทรินซิก (Intrinsic carrier density)

E_1 : ระดับพลังงานผู้รับของทองคำ (Acceptor-level of Au)

E_F : ระดับเฟอร์มิ (Fermi level)

k : ค่าคงตัวโบลทซ์แมนน์ (Boltzmann constant)

T : อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

ρ : ความต้านทานหลังการแพร่อะตอมทองคำ

3.2.3 ค่าพิกัดความต้านทานของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมทองคำ

ในซิลิคอนชนิดเอ็นเมื่อถูกแพร่ด้วยทองคำจะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบความนำตกลงมาในระดับพลังงานผู้รับลึก (Deep Acceptor Level) ซึ่งอยู่ใต้แถบความนำประมาณ 0.54 ± 0.02 eV หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คืออิเล็กตรอนในแถบความนำจะถูกจับ (Trap) ด้วยระดับพลังงานผู้รับ (acceptor level) คือเกิดปรากฏการณ์ชดเชย (Compensation) ทำให้จำนวนอิเล็กตรอนดังกล่าวลดลงค่าพิกัดความต้านทานจึงเพิ่มขึ้นและช่วงอายุ (Lifetime) ของพาหะจะลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณอะตอมของทองคำให้มากขึ้นจะทำให้ระดับพลังงานผู้รับลึก มีจำนวนมากพอที่จะจับอิเล็กตรอนอิสระในแถบความนำได้เกือบหมด ดังนั้นจึงเป็นผลทำให้ค่าพิกัดความต้านทานจะมีค่าสูงขึ้นจนกลายเป็นอินทรินซิก (Intrinsic Type)

ที่กล่าวมาข้างต้นคือคุณสมบัติบางประการของทองคำในเนื้อซิลิคอน หลังจากที่เติมอะตอมทองคำแล้วจะทำให้ค่าความคล่องตัวของประจุพาหะเปลี่ยนแปลงไป

3.3 การวัดพารามิเตอร์ของวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทอง

3.3.1 การวัดค่าพิกัดความต้านทาน

การวัดค่าพิกัดความต้านทานเป็นการหาปริมาณอะตอมสารเจือที่อยู่ในเนื้อสารขั้นฐานรองหรืออะตอมสารเจือที่เติมลงไปใหม่ในซิลิคอน (ปริมาณความหนาแน่นวัดเป็น อะตอม/ลบ.ซม.) ไม่ว่าจะเป็นจำนวนอะตอมสารเจือผู้ให้ (Donor, N_D) หรือจำนวนอะตอมสารเจือผู้รับ (Acceptor, N_A) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ จำนวนของพาหะอิสระ (Free Carrier) ซึ่งก็คือจำนวนอิเล็กตรอน (n) และโฮล (p) อิสระที่เกิดขึ้นหลังจากเติมสารเจือแล้ว เราสามารถคำนวณหาค่าต่าง ๆ เหล่านั้นได้ โดยการวัดค่าความนำไฟฟ้าหรือในทางตรงกันข้ามค่าพิกัดความต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำนั้นๆ กล่าวคือ ค่าความนำไฟฟ้าจะเป็นส่วนกลับของค่าพิกัดความต้านทาน ดังนั้นถ้าให้ ρ (Rho) เป็นสัญลักษณ์แสดงค่าความต้านนำไฟฟ้าและค่าพิกัดความต้านทานไฟฟ้าแล้วจะได้ว่า

$$\sigma = 1/\rho \tag{3.3}$$

นอกจากนี้แล้วค่าคามต้านไฟฟ้าดังกล่าวนี้ จะขึ้นอยู่กับจำนวนของอิเล็กตรอนและโฮลอิสระประจุไฟฟ้าขอพาหะแต่ละตัวก็คือ q ซึ่งมีค่า 1.602×10^{-19} คูลอมบ์ และยังขึ้นอยู่กับความสามารถในการเคลื่อนที่ของพาหะ ซึ่งเราเรียกว่า ความคล่องตัว (μ) ดังนั้นค่าความนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำ จึงแสดงได้โดยสมการ

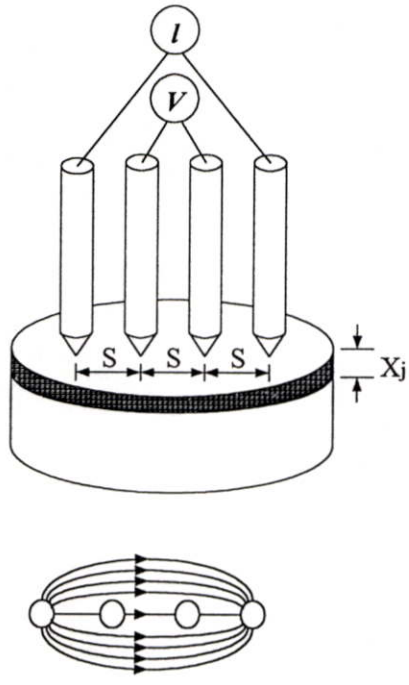
$$\sigma = q\mu_n n + q\mu_p p \tag{3.4}$$

โดยที่ μ_n และ μ_p เป็นความคล่องตัวของอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ

n และ p คือความหนาแน่นอิเล็กตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำ

สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิด n และ p เรานิยมคิดเฉพาะพาหะส่วนมากในสารกึ่งตัวนำนั้นคือ อิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ ส่วนพาหะส่วนน้อยซึ่งก็คือโฮลและอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและพี ถือว่ามีค่าน้อยมากจึงไม่นำมาคิดคำนวณ

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเราสามารถคำนวณหาค่าความนำไฟฟ้า ได้โดยวัดค่าพิกัดความต้านทานซึ่งเป็นค่าต่อต้านการไหลของกระแสไฟฟ้า และทำให้เกิดมีแรงดันตกคร่อมวัสดุนั้นๆ ค่า ρ ซึ่งมีหน่วยเป็นโอห์ม-เซนติเมตร (Ω·cm) นี้ สามารถวัดค่าได้โดยใช้เครื่องมือโฟร์พอยท์โพรบ (Four Point Probe)



มองด้านบน

รูปที่ 3.6 การวัดค่าพิกัดความต้านทานโดยวิธีโฟร์พอยท์โพรบ

เครื่องมือดังกล่าวนี้นิยมใช้วัดค่า แผ่นความต้านทาน (sheet resistance) โดยแทนด้วยสัญญาณลักษณ์ ρ_s ซึ่งมีหน่วยเป็นโอห์มต่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส ($\Omega/\square$) ทำให้เราสามารถทราบค่าพิกัดความต้านทาน $\rho = \rho_s \times$ ความหนา หรือ $\rho = \rho_s \times t$

เครื่องโฟร์พอยท์โพรบ นี้จะประกอบด้วยเข็มโลหะ ซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าทั้งสี่ซึ่งจะห่างจากกันเป็นระยะ S เท่า ๆ กัน ดังรูปที่ 3.6

เข็มทั้งสี่นี้จะถูกกดลงบนแผ่นผลึกซิลิคอน แล้วป้อนไบอัสทำให้เกิดกระแส I ไหลผ่านเข็มโลหะที่อยู่ริมนอกสุด คือ เข็มที่ 1 และ 4 กระแสดังกล่าวนี้จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม (V) ขึ้นระหว่างขั้วของเข็มโลหะด้านใน

การหาค่าพิกัดความต้านทาน (ρ) ด้วยวิธีดังกล่าวนี้ ขนาดของแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำที่ใช้วัดจะต้องมีความยาวและกว้างมากกว่าระยะห่างเข็ม ซึ่งก็คือระยะ S นั่นเอง

3.3.2 การวัดความต้านทานแผ่น (sheet resistivity ρ_s)

ในงานสารกึ่งตัวนำมักจะวัดค่านี้เสมอ ๆ เพราะแผ่นเวเฟอร์ทั่วไปจะบางและการแพร่สารเจือนั้น สารเจือจะลงไปไม่ทะลุตลอดแผ่น วิธีที่ใช้กันมากที่สุด คือโฟร์พอยท์โพรบ โดยจะมีโพรบของกระแส 1 คู่ และสำหรับวัดแรงดันอีก 1 คู่

สูตรพื้นฐานสำหรับการคำนวณหาการวัดความต้านทานแผ่น ก็คือ

$$\rho_s = F^*(V/I) \tag{3.5}$$

โดยค่าของ F^* สามารถที่จะหาได้จากตารางที่ 3.1

เครื่องโฟร์พอยท์โพรบ โดยทั่วไปจะเป็นแบบเชิงเส้น หมายความว่าเข็มโพรบทั้ง 4 วางในแนวเดียวกัน ระยะห่างระหว่างเข็มเท่ากันคือ S โดยทั่วไปแล้วชั้นงานหนาน้อยกว่า 0.1 S และขอบห่างกว่าเข็มมากกว่า 20 เท่าของ S แล้ว ρ_s หาได้จาก

$$\rho_s = 4.53(V/I) \tag{3.6}$$

ตารางที่ 3.1 ค่า correction สำหรับโฟร์พอยท์โพรบ 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	$2\pi(\ln 3 - \ln 2) \approx 15.50$
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

$$\rho_s = 2\pi S(V/I) \tag{3.7}$$

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีความหนาแน่นของสารเจือเท่ากันตลอด ถ้าหากเราทราบค่า ρ_s ก็สามารถจะหาพิกัดความต้านทาน (resistivity ρ_s) ได้ดังนี้

$$\rho = \rho StF(S) \tag{3.8}$$

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

ตารางที่ 3.2 Correction factor ของ ρ เมื่อ t 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	0.9798
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

ในบทนี้เป็นการศึกษาทฤษฎีและหลักการของการแพร่อะตอมทองคำในแผ่นผลึกซิลิคอน ได้แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของทองคำในซิลิคอน และระดับพลังงานของอะตอมทองคำในซิลิคอนเมื่อเติมอะตอมทองคำลงในแผ่นผลึกซิลิคอน ตลอดจนหาค่าพิกัดของความต้านทานของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยทองคำบริสุทธิ์ โดยอาศัยการวัดและเทียบกับความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน

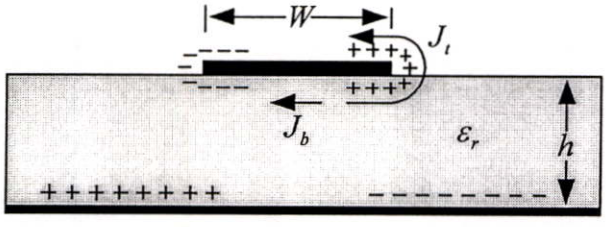
บทที่ 4
การวิเคราะห์และการออกแบบ

4.1 กล่าวนำ

การวิเคราะห์สายอากาศแบบไมโครสตริปนั้นสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีจะให้ผลการวิเคราะห์ที่แตกต่างกันออกไป โดยวิธีที่นิยมใช้กันมากคือ วิธีแบบจำลองสายส่งสัญญาณ (Transmission Line Model) แบบจำลองคาวิตี้ (Cavity Model) และการวิเคราะห์ด้วยวิธีโมเมนต์ (MM) ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเน้นที่การวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศที่ได้จากการสร้างสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ ในส่วนที่เกี่ยวกับการสูญเสียของวัสดุฐานรอง อินพุตอิมพีแดนซ์ อัตราขยายของสายอากาศ ตลอดจนคุณสมบัติในการแผ่กระจายคลื่น ถึงแม้ว่าวิธีการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองสายส่งสัญญาณนั้นเป็นวิธีการที่สะดวกและง่ายต่อการวิเคราะห์ แต่ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้นับว่ายังมีความผิดพลาดอยู่มาก เมื่อใช้วิเคราะห์สายอากาศที่ทำงานในย่านความถี่สูง ๆ ดังนั้นการนำวิธีการวิเคราะห์ 2 วิธีหลังมาใช้จึงน่าจะเป็นวิธีการที่เหมาะสมที่สุด

4.2 การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองคาวิตี้

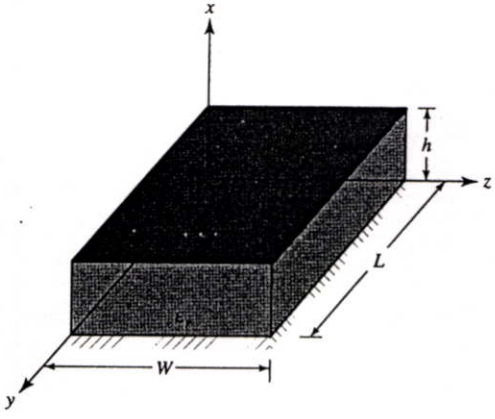
ในการวิเคราะห์สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปด้วยแบบจำลองคาวิตี้ [6] นั้น โครงสร้างของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.1 จะถูกพิจารณาว่ามีลักษณะเป็นคาวิตี้ที่มีสารไดอิเล็กตริกบรรจุอยู่ภายใน ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และเพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจจึงเปรียบคาวิตี้นี้ว่าถูกปิดล้อมด้วยด้วยแผ่นตัวนำไฟฟ้าทั้งด้านบนและด้านล่าง ส่วนด้านข้างทุกด้านจะถูกปิดล้อมด้วยผนังสนามแม่เหล็กที่มีสภาวะเปิดวงจร แบบจำลองนี้จะใช้สำหรับการพิจารณาสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าภายในคาวิตี้ ดังนั้นเราจึงสามารถคำนวณแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น อินพุตอิมพีแดนซ์และความถี่รีโซแนนท์ของสายอากาศได้



รูปที่ 4.1 การแผ่กระจายประจุและความหนาแน่นของกระแสบนแผ่นสายอากาศไมโครสตริป

เมื่อสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปถูกกระตุ้น สนามภายในคาวิตี้จะแผ่กระจายออกไปตามผนังของคาวิตี้ ทำให้เกิดประจุแผ่กระจายอยู่บนผิวด้านบนและด้านล่างของแผ่นสายอากาศ รวมถึงบนผิวตัวนำด้านที่เป็นระนาบกราวด์ด้วย จากรูปที่ 4.1 สังเกตได้ว่ามีประจุเกิดขึ้น 2 ชนิด ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดึงดูดสำหรับประจุที่ต่างชนิดกัน และเกิดแรงผลักสำหรับประจุที่เป็นชนิดเดียวกัน แรงเหล่านี้จะทำให้ประจุเกิดการเคลื่อนที่ทำให้เกิดความหนาแน่นของกระแส J_b และ J_t ที่ผิวด้านบนและด้านล่างของแผ่นสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 4.1 การไหลของกระแสนั้นจะมีค่าเป็นศูนย์ที่ด้านบนของแผ่นสายอากาศ ซึ่งทำให้แบบจำลองคาวิตี้ของผนังทั้ง 4 ด้านที่สมมติขึ้นนั้นกลายเป็นผิวของตัวนำแม่เหล็กที่สมบูรณ์ โดยสมมติให้แผ่นตัวนำและผนังแม่เหล็กที่ปิดล้อม คาวิตี้อยู่นี้ไม่มีการสูญเสียพลังงานและอิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีแต่จำนวนจริงเท่านั้น ตลอดจนคาวิตี้ที่มีสารไดอิเล็กตริกอยู่ภายในนี้ไม่สามารถแผ่กระจายคลื่นได้

โครงสร้างโดยทั่วไปของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปนั้น อัตราส่วนความหนาของวัสดุฐานรองต่อความกว้างของแผ่นสายอากาศจะมีค่าน้อยมาก ดังนั้นคลื่นที่เกิดขึ้นนั้นจะปรากฏอยู่ภายในวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเป็นเหตุผลที่ทำให้สายอากาศแบบนี้มีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ ดังนั้นจึงพิจารณาให้การเปลี่ยนแปลงของสนามตามความสูงมีค่าคงที่ จึงทำให้ภายในคาวิตี้นี้มีเพียงสนามในโมด T_M^x เท่านั้น



รูปที่ 4.2 โครงสร้างทางเรขาคณิตของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

คุณลักษณะของสนามภายในคาวิตี้นี้สามารถหาได้โดยอาศัยศักย์เวคเตอร์ (Vector Potential) ซึ่งจะพิจารณาเงื่อนไขต่างๆ ตามที่แสดงในรูปที่ 4.2 คาวิตี้ที่เกิดขึ้นจะพิจารณาปริมาตรที่อยู่ภายใต้แผ่นสายอากาศ ซึ่งวัสดุฐานรองจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเป็น ε_r โดยที่ศักย์เวคเตอร์สามารถหาได้จากสมการคลื่นดังนี้

$$\nabla^2 A_x + k^2 A_x = 0 \tag{4.1}$$

$$\nabla^2 A_x + k^2 A_x = 0 \tag{4.1}$$

ซึ่งจะได้ผลเฉลยของสมการในรูปทั่วไปเป็น

$$A_x = \left\langle A_1\cos(k_x x) + B_1\sin(k_x x)\right\rangle \left\langle A_2\cos(k_y y) + B_2\cos(k_y y)\right\rangle$$
$$\left\langle A_3\cos(k_z z) + B_3\cos(k_z z)\right\rangle \tag{4.2}$$

โดยที่ k_x, k_y และ k_z คือหมายเลขคลื่น (Wave number) ตามแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ การหาลักษณะของสนามภายในคาวิตี้นี้จะต้องกำหนดขอบเขตของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายในคาวิตี้ ซึ่งจะสัมพันธ์กับศักย์เวคเตอร์ A_x ดังนี้

$$E_x = -j\frac{1}{\omega\mu\varepsilon}\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + k^2\right)A_x \qquad H_x = 0$$

$$E_y = -j\frac{1}{\omega\mu\varepsilon}\frac{\partial^2 A_x}{\partial x \partial y} \qquad H_y = \frac{1}{\mu}\frac{\partial A_x}{\partial z} \tag{4.3}$$

$$E_z = -j\frac{1}{\omega\mu\varepsilon}\frac{\partial^2 A_x}{\partial x \partial z} \qquad H_z = \frac{1}{\mu}\frac{\partial A_x}{\partial y}$$

โดยอาศัยเงื่อนไข

$$E_y(x' = 0, 0 \le y' \le L, 0 \le z' \le W)$$
$$= E_y(x' = h, 0 \le y' \le L, 0 \le z' \le W) = 0$$
$$H_y(0 \le x' \le h, 0 \le y' \le L, z' = 0) \tag{4.4}$$
$$= H_y(0 \le x' \le h, 0 \le y' \le L, z' = W) = 0$$
$$H_z(0 \le x' \le h, y' = 0, 0 \le z' \le W)$$
$$= H_z(0 \le x' \le h, y' = L, 0 \le z' \le W) = 0$$

สัญลักษณ์ (′) เช่น x', y', z' เพื่อแสดงว่าเป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ภายในช่องไดอิเล็กตริก

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

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

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

$$k_z = \frac{p\pi}{h} \qquad p = 0,1,2,\ldots \tag{4.6}$$

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

$$k_y = \frac{n\pi}{h} \qquad n = 0,1,2,... \tag{4.7}$$

ในที่สุดจะได้ว่ารูปแบบของศักย์เวคเตอร์ A_x ภายในคาวิตี้คือ

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

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

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

โดยที่ m,n,p เป็นตัวเลขที่แสดงว่าความกว้าง ความยาว และความสูง อยู่ในแนวแกน x,y,z ตามลำดับ และมีค่าเป็นจำนวนเท่าของ $\lambda/2$ นอกจากนี้ k_x, k_y, k_z ยังสามารถทำให้อยู่ในรูป

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

ความถี่รีโซแนนท์ของคาวิตี้กำหนดได้จาก

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

หลังจากนั้นแทนค่าของ A_x ลงในสมการ E_x, E_y, E_z จะได้ว่า

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

เพื่อหาโมดหลักที่ความถี่รีโซแนนท์ต่ำสุด เราจะต้องทราบความถี่รีโซแนนท์ก่อน โมดซึ่งมีความถี่รีโซแนนท์ต่ำที่สุดเราจะให้เป็นโมดหลัก สำหรับสายอากาศไมโครสตริปที่มี $h << L$ และ $h << W$ ถ้า $L > W > h$ โมดซึ่งเป็นความถี่ต่ำสุด (โมดหลัก) คือ TM^{x}_{010} ซึ่งหาความถี่รีโซแนนท์ได้จาก

$$(f_r)_{010} = \frac{1}{2L\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{v_o}{2L\sqrt{\varepsilon_r}} \tag{4.13}$$

โดยที่ v_o เป็นความเร็วของแสงในอากาศว่าง แต่ถ้า $L > W > L/2 > h$ จะเป็นโมด TM^{x}_{001} โดยหาความถี่รีโซแนนท์ได้จากสมการ

$$(f_r)_{001} = \frac{1}{2W\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{v_o}{2W\sqrt{\varepsilon_r}} \tag{4.14}$$

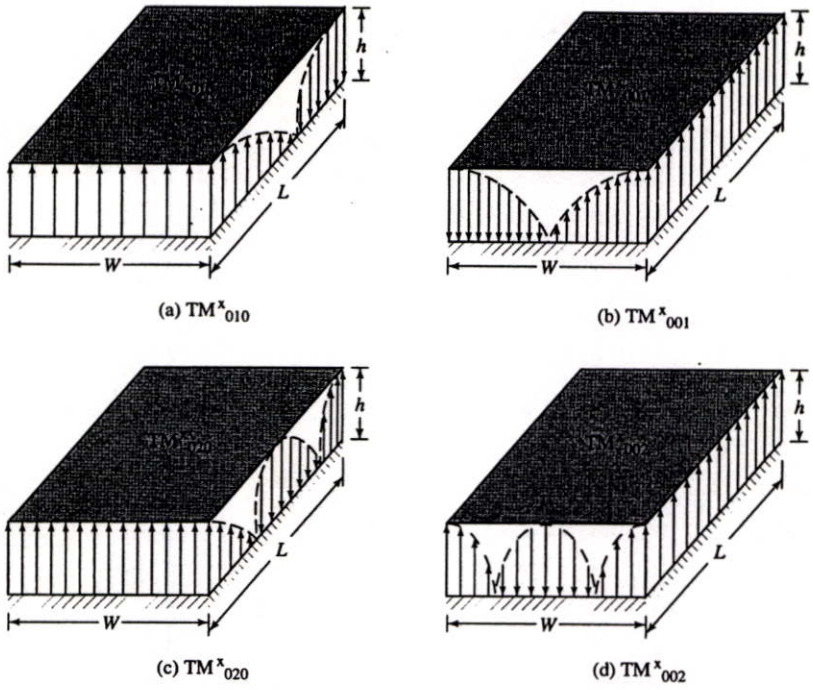
ถ้า $L > L/2 > W > h$ จะได้เป็นโมด TM^{x}_{020} แทนโมด TM^{x}_{001} โดยหาความถี่รีโซแนนท์ได้จากสมการ

$$(f_r)_{020} = \frac{1}{L\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{v_o}{L\sqrt{\varepsilon_r}} \tag{4.15}$$

ถ้า $W>L>h$ จะได้โมดหลักเป็น TM^{x}_{001} โดยหาความถี่รีโซแนนท์ได้จากสมการ 4.14 ขณะที่ $W>W/2>L>h$ จะเป็นโมดที่สองหรือโมด TM^{x}_{020} อาศัยสมการ 4.12 การแผ่กระจายของสนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสตามขอบผนังของคาวิตี้สำหรับโมด $TM^{x}_{010}, TM^{x}_{001}, TM^{x}_{020}$ และ TM^{x}_{002} ตามลำดับแสดงดังในรูปที่ 4.3

จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนั้นจะสมมติให้ไม่มีผลเนื่องจากสนามฟริงกิงตามขอบของคาวิตี้ ซึ่งไม่ใช้ค่าทั้งหมดแต่เป็นเพียงการสมมติ ซึ่งสมการที่ได้รวมผลของสนามฟริงกิงนั้นได้กล่าวมาแล้วก่อนหน้านี้ดังสมการ 4.5 สำหรับโมดหลัก TM^{x}_{010}

แบบจำลองคาวิตี้จะมองสายอากาศแบบไมโครสตริปว่าเป็น สารไดอิเล็กตริกที่มีผนังสนามไฟฟ้าที่สมบูรณ์แบบปิดอยู่ที่ด้านบนและด้านล่าง ส่วนอีก 4 ด้านที่เหลือ ซึ่งอยู่ด้านข้างจะถูกปิดล้อมด้วยผนังสนามแม่เหล็ก ซึ่งบริเวณนี้เองที่เป็นตัวการทำให้เกิดการแผ่กระจายคลื่น ดังนั้นการจะหาความหนาแน่นกระแส จะต้องคิดเสมือนว่าสารตัวกลางมีอยู่แต่เฉพาะภายใต้แผ่นตัวนำด้านบนเสมอ



รูปที่ 4.3 โครงสร้างของสนามสำหรับสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

จากการใช้ทฤษฎีสนามแม่เหล็ก (Huygen's theory) จะสามารถแทนแผ่นตัวนำที่อยู่ด้านบนด้วยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า J_t ที่ผิวด้านบนของแผ่นตัวนำ (โดยปกติมีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า J_b อยู่ข้างใต้แผ่นตัวนำด้วย แต่ในที่นี้จะไม่กล่าวถึง) และที่ด้านข้างทั้ง 4 ด้านจะแสดงได้ด้วยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า J_s และความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก M_s ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (a) โดยที่

$$J_s = \hat{n} \times H_a \tag{4.16}$$

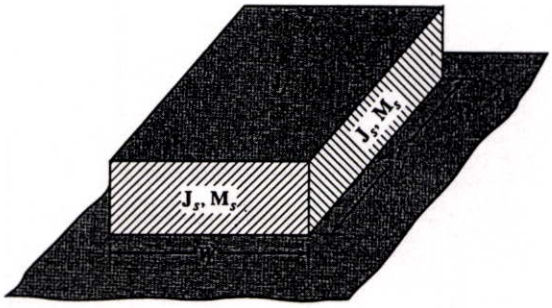
และ

$$M_s = -\hat{n} \times E_a \tag{4.17}$$

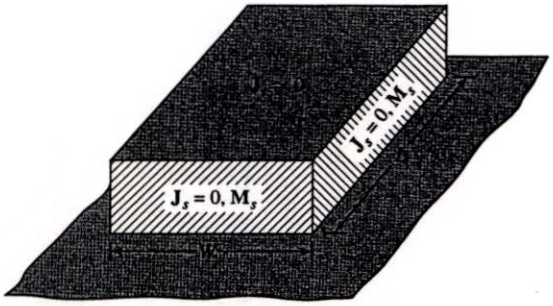
เนื่องจากสายอากาศไมโครสตริปมีอัตราส่วนของความสูงต่อความกว้างค่อนข้างน้อย ดังนั้น J_t ที่อยู่ด้านบนจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ J_b ที่อยู่ด้านล่าง จึงสมมติได้ว่า J_t มีค่าเป็นศูนย์ และจะไม่นำมาคิด จึงทำให้สนามแม่เหล็กที่บริเวณขอบ ซึ่งเกิดจาก J_t มีค่าเป็นศูนย์ (หรือมีค่าน้อยมาก) ด้วย ส่งผลให้ J_s ที่บริเวณด้านข้าง ซึ่งเกิดจากสนามแม่เหล็กมีค่าเป็นศูนย์อีก ดังนั้นจะเหลือเฉพาะ M_s ที่อยู่ด้านข้างโดยรอบของแบบจำลองคาวิตี้เท่านั้นที่ไม่เป็นศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (b) จากการใช้ทฤษฎีอิมเมจ (Image Theory) จะได้ว่า

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

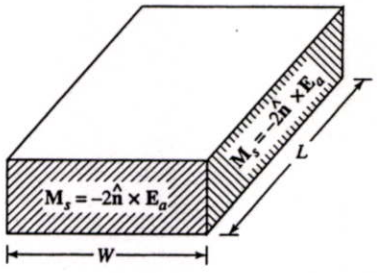
รอบเส้นรอบวงด้านข้างของแผ่นตัวนำที่แผ่กระจายคลื่นออกไปในอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (c)



(a) J_s, M_s ด้วยระนาบสร้างเงา



(b) $J_s = 0, M_s$ ด้วยระนาบสร้าง



(c) M_s โดยไม่มีระนาบสร้างเงา

รูปที่ 4.4 ความหนาแน่นกระแสสมมูลบนด้านทั้ง 4 ของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

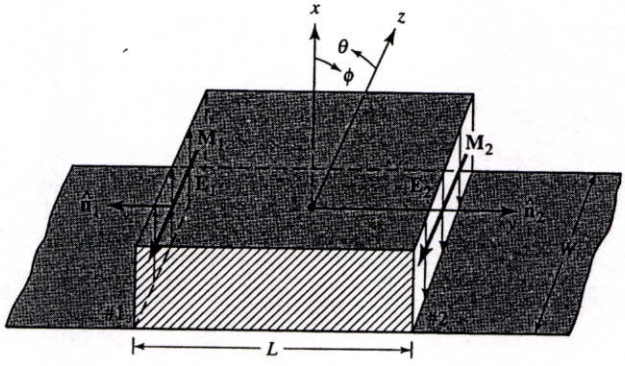
ในแบบจำลองคาวิตี้จะมองสายอากาศไมโครสตริปว่าเปรียบเสมือนมีช่องว่างอยู่ด้านข้างโดยรอบทั้ง 4 ด้านของคาวิตี้ โดยที่ช่องว่างเหล่านี้จะเป็นตัวแผ่กระจายคลื่นออกไป แต่ช่องว่างทั้ง 4 ช่องนี้ไม่ได้แผ่กระจายคลื่นได้ทั้ง 4 ช่อง จะมีเพียง 2 ช่องเท่านั้นที่สามารถแผ่กระจายคลื่นได้ ส่วนอีก 2 ช่องที่เหลือจะเกิดการหักล้างกันเอง โดย 2 ช่องที่เกิดการหักล้างกันคือช่องที่อยู่ห่างกันเป็นระยะทาง W ส่วนอีก 2 ช่องที่สามารถแผ่กระจายคลื่นได้จะอยู่ห่างกันเป็นระยะทาง L ซึ่งเรียก 2 ช่องนี้ว่า ช่องแผ่กระจายคลื่น (Radiating slot) โดยที่ระหว่าง 2 ช่องนี้จะมีแผ่นตัวนำคู่ขนาน ซึ่งแสดงตัวเหมือนเป็นหม้อแปลง (Transformer) ที่มีความต้านทานต่ำ ความยาวของ L ประมาณได้ว่าเท่ากับ $\lambda_g/2$ เมื่อ λ_g หมายถึงความยาวคลื่นที่เดินทางในตัวกลางเพื่อให้สนามของช่องว่างทั้ง 2 มีทิศทางตรงข้ามกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (a) จากช่องว่างทั้ง 2 ที่เป็นตัวแผ่กระจายคลื่นจะทำตัวเสมือนเป็นอาเรย์ 2 องค์ประกอบที่มีระยะห่างจากกันเป็น $\lambda_g/2$

สมมติให้โมดหลักภายในคาวิตี้เป็นโมด TM^x_{010} องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะลดลงจากสมการ 4.12 เป็น

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

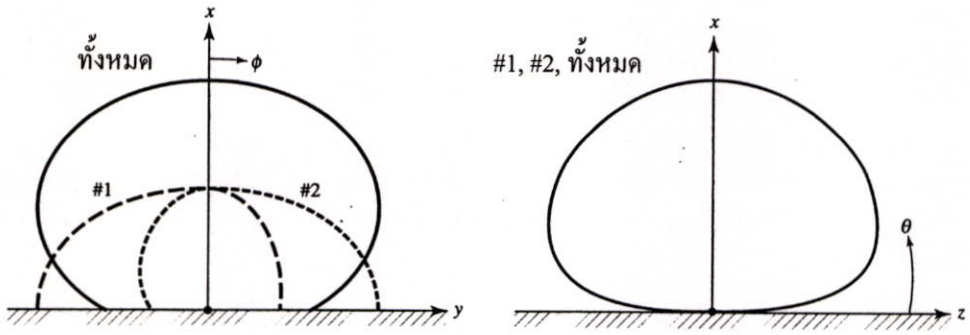
โดยที่ $E_o = -j\omega A_{010}$ และ $H_o = (\pi / \mu L)A_{010}$ โครงสร้างของสนามไฟฟ้าภายในวัสดุฐานรองและระหว่างองค์ประกอบที่แผ่กระจายคลื่นกับระนาบกราวด์จะแสดงดังรูปที่ 4.3 (a) ซึ่งจะเห็นว่าเฟสมีการเปลี่ยนแปลงตลอดช่วงความยาวของแผ่นสายอากาศ แต่จะมีค่าสม่ำเสมอตามแนวความกว้างของแผ่นสายอากาศ การเปลี่ยนแปลงของเฟสตามแนวความยาวนี้มีความจำเป็นสำหรับสายอากาศที่มีคุณสมบัติในการแผ่กระจายคลื่นไปทางด้านหน้า (Broadside)

การแผ่กระจายคลื่นของแต่ละร่องนั้นจะถูกสมมติให้เป็นไดโพลแม่เหล็ก ซึ่งมีความหนาแน่นกระแสเป็น M_s และหาค่าได้จากสมการ 4.18 โดยพิจารณาตามรูปที่ 4.5 ซึ่งจะมีความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กสมมูลตลอดทั้ง 2 ร่อง โดยแต่ละร่องมีความกว้าง W และสูง h ซึ่งมีขนาดและเฟสเดียวกัน ดังนั้นร่องทั้ง 2 นี้จะวางอยู่เป็นอาเรย์ขนาด 2 องค์ประกอบซึ่งมีแหล่งกำเนิด (Source) ที่มีขนาดและเฟสเดียวกัน และวางห่างจากกันด้วยระยะ L ดังนั้นแหล่งกำเนิดทั้งสองจะแผ่กระจายคลื่นไปรวมกันในทิศทางบรอดไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (a) ซึ่งเป็นแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของแต่ละร่องในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) ส่วนแบบรูปในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) ได้นำมาแสดงไว้ในรูปที่ 4.6(b)

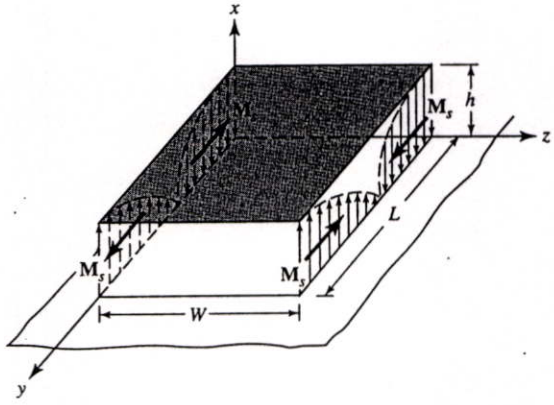


รูปที่ 4.5 ร่องสำหรับแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและกระแสแม่เหล็กสมมูล

ความหนาแน่นกระแสสมมูลสำหรับร่อง 2 ร่องแบบอื่น ๆ โดยที่แต่ละร่องยาว L และสูง h แสดงดังรูปที่ 4.7 ดังนั้นความหนาแน่นกระแสบนผนังแต่ละด้านจะมีขนาดเดียวกันแต่มีทิศทางตรงกันข้ามกัน สนามที่แผ่กระจายโดยร่องทั้งสองนี้ก็จะไปหักล้างกับสนามอื่น ๆ ในระนาบสนามแม่เหล็ก ดังนั้นเมื่อร่องที่อยู่ตรงข้ามกันจะมีเฟสแตกต่างกัน 180° ซึ่งจะไปหักล้างกับสนามอื่น ๆ ในระนาบสนามไฟฟ้าด้วย ดังจะได้แสดงในการวิเคราะห์ต่อไป การแผ่กระจายของสนามจากผนังทั้ง 2 ด้านนี้จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับผนังอีก 2 ด้านที่เหลือ ดังนั้นร่องทั้งสองเหล่านี้จึงเรียกว่า “ร่องที่ไม่มีการแผ่กระจาย”



รูปที่ 4.6 แบบรูปในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสำหรับแผ่นไมโครสตริปร่องเดี่ยวและทั้งสองร่อง



รูปที่ 4.7 ความหนาแน่นกระแสบนร่องที่ไม่มีการแผ่กระจายคลื่นสำหรับสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

เพื่อหาการแผ่กระจายของสนามจากแต่ละร่อง สนามรวมนั้นจะเป็นผลรวมจากอาเรย์ขนาด 2 องค์ประกอบ ซึ่งแต่ละองค์ประกอบถูกแทนด้วยร่อง ดังนั้นร่องเหล่านี้จึงมีลักษณะเป็นไปตามอุดมคติ และสามารถหาการแผ่กระจายของสนามได้โดยอาศัยอาเรย์แฟคเตอร์ (Array factor) สำหรับร่อง 2 ร่อง

ร่องการแผ่กระจายคลื่น การแผ่กระจายของสนามไฟฟ้าในระยะไกลจากแต่ละร่องสามารถหาได้โดยอาศัยความหนาแน่นกระแสสมมูลจากสมการ 4.18 สามารถเขียนได้ว่า

$$E_r \approx E_\theta \approx 0 \tag{4.20a}$$

$$E_\phi = -j\frac{k_o hWE_o e^{-jk_o r}}{\pi r}\left\{\sin\theta\frac{\sin(X)}{X}\frac{\sin(Z)}{Z}\right\} \tag{4.20b}$$

โดยที่

$$X = \frac{k_o h}{2}\sin\theta\cos\phi \tag{4.20c}$$

$$Z = \frac{k_o W}{2}\cos\theta \tag{4.20d}$$

กรณีที่ความสูงของวัสดุฐานรองมีค่าน้อยมากๆ $(k_o h << 1)$ สมการ 4.20b จะลดลงเหลือ

$$E_\phi = -j\frac{2V_o e^{-jk_o r}}{\pi r}\left\{\sin\theta\frac{\sin\left(\frac{k_o W}{2}\cos\theta\right)}{\cos\theta}\right\} \tag{4.21}$$

โดยที่ $V_o = hE_o$

ตามทฤษฎีเรื่องของอาเรย์แฟคเตอร์สำหรับกรณี 2 องค์ประกอบที่มีขนาดและเฟสเดียวกัน วางห่างกันด้วยระยะทาง L_e ตามทิศทางแกน y

$$(AF)_y = 2\cos\left(\frac{k_o L_e}{2}\sin\theta\sin\phi\right) \tag{4.22}$$

โดยที่ L_e เป็นค่าความยาวประสิทธิผลตามสมการ 4.3 ดังนั้นสนามไฟฟ้ารวมสำหรับร่องทั้งสอง (สำหรับสายอากาศไมโครสตริป) คือ

$$E_\phi = -j\frac{2k_o hWE_o e^{-jk_o r}}{\pi r}\left\{\sin\theta\frac{\sin(X)}{X}\frac{\sin(Z)}{Z}\right\}\cos\left(\frac{k_o L_e}{2}\sin\theta\sin\phi\right) \tag{4.23}$$

โดยที่

$$X = \frac{k_o h}{2}\sin\theta\cos\phi \tag{4.23a}$$

$$Z = \frac{k_o W}{2}\cos\theta \tag{4.23b}$$

สำหรับกรณีที่ h มีค่าน้อยมาก ๆ $(k_o h << 1)$ สมการ 4.23 จะลดลงเป็น

$$E_\phi \approx -j\frac{4V_o e^{-jk_o r}}{\pi r}\left\{\sin\theta\frac{\sin\left(\frac{k_o W}{2}\cos\theta\right)}{\cos\theta}\right\}\cos\left(\frac{k_o L_e}{2}\sin\theta\sin\phi\right) \tag{4.24}$$

โดยที่ $V_o = hE_o$ เป็นแรงดันตกคร่อมระหว่างร่อง

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

$$E_\phi = -j\frac{2k_oWV_oe^{-jk_or}}{\pi r}\left\{\frac{\sin\left(\frac{k_oh}{2}\cos\phi\right)}{\frac{k_oh}{2}\cos\phi}\right\}\cos\left(\frac{k_oL_e}{2}\sin\phi\right) \tag{4.25}$$

ระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศไมโครสตริปคือระนาบ x-z $(\phi = 0°, 0° \le \theta \le 180°)$ และสมการสำหรับการแผ่กระจายของสนามตามสมการ 4.23 – 4.23b จะลดลงเป็น

$$E_\phi = -j\frac{2k_oWV_oe^{-jk_or}}{\pi r}\left\{\sin\theta\frac{\sin\left(\frac{k_oh}{2}\sin\theta\right)}{\frac{k_oh}{2}\sin\theta}\frac{\sin\left(\frac{k_oW}{2}\cos\theta\right)}{\frac{k_oW}{2}\cos\theta}\right\} \tag{4.26}$$

การแผ่กระจายของสนามด้วยร่องที่เราเรียกว่าร่องที่ไม่มีการแผ่กระจายคลื่น ความยาวประสิทธิผล L_e และความสูง h ของแต่ละร่องสามารถหาได้โดยใช้วิธีการเดียวกับร่องที่มีการแผ่กระจายคลื่น โดยอาศัยสนามที่ได้จากสมการ 4.19 ความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กสมมูลของร่องที่ไม่มีการแผ่กระจายคลื่นที่วางบนแกน z คือ

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

และได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.7 ส่วนอีกร่องหนึ่งจะวางอยู่บนระนาบ $-z$ อาศัยขั้นตอนเดียวกับร่องที่มีการแผ่กระจายคลื่น องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าระยะไกลที่แผ่กระจายออกมาโดยแต่ละร่องสามารถหาได้จาก

$$E_\theta = j\frac{k_ohL_eE_oe^{-jk_or}}{4\pi r}\left\{\cos\phi\frac{\sin(X)}{X}\frac{\cos Y}{(Y)^2-(\pi/2)^2}\right\} \tag{4.28a}$$

$$E_\phi = -\frac{k_ohL_eE_oe^{-jk_or}}{4\pi r}\left\{\cos\theta\sin\phi\frac{\sin X}{X}\frac{\cos Y}{(Y)^2-(\pi/2)^2}\right\} \tag{4.28b}$$

โดยที่

$$X = \frac{k_oh}{2}\sin\theta\cos\phi \tag{4.28c}$$

$$Y = \frac{k_oL_e}{2}\sin\theta\sin\phi \tag{4.28d}$$

เมื่อร่องทั้งสองนี้จะเป็นอาเรย์ขนาด 2 องค์ประกอบ ซึ่งมีขนาดเดียวกันแต่มีเฟสตรงกันข้าม วางแยกออกจากกันในแกน z ด้วยระยะทาง W จะได้อาเรย์แฟคเตอร์เป็น

$$(AF)_z = 2j\sin\left(\frac{k_oW}{2}\cos\theta\right) \tag{4.29}$$

ดังนั้นสนามไฟฟ้ารวมในระยะไกลจะเป็นผลคูณของสมการ 4.28a และ 4.28b กับอาเรย์แฟคเตอร์ตามสมการ 4.29

ในระนาบสนามไฟฟ้า ($\theta = 90°, 0° \le \phi \le 90°$ และ $270° \le \phi \le 360°$) สมการ 4.28a และ 4.28b จะมีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากสนามที่แผ่กระจายไปหนึ่งส่วนสี่รอบของแต่ละร่องจะถูกหักล้างจากสนามที่แผ่กระจายจากหนึ่งส่วนสี่รอบจากที่อื่น ๆ และในลักษณะเดียวกันในระนาบสนามแม่เหล็ก ($\phi = 0°, 0° \le \theta \le 180°$) สนามรวมจะมีค่าเป็นศูนย์เพราะว่าสมการ 4.29 ไม่มีค่า ดังนั้นแสดงว่าสนามที่แผ่กระจายจากแต่ละร่องจะถูกหักล้างโดยสนามที่แผ่กระจายจากร่องอื่น ๆ การที่ร่องทั้งสองไม่สามารถแผ่กระจายคลื่นได้ในระนาบหลักนั้นได้กล่าวไว้แล้วในตอนต้นและได้แสดงความหนาแน่นของกระแสไว้ในรูปที่ 4.7

4.3 การวิเคราะห์ด้วยวิธีโมเมนต์

โครงสร้างของสายไมโครสตริปและวัสดุฐานรองบนระนาบสร้างเงาตัวนำสมบูรณ์แสดงดังรูปที่ 4.8 สมมติให้ไมโครสตริปถูกกำหนดด้วยพื้นผิว S บนระนาบ x-y ที่ตำแหน่ง $z = z'$ เมื่อ $z' \le d$ การแก้ปัญหาเชิงเลข (Numerical Solution) ของสายอากาศไมโครสตริปที่ใช้วิธีโมเมนต์ทั่วไปเป็นวิธี Galarkin ซึ่งได้กำหนดฟังก์ชันมาตราฐาน (Basis Function) และฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก (weighting function) ปัญหานี้สามารถกำหนดโดยควอไซกรีนฟังก์ชัน (quasi-Green's function) [7]

4.3.1 ควอไซกรีนฟังก์ชัน

ในกระแสแม่เหล็กที่หายไปนั้น สนามที่แผ่กระจายในขอบเขตที่ 1 และขอบเขตที่ 2 เกิดขึ้นจากกระแสเชิงพื้นผิว J_s บนแผ่นสายอากาศถูกกำหนดโดยสมการ

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

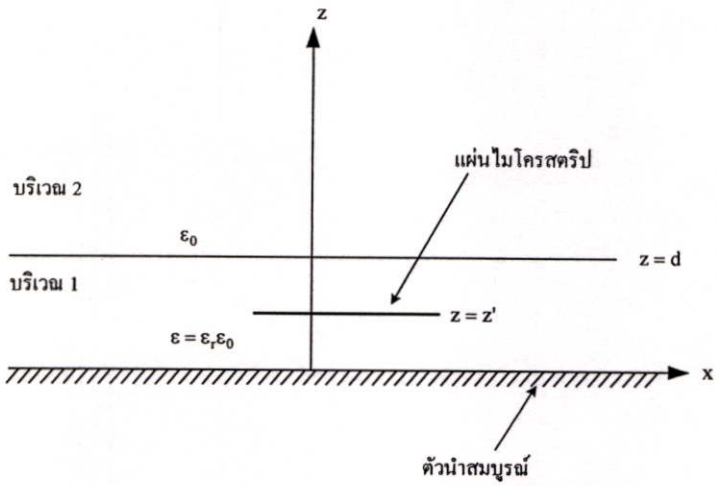
$$E = -j\omega A + \frac{1}{j\omega\varepsilon\mu} \nabla(\nabla \cdot A)$$

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

กระแสของแหล่งกำเนิด J_i คือแหล่งกำเนิดที่สร้าง J_s และคือกระแสไฟฟ้าบนสายส่งไมโครสตริป ซึ่งถูกกำหนดโดย

$$J_i = I_0 \Psi \qquad (4.31)$$

สำหรับสายส่งแบบไมโครสตริป เราจะได้



รูปที่ 4.8 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปและวัสดุฐานรอง

$$\Psi = \hat{z}(w_1 z')^{-1/2} \tag{4.32}$$

เมื่อ w_1 เป็นความกว้างประสิทธิผลของสายส่ง สำหรับวัสดุฐานรองบางได้มีการประมาณ w_1 เป็น $w_1 = w + 2z'$ เมื่อ w เป็นความกว้างของสายส่งไมโครสตริปที่ป้อนสู่แผ่นสายอากาศ

ในขอบเขตที่ 1 เรากำหนดจากสมการ 4.30

$$A = A^1 \qquad ; k = k_0(\varepsilon_r)^{1/2} \tag{4.33}$$

ในขอบเขตที่ 2 จะได้

$$A = A^2 \qquad ; k = k_0 \tag{4.34}$$

ศักย์เวคเตอร์ A^1 และ A^2 สำหรับขอบเขตที่ 1 และ 2 ตามลำดับ สามารถแสดงโดยศักย์เวคเตอร์ควอไซกรีนฟังก์ชัน $\overline{G}_A^1$ และ $\overline{G}_A^2$ ตามลำดับ จะได้

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

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

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

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

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

โดยขึ้นอยู่กับเงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสมสำหรับแต่ละขอบเขต

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

$$\widetilde{E}_t^1\left(k_x,k_y,0\right)=0 \tag{4.38}$$

$$\widetilde{E}_t^1\left(k_x,k_y,d\right)=\widetilde{E}_t^2\left(k_x,k_y,d\right) \tag{4.39}$$

$$\widetilde{H}_t^1\left(k_x,k_y,d\right)=\widetilde{H}_t^2\left(k_x,k_y,d\right) \tag{4.40}$$

ศักย์เวคเตอร์ของกรีนฟังก์ชันสำหรับขอบเขตที่ 1 และ 2 หาได้จากการใช้การแปลงฟูเรียร์ผกผัน (inverse Fourier transform) ของ $\overline{G}_A^1$ และ $\overline{G}_A^2$ สำหรับขอบเขตไดอิเล็กตริก จะได้

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

เมื่อ

$$G_a\left(k_x,k_y,z,z'\right)=-\frac{e^{-jk_{z1}(z-z')}-e^{-jk_{z1}|z-z'|}}{2jk_{z1}}+\frac{\sin\left(k_{z1}z\right)}{k_{z1}T_e}\left\{k_{z1}\cos\left[k_{z1}\left(d-z'\right)\right]+jk_{z2}\sin\left[k_{z1}\left(d-z'\right)\right]\right\}$$

$$G_b\left(k_x,k_y,z,z'\right)=\frac{\left(\varepsilon_r-1\right)\sin\left(k_{z1}z'\right)\cos\left(k_{z1}z\right)}{T_eT_m}$$

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

$$T_m=\varepsilon_rk_{z2}\cos\left(k_{z1}d\right)+jk_{z1}\sin\left(k_{z1}d\right)$$

ในสมการที่กล่าวมาข้างต้น

$$k_{z1}=\begin{cases}\left(\varepsilon_rk_0^2-k_t^2\right)^{1/2} & ;k_t^2\le\varepsilon_rk_0^2\\ -j\left(k_t^2-\varepsilon_rk_0^2\right)^{1/2} & ;\text{otherwise}\end{cases} \tag{4.42}$$

$$k_{z2}=\begin{cases}\left(k_0^2-k_t^2\right)^{1/2} & ;k_t^2\le k_0^2\\ -j\left(k_t^2-k_0^2\right)^{1/2} & ;\text{othewise}\end{cases} \tag{4.43}$$

เมื่อ $k_t^2=k_x^2+k_y^2$

4.4 การสูญเสียในวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ

คุณสมบัติของวัสดุฐานรองของสายอากาศนั้นนับว่าเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อคุณสมบัติโดยรวมของสายอากาศ หากวัสดุฐานรองที่ใช้สร้างสายอากาศแบบไมโครสตริปมีการสูญเสีย (Loss) ในวัสดุฐานรองมากจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศด้อยลง ดังนั้นคุณสมบัติของวัสดุฐานรองจึงเป็นประเด็นหนึ่งที่จะต้องพิจารณาเพื่อความเหมาะสม ในวิทยานิพนธ์นี้จะได้พิจารณาสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปที่มีการรีโซแนนท์อยู่ในโมด TM_{100} โดยการวิเคราะห์แบบจำลองคาวิตี้ซึ่งองค์ประกอบค่า Q รวมของแผ่นสายอากาศนั้นจะประกอบด้วย

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

$$\frac{1}{Q_0} = \frac{1}{Q_r} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} \tag{4.44}$$

และสามารถเขียนความสัมพันธ์ของ Q_0 และประสิทธิภาพ η ได้ว่า

$$\eta = \frac{Q_0}{Q_r} \tag{4.45}$$

โดยที่

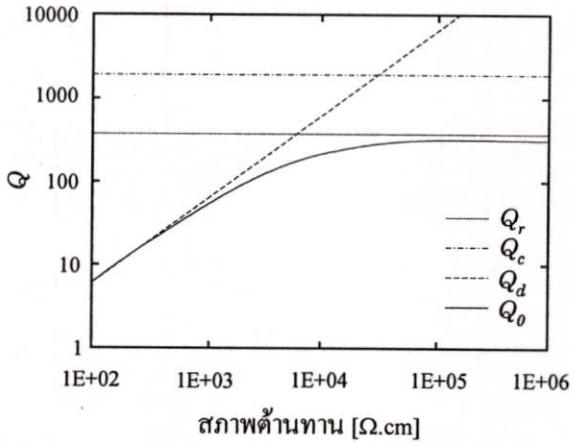
$$Q_r = \frac{3}{8}\varepsilon_r \frac{\lambda_0}{h}$$

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

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

เมื่อ ε_r, h และ $\tan\delta$ เป็นค่าคงตัววัสดุฐานรอง, ความหนาของวัสดุฐานรอง และแทนเจนต์การสูญเสียของวัสดุฐานรอง ตามลำดับ ส่วน δ_s เป็นความหนาของแผ่นตัวนำ

การเปลี่ยนแปลงของ Q_d และ Q_0 เปรียบเทียบกับสภาพความต้านทาน (ρ) ของวัสดุฐานรอง แสดงดังรูปที่ 4.9 สังเกตเห็นได้ว่าเส้นโค้งของค่า Q_r และ Q_d ตัดกันที่ตำแหน่ง $\rho_{th} = 5\times10^3$ [Ω·cm] โดยที่ Q_d จะมีความสำคัญเมื่อ $\rho < \rho_{th}$ และทำให้คุณสมบัติของสายอากาศด้อยลง แต่ถ้า $\rho > \rho_{th}$ จะทำให้ความสูญเสียในวัสดุฐานรองลดน้อยลง ซึ่งทำให้ได้สายอากาศที่มีคุณสมบัติโดยรวมดีขึ้นตามไปด้วย

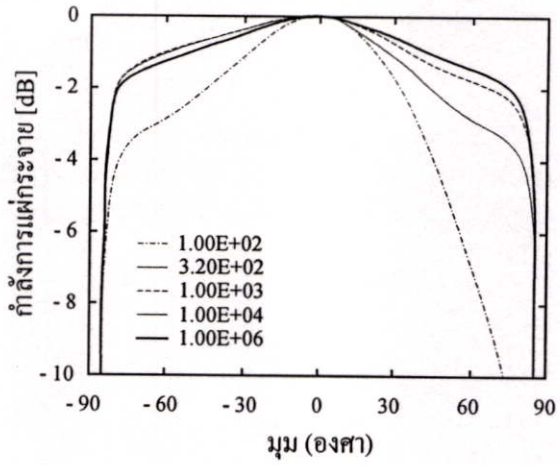


รูปที่ 4.9 องค์ประกอบ Q เปรียบเทียบกับสภาพความต้านทานของวัสดุฐานรอง

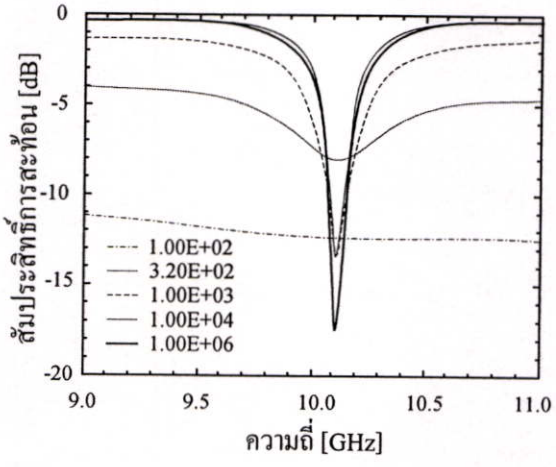
4.5 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่น

เนื่องจากวัสดุฐานรองที่มีค่าความต้านทานและค่าการสูญเสียที่แตกต่างกันนั้น จะมีผลต่อแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นโดยตรง ดังนั้นการวิเคราะห์ถึงแบบรูปการแผ่กระจายที่ได้จากการสร้างสายอากาศแผ่นแบบโมโนลิตริกบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ จึงเป็นสิ่งที่ใช้ในการพิสูจน์ถึงการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศว่ามีประสิทธิภาพแตกต่างจากการสร้างบนวัสดุฐานรองที่เป็นฉนวนแบบอื่นอย่างไร โดยในการวิเคราะห์หาแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นนี้ได้อาศัยคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์ โดยใช้โปรแกรม Ensamble ของบริษัท Ansoft เพื่อหาคุณลักษณะของสายอากาศ เช่น แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นตลอดจนการเนื่องจากการสะท้อนกลับ ซึ่งโปรแกรมนี้ได้อาศัยการวิเคราะห์ด้วยวิธีโมเมนต์ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนต้น โดยสายอากาศที่สร้างขึ้นนั้นทำงานอยู่ในโมด TM_{100}

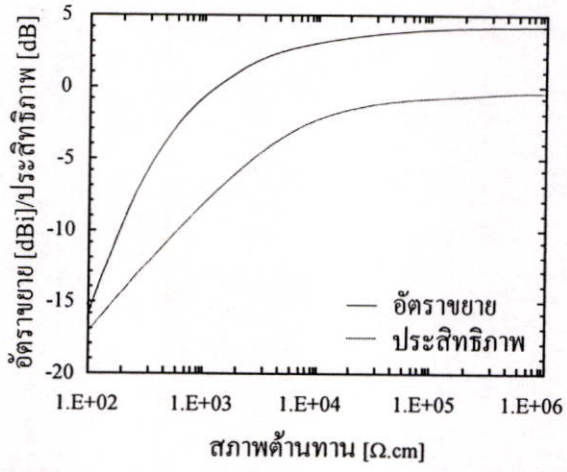
จากการเลียนแบบจะได้แบบรูปการแผ่กระจายสนามไฟฟ้าที่ค่า ρ ต่าง ๆ กัน แสดงดังรูปที่ 4.10 สมมติให้ระนาบกราวด์มีขนาดใหญ่มาก เมื่อสภาพความต้านทานมีค่าต่ำกว่า 10^3 [$\Omega \cdot$cm] แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่ได้จะไม่สมมาตร เพราะว่าความบริสุทธิ์ของโมดรีโซแนนท์ลดลง เนื่องจากการลดลงขององค์ประกอบ Q แบนด์วิดธ์ของสัมประสิทธิ์สะท้อนกลับจะเพิ่มขึ้นตามการลดลงของสภาพความต้านทานดังได้แสดงในรูปที่ 4.11 และอัตราขยายของสายอากาศเทียบกับค่าสภาพความต้านทานได้แสดงในรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่า อัตราขยายจะลดลงเมื่อ ρ น้อยกว่า 10^4 [$\Omega \cdot$cm] และในรูปเดียวกันยังได้แสดงถึงประสิทธิภาพการแผ่กระจาย η ซึ่งได้คำนวณโดยใช้แบบจำลองคาวิตี้อีกด้วย



รูปที่ 4.10 แบบรูปการแผ่กระจายสนามไฟฟ้าบนวัสดุฐานรองที่ ρ ต่างกัน



รูปที่ 4.11 สัมประสิทธิ์การสะท้อนบนวัสดุฐานรองที่ ρ ต่างกัน



รูปที่ 4.12 อัตราขยายของสายอากาศและประสิทธิภาพเทียบกับสภาพความต้านทาน

4.6 ขั้นตอนการออกแบบ

ในหัวข้อนี้เราจะมาพิจารณากันถึงขั้นตอนการออกแบบตลอดจนวิธีการออกแบบสายอากาศแบบไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งเป็นแบบที่ง่ายที่สุดสำหรับการออกแบบสายอากาศในลักษณะนี้ เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ต้องการชี้ให้เห็นถึงคุณสมบัติของวัสดุฐานรองที่มีความเหมาะสม สำหรับการออกแบบได้อาศัยคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ โดยได้ใช้โปรแกรมโมเมนตัมของ (HP EEsof) แต่อย่างไรก็ตามผู้ออกแบบยังคงต้องป้อนค่าเริ่มต้นให้กับคอมพิวเตอร์ก่อน ค่าที่ป้อนให้นี้จะถูกใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการเลียนแบบ (Simulate) ซึ่งผู้ออกแบบเป็นผู้กำหนดคุณสมบัติต่างๆ ของสายอากาศที่ต้องการ เช่น ความถี่รีโซแนนท์ อินพุตอิมพีแดนซ์ ขนาดของสายอากาศ แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นฯลฯ โดยอาศัยค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบดังนี้

ออกแบบที่ความถี่ $f_r = 10\,GHz$

สภาพยอมสัมพัทธ์ $\varepsilon_r = 11.8$

ความหนาของวัสดุฐานรอง $h = 0.38$ mm.

ความหนาของแผ่นตัวนำ $t = 0.2\times10^{-3}$ mm.

สภาพความนำ $\sigma = 4.513\times10^{7}$ S/m

เมื่อนำพารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านี้มาใช้เป็นค่าเริ่มต้นให้กับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยในส่วนของขั้นตอนการออกแบบแสดงได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การออกแบบในส่วนของสายอากาศแผ่น (Patch Antenna Part) โดยใช้โปรแกรมโมเมนตัมกำหนด พารามิเตอร์ต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.13

1. คำนวณค่า

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \tag{4.46}$$

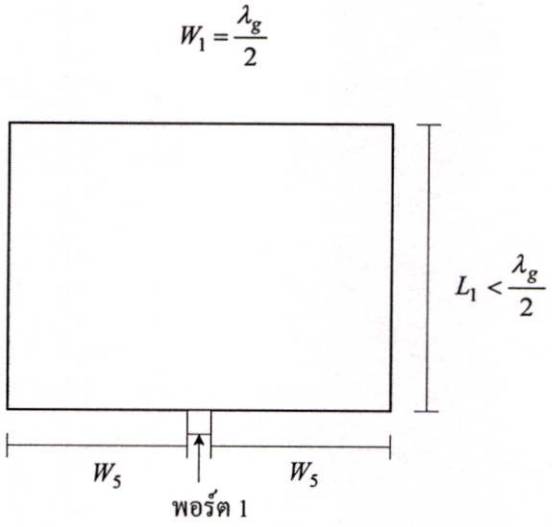
โดยที่

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

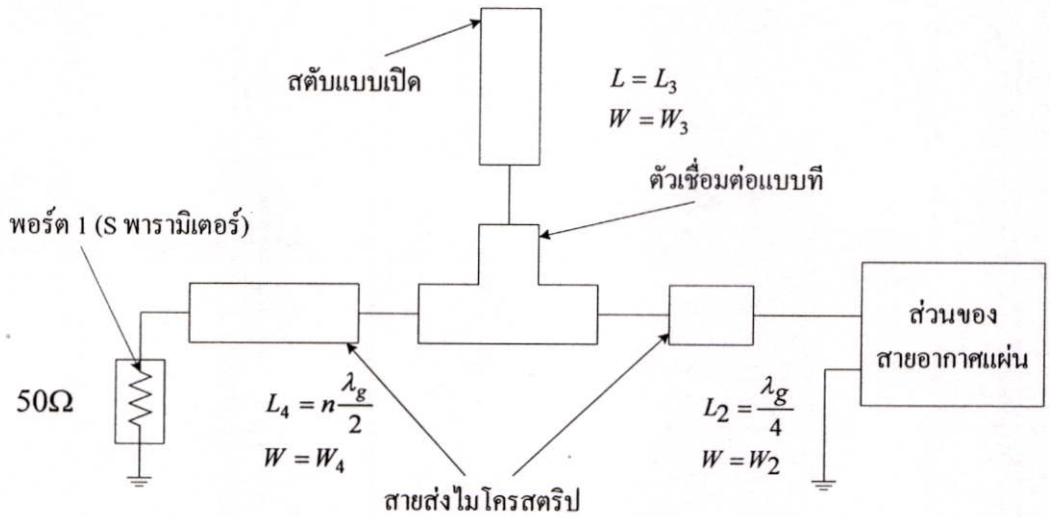
$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r+1}{2} + \frac{\varepsilon_r-1}{2}\left(1+2\frac{h}{w0}\right)^{-\frac{1}{2}}$$

2. กำหนดค่าขนาดของแพ็ทช์โดยให้ $W_1 = \frac{\lambda_g}{2}$ และ $L_1 < \frac{\lambda_g}{2}$
3. ใส่พอร์ต ณ บริเวณตรงกลางขอบล่างของแพ็ทช์โดยให้เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $\frac{W_1}{100}$
4. ทำการจำลอง (Simulate) โดยใช้โปรแกรมโมเมนตัม
5. คำนวณค่า Z_{in} จาก S-Parameter, S_{11} โดย $Z_{in} = \frac{1+S_{11}}{(1-S_{11})*50}$

6. แยกค่า Z_{in} ออกเป็นส่วนของค่าจริงและส่วนของค่าจินตภาพ คือ Real(Z_{in}) และ 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 ค่าใหม่นี้ ใช้ได้



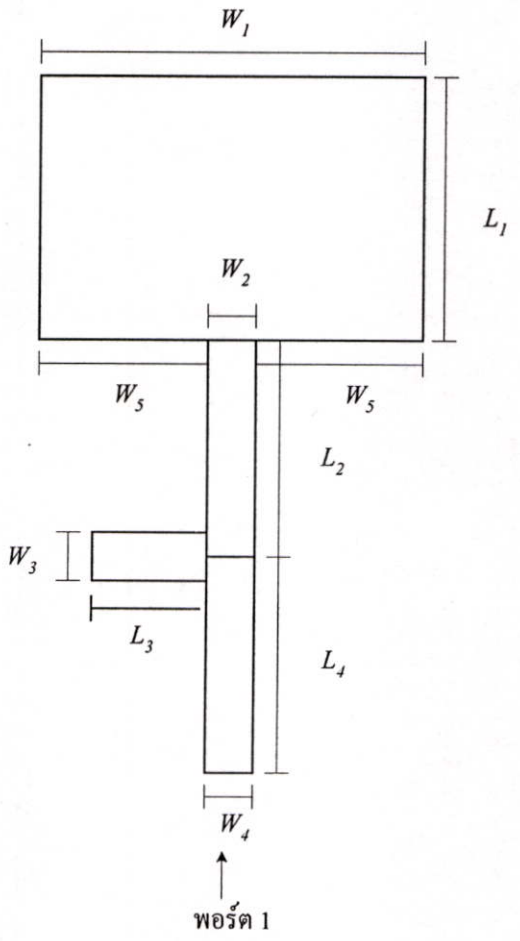
รูปที่ 4.13 โครงสร้างของสายอากาศแผ่น



รูปที่ 4.14 โครงสร้างในส่วนของแมตซ์ชิ่ง

ขั้นตอนที่ 2 การออกแบบในส่วนของแมตซ์ชิ่ง (Matching Part) จากรูปที่ 4.14 โดยใช้โปรแกรม MDS

1. ใส่ข้อมูลทั้งหมดที่จำเป็นให้กับโปรแกรม MDS
2. คำนวณความกว้าง W ที่ $Z = 50$ โอห์ม โดยแทนค่า $W=W_2=W_3=W_4$
3. ทำการคำนวณ และทดลองปรับค่า L_3 จนกว่า Real (Z_{in}) จะมีค่าเข้าใกล้ 50 Ω และ Img(Z_{in}) มีค่าเข้าใกล้ 0 โดย $Z_{in} = \frac{1+S_{11}}{(1-S_{11})\times 50}$

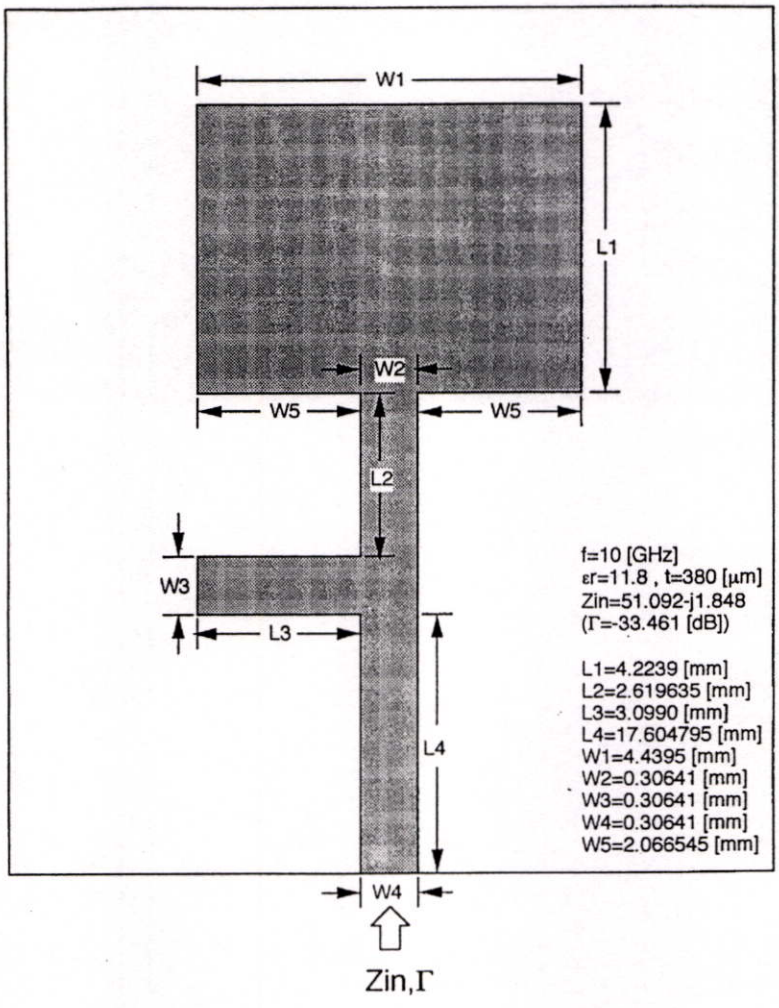


รูปที่ 4.15 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศเมื่อนำสายอากาศแผ่นมารวมเข้ากับวงจรในส่วนของแมตซ์ชิ่งเรียบร้อยแล้ว

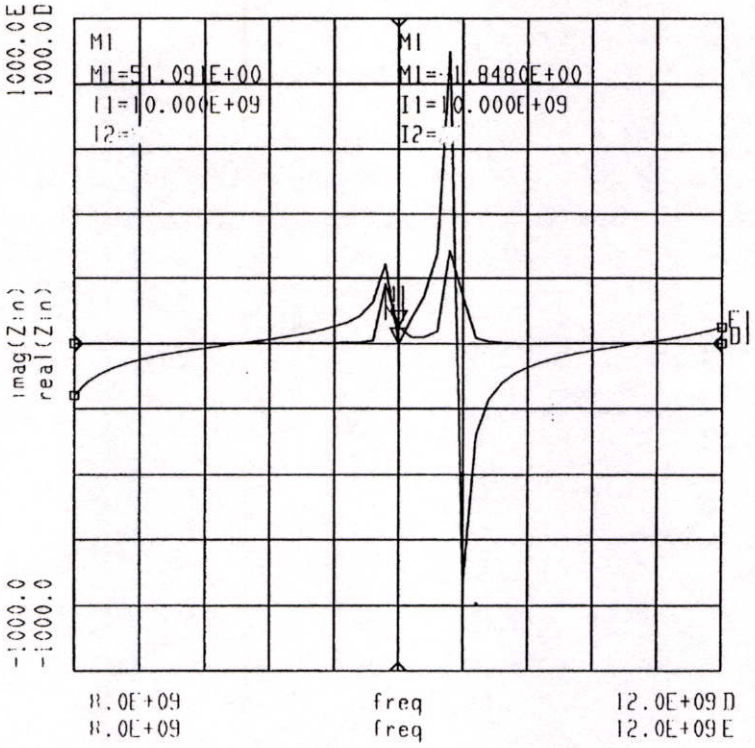
ขั้นตอนที่ 3 การออกแบบรวมส่วนของสายอากาศแผ่นเข้ากับส่วนของแมตซ์ชิ่ง แสดงดังรูปที่ 4.15 โดยใช้โปรแกรมโมเมนตัม

1. นำส่วนของวงจรแมตซ์ชิ่งที่ออกแบบโดยโปรแกรม MDS มาใส่รวมกับ Layout เดียวกันกับส่วนของสายอากาศแผ่น บนโปรแกรมโมเมนตัม

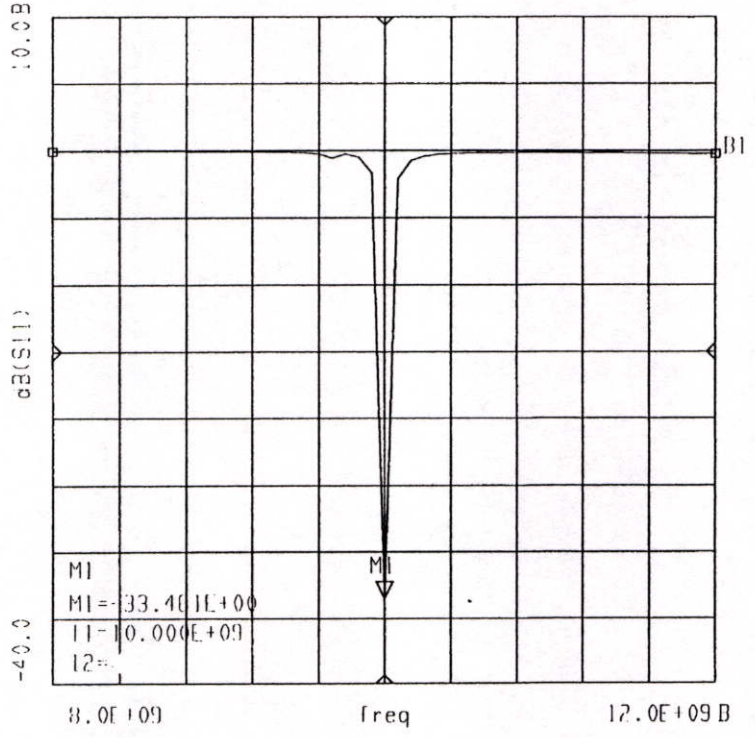
2. กำหนด Port 1 ที่จุดเริ่มต้นของสายป้อนสัญญาณ
3. ทำการจำลองโดยใช้โปรแกรมโมเมนตัม
4. คำนวณค่าอินพุตอิมพีแดนซ์จากค่า S_{11} และตรวจสอบส่วนจริง Real(Z_{in}) ว่ายังคงมีค่าใกล้เคียง 50 โอห์ม และส่วนจินตภาพ Img(Z_{in}) มีค่าเข้าใกล้ 0 อยู่หรือไม่ ถ้าไม่ให้ปรับค่า L_3 แล้วเริ่มต้นใหม่ โดยค่าขนาดของ S_{11}, $\Gamma(S_{11})$ ที่ใช้ได้คือ $\Gamma(S_{11})$ = -20dB



รูปที่ 4.16 ขนาดของสายอากาศและส่วนแมตซ์ชิ่งหลังการออกแบบเรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตอิมพีแดนซ์กับความถี่



รูปที่ 4.18 S_{11} ที่ได้จากโปรแกรมโมเมนตัม

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตอิมพีแดนซ์ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับและความถี่

Frequency	Real(Zin)	Img(Zin)	dB(S_{11})
8.000 e+09	1.397	-158.450	-0.044
8.080 e+09	0.826	-117.555	-0.044
8.160 e+09	0.557	-91.706	-0.044
8.240 e+09	0.411	-73.584	-0.045
8.320 e+09	0.324	-59.936	-0.046
8.400 e+09	0.268	-49.170	-0.047
8.480 e+09	0.220	-40.168	-0.047
8.560 e+09	0.199	-32.452	-0.049
8.640 e+09	0.187	-25.631	-0.051
8.720 e+09	0.180	-19.439	-0.054
8.800 e+09	0.178	-13.680	-0.058
8.880 e+09	0.181	-8.203	-0.061
8.960 e+09	0.185	-2.880	-0.064
9.040 e+09	0.199	2.405	-0.069
9.120 e+09	0.219	7.770	-0.074
9.20 e+09	0.249	13.338	-0.081
9.280 e+09	0.294	19.263	-0.089
9.360 e+09	0.265	25.742	-0.100
9.440 e+09	0.488	33.067	-0.118
9.520 e+09	0.756	41.686	-0.155
9.600 e+09	1.532	52.494	-0.253
9.680 e+09	4.269	64.002	-0.561
9.760 e+09	2.755	48.735	-0.247
9.840 e+09	10.327	126.777	-0.481
9.920 e+09	182.496	243.704	-1.686
10.00 e+09	51.092	-1.848	-33.461
10.08 e+09	20.398	75.205	-2.107
10.16 e+09	19.761	144.252	-0.726
10.24 e+09	36.942	275.346	-0.403

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

Frequency	Real(Zin)	Img(Zin)	dB(S_{11})
10.22 e+09	285.765	897.304	-0.279
10.40 e+09	145.077	-742.208	-0.219
10.48 e+09	17.612	-281.538	-0.186
10.56 e+09	6.155	-171.743	-0.167
10.64 e+09	3.090	-121.619	-0.155
10.72 e+09	1.831	-92.214	-0.145
10.80 e+09	1.253	-72.446	-0.140
10.88 e+09	0.937	-57.904	-0.139
10.96 e+09	0.749	-46.497	-0.140
11.04 e+09	0.633	-27.094	-0.142
11.12 e+09	0.560	-29.021	-0.145
11.20 e+09	0.514	-21.844	-0.150
11.28 e+09	0.489	-15.264	-0.155
11.36 e+09	0.479	-9.055	-0.161
11.44 e+09	0.475	-3.039	-0.164
11.52 e+09	0.496	2.953	-0.172
11.60 e+09	0.532	9.086	-0.179
11.68 e+09	0.586	15.542	-0.186
11.76 e+09	0.666	22.547	-0.192
11.84 e+09	0.782	30.408	-0.198
11.92 e+09	0.954	39.577	-0.204
12.00 e+09	1.222	50.772	-0.209

4.7 สรุป

จากการวิเคราะห์โดยวิธีแบบจำลองคาวิตี้ และวิธีโมเมนต์ในหัวข้อที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติของวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ ซึ่งจากการวิเคราะห์ถ้ามีค่าสภาพความต้านทาน (ρ) ที่มากกว่า 10^4 [Ω·cm] จะทำให้ลดการสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในวัสดุฐานรอง และนอกจากนี้ยังจะทำให้ได้แบบรูปของสายอากาศแบบไมโครสตริปที่สมมาตรถูกต้องตามทฤษฎี จากผลที่

ได้จากการเลียนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำนี้ได้นำเสนอนี้สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุฐานรองสำหรับสายอากาศที่มีโครงสร้างแบบระนาบได้เป็นอย่างดี และเหมาะสมและในอนาคตอันใกล้นี้การที่จะรวมสายอากาศที่มีลักษณะโครงสร้างแบบระนาบเข้ากับอุปกรณ์แอกทีฟเป็นไปได้อย่างแน่นอน

บทที่ 5
กระบวนการสร้างสายอากาศ

จากที่ได้ศึกษาคุณสมบัติและโครงสร้างของสายอากาศบนวัสดุฐานรองต่าง ๆ ตลอดจนศึกษาถึงการวิเคราะห์และหลักการออกแบบโดยใช้พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่สำคัญของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป ดังที่ได้กล่าวในบทที่ 2, 3 และ 4 เพื่อที่สามารถสร้างสายอากาศให้มีประสิทธิภาพสูงจึงได้นำเสนอวัสดุฐานรองใหม่ ซึ่งฐานรองที่ใช้เป็นวัสดุฐานรองใหม่นี้เป็นสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดเอ็น ที่ถูกเติมด้วยอะตอมทองคำ จะแสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ยังเป็นผลทำให้สภาพความต้านทานเปลี่ยนแปลงไปด้วย [8]

กระบวนการสร้างของสายอากาศในวิทยานิพนธ์นี้เป็นกระบวนการสร้างที่ง่ายแบบทั่วไปทางด้านเซมิคอนดัคเตอร์ โดยทำที่อุณหภูมิสูง ซึ่งขั้นตอนการสร้างได้แสดงในแผนภูมิรูปที่ 5.1

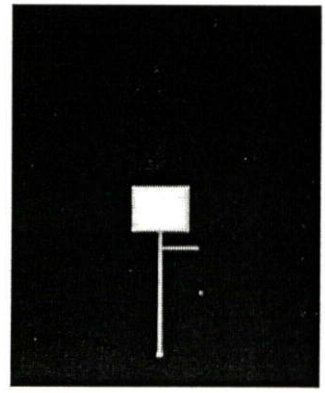
กระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำส่วนใหญ่จะเป็นกระบวนการสร้างในแนวระนาบ (Planar Process) ซึ่งรวมถึงสายอากาศระนาบด้วย กระบวนการสร้างในแนวระนาบได้เริ่มต้นสร้างตั้งแต่ปี ค.ศ. 1959 ด้วยจุดเด่นของกระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำแบบนี้เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการสร้างในยุคต้นๆ เช่น วิธีการอัลลอยด์เป็นต้น พบว่ากระบวนการสร้างในแนวระนาบมีข้อได้เปรียบสำหรับสร้างเป็นวงจรรวมคือ รอยต่อของสารกึ่งตัวนำจะถูกคลุมด้วยชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งป้องกันไม่ให้รอยต่อทำปฏิกริยาโดยตรงกับอากาศหรือสิ่งเจือปนชนิดอื่นๆ เป็นผลให้เกิดกระแสรั่วไหลต่ำมาก ดังนั้นอุปกรณ์จึงมีความเชื่อถือได้สูง (High Reliability) และการออกแบบต้นแบบ และเทคนิคการจำกัดซึ่งใช้ในการกำหนดโครงสร้างซึ่งจะทำให้สามารถลดขนาดได้เล็กลง และสะดวกในการสร้างอุปกรณ์จำนวนมากๆได้พร้อมกันบนแผ่นผลึกซิลิคอนเดียวกัน

5.1 กระบวนการสร้างของสายอากาศ

5.1.1 ขั้นตอนทำกระจกต้นแบบ

หลังจากที่ได้ออกแบบวงจรเรียบร้อยบนกระดาษกราฟ จากนั้นก็จะนำมาเป็นต้นแบบในการตัดแผ่นพลาสติก ลามีเนต ประกอบด้วยไมลาร์ชีทเคลือบพลาสติกสีแดง เครื่องตัดนั้นเรียกว่าไมโครพล็อตเตอร์ เป็นใบมีดเลื่อนตัดได้ 2 แกน มีความละเอียดถึง 0.1 μm ไปตำแหน่งที่ต้องการตัด แล้วทำการตัดตามข้อมูลที่เก็บไว้โดยจะตัดลอกเฉพาะพลาสติกสีแดงออกเหลือเป็นแผ่นไมลาร์ใส เมื่อได้ต้นแบบบนแผ่นไมลาร์แล้ว จากนั้นนำมาเข้าเครื่องถ่ายย่อส่วน หากต้องการย่อส่วนลงมาก ๆ เช่น 200 เท่า เราก็จะใช้วิธีย่อส่วน 2 ครั้ง ครั้งแรกย่อต้นฉบับลง 20 เท่าลงบนฟิล์มกระจก

(Phosphosillicate glass) จากนั้นนำฟิล์มกระจกไปย่อซ้ำอีก 10 เท่า จะได้การถ่ายย่อส่วน 200 เท่า นำไปพิมพ์ลวดลายลงบนแผ่นกระจกเรียบ เมื่อใช้เป็น Photomask กล้องถ่ายย่อส่วนเรียกว่า Step-and Repeat Camera ใช้เวลาในการถ่าย 10-30 วินาที จากนั้นนำมาแช่น้ำยา Developer อีก $1\frac{1}{2}$ นาที ล้างน้ำแล้วแช่ Fixer อีก 3 นาที เอาไปเป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน (N_2) เป็นการจบขั้นตอนการออกแบบ และถ่ายมาส์คพร้อมที่จะนำไปใช้ในการถ่ายต้นแบบวงจรในกระบวนการโฟโต้ลิโทกราฟฟีได้



รูปที่ 5.1 กระจกมาส์ค

5.1.2 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นซิลิคอน

5.1.2.1 เช็คคุณสมบัติ

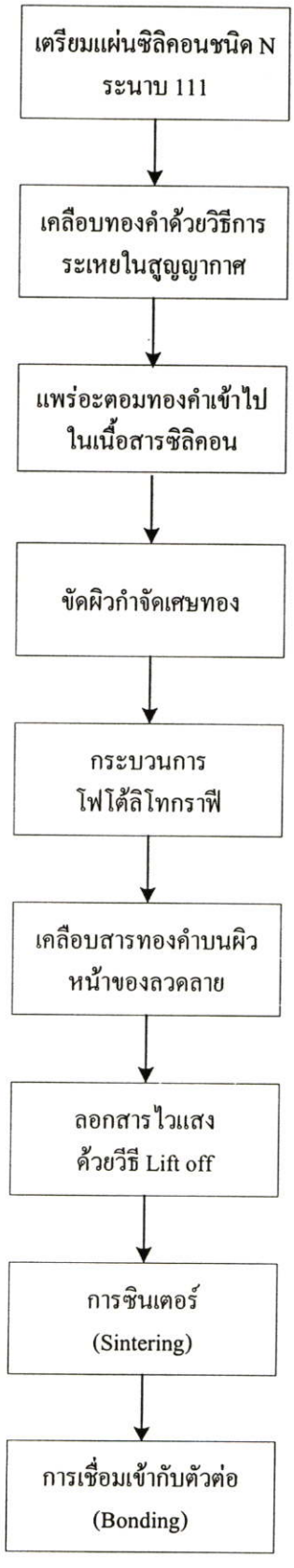
- แผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นระนาบ (111)
- พิกัดความต้านทาน 10^2 [$\Omega \cdot cm$]
- ความหนา 380 μm

5.1.3 กระบวนการเคลือบสารทองคำ (Au Evaporation)

ในกระบวนการเคลือบชั้นทองคำในสูญญากาศ (Gold Evaporation) โดยการใช้อุปกรณ์ (Vaccum evaporator) ได้ทำการเคลือบแผ่นผลึกซิลิคอนด้วยชั้นทองคำหนาประมาณ 0.16μm

สำหรับเทคนิคการเคลือบสารในระบบสูญญากาศที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำมีหลายวิธี ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้เทคนิค Filament Evaporation

กระบวนการเคลือบด้วยไส้ (Filament Evaporation) เป็นวิธีที่ง่ายที่สุด สิ้นเปลืองน้อย ไม่มีผลต่อการแผ่กระจายไอออน แต่วิธีนี้จะมีข้อเสียที่อายุการใช้งานของไส้ (Filament) จะสั้น สำหรับการเคลือบสารทองคำทำได้โดยทำให้สารทองคำนั้นได้รับความร้อนจากไส้หรือโบ๊ต (Boat) ที่ทำจากสารทังสเตน (Tungstan) หรือมอลิดินัม (Molydenum)



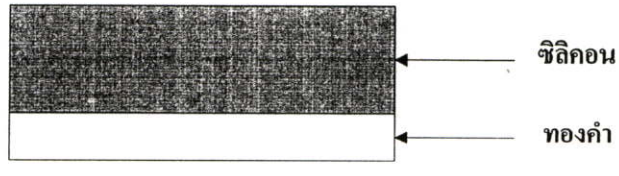
รูปที่ 5.2 กระบวนการสร้างของสายอากาศ

รูปที่ 5.3 ภาพตัดขวางแผ่นผลึกซิลิคอน

ไส้หรือโบ๊ตนี้ จะให้ความร้อนออกมาจากการที่มีกระแสไฟฟ้าจำนวนมากไหลผ่าน โดยในขณะทำการเคลือบสารทองคำ จะควบคุมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านไส้หรือโบ๊ตเพิ่มขึ้นทีละน้อยๆ จนกระทั่งสารทองคำที่วางอยู่ที่ไส้หลอมตัวเป็นของเหลวติดอยู่กับไส้ก็จะระเหยเป็นไอฟุ้งกระจายเคลือบแผ่นผลึกซิลิคอนที่วางใน chamber

ลำดับขั้นตอนของการเคลือบสารในสูญญากาศ

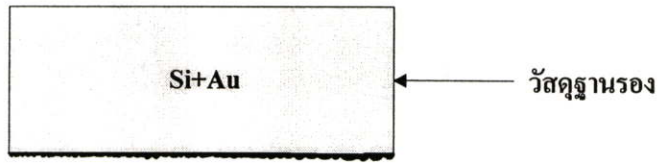
1) ทำความสะอาดและเตรียมผิวของแผ่นผลึกให้แห้ง
2) วางแผ่นผลึกลงใน chamber ที่ตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อให้ชั้นสารที่เคลือบมีความหนาสม่ำเสมอ
3) ปิดวาล์วของ chamber ทำการดูดอากาศออกให้ความดันภายในต่ำลงมาเหลือประมาณ 10^{-3} มม.ของปรอท (Torr) โดยใช้ Rotary pump
4) ปิดวาล์วของ Rotary pump เปิดวาล์วของ Diffusion pump เพื่อทำให้ความดันใน chamber ลดลงเหลือราว 3×10^{-6} มม.ของปรอท (Torr)
5) เริ่มทำสารทองคำที่เคลือบให้เป็นไอ โดยมีกำบังเพื่อมิให้สารที่เจือปนอยู่ ไปเคลือบแผ่นผลึกซิลิคอน
6) ทำการเคลือบสารเจือทองคำลงบนแผ่นผลึกให้หนาตามต้องการ ขณะทำการเคลือบสารแผ่นผลึกซิลิคอน บางครั้งควรให้ความร้อนบนแผ่นผลึกที่เหมาะสมเพื่อให้ชั้นของสารที่เคลือบติดแน่นกับแผ่นผลึกซิลิคอน
7) หยุดทำการเคลือบสาร ปล่อยให้ทุกอย่างใน chamber เย็นตัวลง 30 นาที
8) ปล่อยอากาศเข้าไปใน chamber อย่างช้าๆ จนความดันเป็นปกติ แล้วยก chamber ขึ้น



รูปที่ 5.4 ภาพตัดขวางการเคลือบสารทองคำ

5.1.4 กระบวนการแพร่อะตอมทองคำ (Au Diffusion)

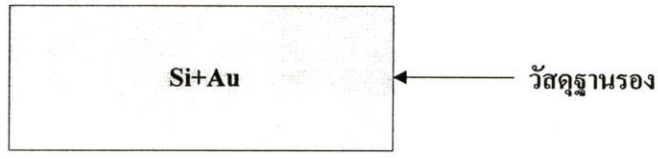
ในกระบวนการแพร่อะตอมทองคำลงในซิลิคอนนี้ ได้ทำที่อุณหภูมิ 1025°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง



รูปที่ 5.5 ภาพตัดขวางการแพร่อะตอมทองคำลงในแผ่นผลึกซิลิคอน

5.1.5 การขัดผิวกำจัดเศษทอง (Au Lapping)

ได้ทำการ Lapping โดยใช้ผงขัดซิลิคอนคาไบร์เบอร์ #1000, #2000 และ #4000 ตามลำดับเพื่อทำให้ผิวหน้าเรียบ



รูปที่ 5.6 ภาพตัดขวางหลังการ Lapping

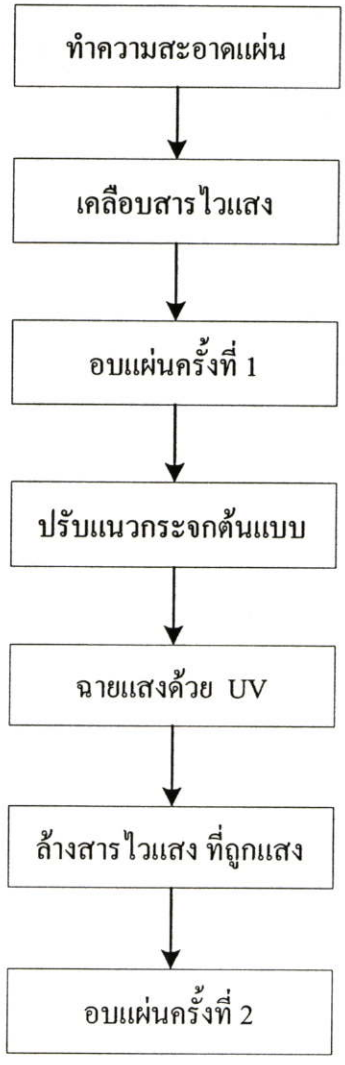
5.1.6. กระบวนการโฟโต้ลิโทกราฟฟี

กระบวนการโฟโต้ลิโทกราฟฟีเป็นขั้นตอนการถ่ายจากมาส์ค (Mask) ไปยังผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน ซึ่งขั้นตอนพื้นฐานของกระบวนการนี้ แสดงดังในรูปที่ 5.9 สำหรับขั้นตอนโฟโต้ลิโทกราฟฟีต้องทำในห้องสะอาดสำหรับการปฏิบัติการเพื่อป้องกันฝุ่นละอองที่จะตกลงมาที่ฐานรองซิลิคอน ในขั้นตอนของน้ำยาไวแสงซึ่งจะทำให้เกิดจุดเสียขึ้นที่ลวดลายที่ถ่ายแบบลงไป จุดเสียที่เกิดขึ้นควรควบคุมไม่ให้เกิน 10% ไม่เช่นนั้นเมื่อถ่ายแบบครบทั้งกระบวนการซึ่งจะใช้มาส์ค ไม่ต่ำกว่า 7-8 แผ่น ทำให้อุปกรณ์ที่สร้างเสร็จมีโอกาสเสียหายมากกว่า 50% ดังนั้นห้องสะอาดจึงมีความจำเป็นมากสำหรับกระบวนการโฟโต้ลิโทกราฟฟี

สำหรับขั้นตอนกระบวนการโฟโต้ลิโทกราฟฟี

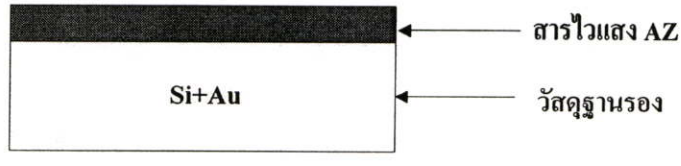
1) ใช้สารไวแสง AZ 4620A + Acetone (1:1) ผสมให้เข้ากันที่ 600 rpm เวลา 5 วินาที
2) สปินเนอร์ (Spinner) ที่ 3000 rpm เป็นเวลา 30 วินาที

หยดสารไวแสงบนแผ่นผลึกที่ติดบนแป้นหมุนของสปินเนอร์ โดยตั้งความเร็วรอบสูงๆ เพื่อที่จะให้สารไวแสงเคลือบเป็นฟิล์มบางๆ บนแผ่นผลึกหนาประมาณ 3000°A - 4000°A โดยให้ความเร็วรอบ 3000 rpm เป็นเวลา 30 นาที ถ้าใช้ความเร็วรอบต่ำเกินไป ลักษณะของชั้น



รูปที่ 5.7 ขั้นตอนขบวนการโฟโต้ลิโทกราฟฟี

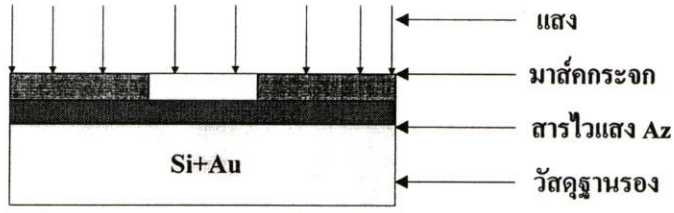
ฟิล์มที่เคลือบแผ่นผลึกจะเกิดนูนตรงกลาง ถ้าความเร็วรอบสูงเกินไป ชั้นฟิล์มที่เคลือบก็จะกระจายไปนูนที่บริเวณขอบ ถ้าเคลือบหนาไป ผิวจะหยาบ ไม่เรียบ และที่สำคัญต้องระวังฝุ่นอย่างมาก



รูปที่ 5.8 ภาพตัดขวางหลังจากเคลือบสารไวแสง

5.1.7 การฉายด้วยแสงอุลตร้าไวโอเลต (Exposed to UV)

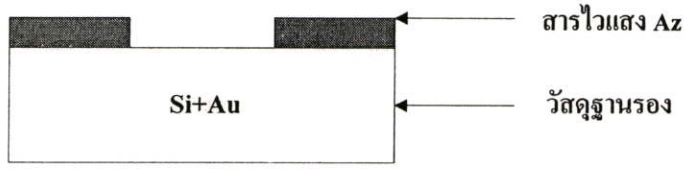
เมื่อจัดมาส์คเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็เป็นการฉายด้วยแสง U.V. (Ultra violet) ซึ่งเป็นแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นตั้งแต่ช่วง 193 – 436 นาโนเมตร และเพื่อทำให้แบบที่ถูกฉายมีความละเอียดแสงที่ต้องมีความพอดี การฉายแสงในแนวเส้นตรง (Alignment Expose) นั้นใช้เวลา 5 วินาที



รูปที่ 5.9 ภาพตัดขวางขั้นตอนฉายแสง

5.1.8 การล้างสารไวแสง (Development)

การ Development เป็นการสร้างลวดลายบนน้ำยาไวแสงที่ผ่านการฉายแสงแล้วด้วย developer ในน้ำยาไวแสง (AZ Developer) แบบบวก ส่วนที่ถูกแสงจะถูกละลายออกไปด้วยน้ำบริสุทธิ์ โดยใช้เวลาประมาณ 1~2 นาที

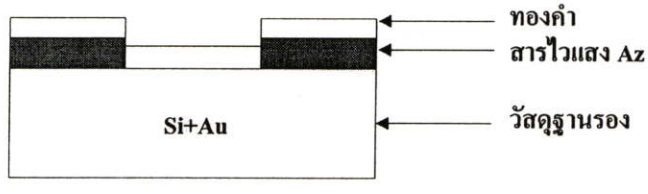


รูปที่ 5.10 ภาพตัดขวางหลังจาก developer

จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ (Prebake) 90°C โดยใช้เวลา 10 นาที อยู่ในเตาอบเพื่อให้ส่วนที่เป็นชั้นฟิล์มต้องทำให้ฟิล์มติดแน่นยิ่งขึ้น

5.1.9 กระบวนการเคลือบสารทองคำ (Au Evaporation)

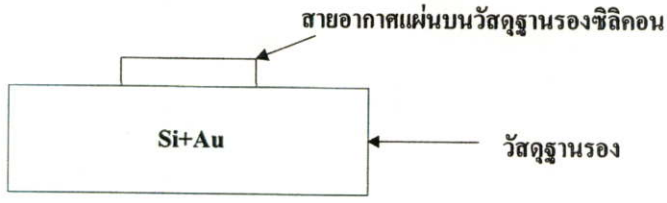
ขั้นตอนและกระบวนการนี้เหมือนกับกระบวนการในขั้นตอนที่ 3 ทุกประการ



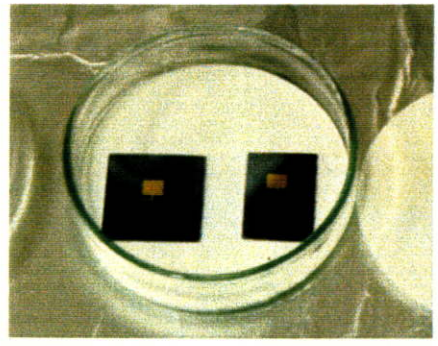
รูปที่ 5.11 ภาพตัดขวางกระบวนการเคลือบสารทองคำ

5.1.10 กระบวนการลอกฟิล์ม (Resist Removal Process หรือ Lift off Process)

ทำการลอกฟิล์มโดยใช้ (Acetone หรือ AZ-remove)



รูปที่ 5.12 ภาพตัดขวางของชิ้นงานที่ได้หลังจากลอกฟิล์มออกแล้ว

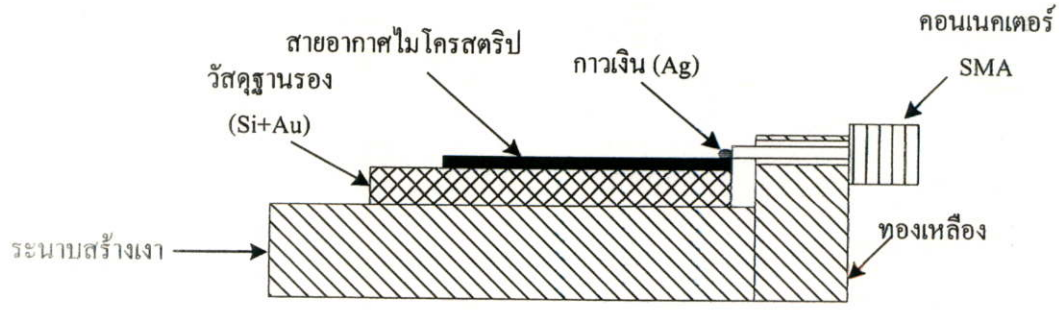


รูปที่ 5.13 ชิ้นงานเมื่อทำการลอกฟิล์มแล้ว

5.1.11 กระบวนการซินเตอร์ (Sintering)

ทำการซินเตอร์ ที่อุณหภูมิประมาณ 250°c ~ 300°c เพื่อให้ส่วนสายอากาศกับเนื้อซิลิคอนยึดติดกันให้แน่นยิ่งขึ้น

5.1.12 กระบวนการเชื่อมต่อ (Bonding)



รูปที่ 5.14 โครงสร้างภาพตัดขวางของสายอากาศที่ได้หลังการเชื่อมต่อ

5.2 สรุป

ในบทนี้ได้แสดงถึงกระบวนการสร้างสายอากาศแผ่นแบบโมโนลิตริกบนฐานรองซิลิคอนที่ถูกโดปทองคำ แผ่นผลึกซิลิคอนที่นำมาสร้างเป็นชนิดเอ็น มีค่าสภาพความต้านทาน 10^2 [Ω·cm] สภาพความยอมสัมพัทธ์ (ε_r) 11.8 และระนาบ (111) ได้ใช้สารเจือทองคำบริสุทธิ์โดปด้วยวิธีสร้างที่ง่ายแบบทั่วไป ด้วยกระบวนการทางเซมิคอนดัคเตอร์ (Semiconductor Process) โดยใช้ความร้อนในการระเหยในสูญญากาศ และแพร่สารเจืออะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1025°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ส่วนกระบวนการโฟโต้ลิโทกราฟฟีเป็นการสร้างรูปแบบ (Pattern) ของสายอากาศ ด้วยการเคลือบสารไวแสง AZ 4620A หรือ AZ 5200E โดยใช้ สปินเนอร์ 3000 rpm. แล้วทำการอบที่อุณหภูมิ 90°C โดยใช้เวลา 10 นาที จากนั้นก็นำไปฉายรังสีอุลตร้าไวโอเลต (UV) แล้วทำการ Developer ด้วย AZ (สำหรับ Developer) ก็จะได้ลวดลายสายอากาศ แล้วจึงนำไปเคลือบด้วยสารทองคำอีกครั้ง หลังจากนั้นนำไปลอกฟิล์มออก ก็จะได้สายอากาศบนซิลิคอนตามที่ต้องการ และเพื่อให้การยึดติดของสายอากาศกับฐานรองแน่น ก็ทำการซินเตอร์ที่อุณหภูมิประมาณ 250°C ~ 300°C จากนั้นนำไปเชื่อมต่อเข้ากับคอนเนคเตอร์ SMA แล้วทำการทดสอบคุณสมบัติการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศต่อไป

บทที่ 6

การทดลองและผลการทดลอง

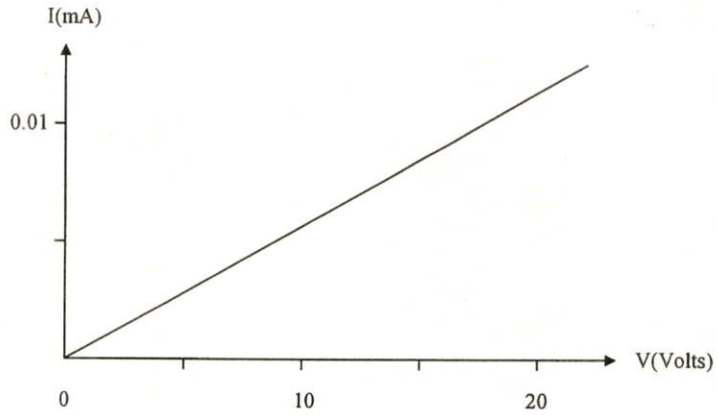
โดยปกติแล้ววัสดุฐานรองสำหรับสายอากาศที่มีโครงสร้างในลักษณะที่เป็นระนาบ (Planar) เช่น สายอากาศแผ่นไมโครสตริป สายอากาศแบบร่องบนระนาบสร้างเงา (Ground plane) ตลอดจนสายส่งสัญญาณแบบไมโครตริป นั้นจะเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวน (Insulator) แต่ยอมให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางผ่านได้ วัสดุฐานรองที่มีคุณสมบัติดังกล่าวนี้ในปัจจุบันมีอยู่ด้วยกันมากมายหลายชนิด โดยวัสดุแต่ละชนิดจะมีความเหมาะสมกับลักษณะงานที่แตกต่างกันไป

สำหรับซิลิคอนแล้ว โดยปกติจะเป็นวัสดุที่ให้ค่าสภาพความต้านทานที่ค่อนข้างต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่เป็นฉนวน ดังนั้นการที่จะทำให้ซิลิคอนมีสภาพความต้านทานสูงขึ้นได้นั้นจะต้องนำสารชนิดอื่นมาเจือปน สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาโดยเลือกใช้สารทองคำเป็นสารที่นำมาโดปให้กับสารซิลิคอน จากการศึกษาและสังเกตผลการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากสารทองคำที่โดปลงในซิลิคอน โดยผ่านกระบวนการต่าง ๆ ทางเซมิคอนดัคเตอร์ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 5

6.1 การทดลองวัดพารามิเตอร์ของชิ้นสาร

เพื่อเป็นการพิสูจน์ว่าแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นที่เติมอะตอมทองคำแล้วมีอะตอมของทองคำเข้าไปอยู่ในเนื้อซิลิคอนจริง จึงทำการทดสอบค่าความต้านทานของเนื้อสารที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเติมอะตอมของทองคำเข้าไปแล้ว โดยทำการตัดชิ้นสารออกเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 2×5 mm และจากการวัดค่าความหนาของชิ้นสารได้ค่าประมาณ 380 μm แล้วทำการทดสอบหาความต้านทานโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันต่อไป

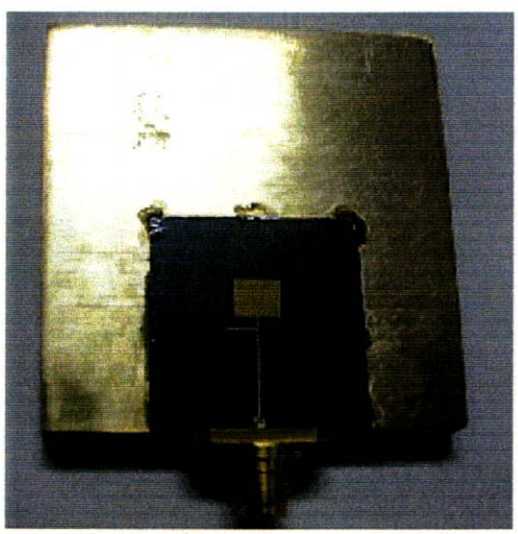
หลังจากนำแผ่นซิลิคอนที่ถูกโดปด้วยทองคำแล้วมาวัดด้วยอุปกรณ์โฟร์พอยท์โพรบจะได้ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดัน [4] ดังแสดงในรูปที่ 6.1 จากกราฟพบว่าค่าความต้านทานของชิ้นสารซิลิคอนชนิดเอ็นที่เติมอะตอมทองคำเข้าไปมีค่ามากกว่า 10^6 [$\Omega.cm$] โดยมีพารามิเตอร์ ดังนี้คือสภาพยอม $\varepsilon_r = 11.8$, ความหนา, $h = 0.38$ mm., ความหนาของแผ่นตัวนำ, $t = 0.2\times10^3$ mm. และค่าความนำของแผ่นตัวนำ $\sigma = 4.513\times10^7$ (S/m) ดังนั้นซิลิคอนซึ่งถูกโดปด้วยทองคำนี้จึงสามารถนำไปใช้งานเป็นวัสดุฐานรองของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น ที่เติมอะตอมทองคำโดปทองคำ

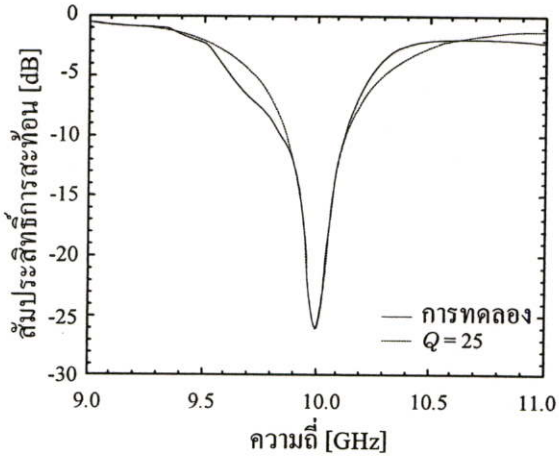
6.2 การทดสอบความถี่รีโซแนนท์ของสายอากาศ

เมื่อได้วัสดุฐานรองที่มีคุณสมบัติตรงตามความต้องการแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการสร้างสายอากาศแผ่นไมโครสตริปบนฐานรองดังกล่าว จากนั้นนำไปทำการทดสอบหาสัมประสิทธิ์ในการสะท้อนกลับของสายอากาศ ตลอดจนคุณสมบัติในการแผ่กระจายคลื่น สายอากาศแผ่นแบบโมโนลิตริกบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำนั้นได้ใช้ค่าที่ได้จากการออกแบบในบทที่ 4 โดยอาศัยขั้นตอนการสร้างดังอธิบายรายละเอียดในบทที่ 5 ซึ่งสายอากาศแผ่นแบบโมโนลิตริกบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำที่สร้างเสร็จสมบูรณ์แล้วนั้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 สายอากาศแผ่นแบบโมโนลิตริกบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ

ก่อนการทดสอบหาคุณสมบัติการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ได้ทำการสร้างขึ้นมานั้น จำเป็นที่จะต้องทราบความถี่รีโซแนนท์ของสายอากาศเสียก่อน สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการระบุความถี่รีโซแนนท์ของสายอากาศ ถูกวัดโดยอาศัยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) รุ่น HP8510C ผลการทดสอบวัดแสดงไว้ในรูปที่ 6.3

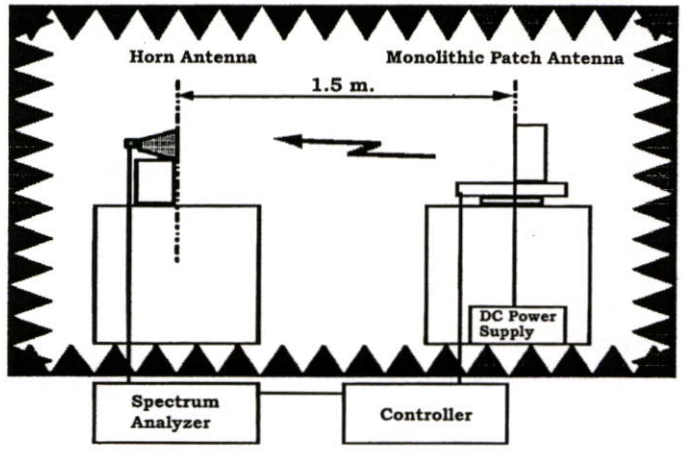


รูปที่ 6.3 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศแผ่นแบบโมโนลิตริกบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ

จากรูปที่ 6.3 สังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนว่าสายอากาศที่ได้ทำการสร้างขึ้นนั้นมีความถี่รีโซแนนท์ใกล้เคียงกับทฤษฎี ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าค่าความถี่ที่ได้ออกแบบไว้ สาเหตุของความผิดพลาดของความถี่เรโซแนนท์นี้น่าจะเกิดจากการส่งผ่านกำลังงานจากสายโคแอ็กเชียลไปยังสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

6.3 การทดสอบแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น

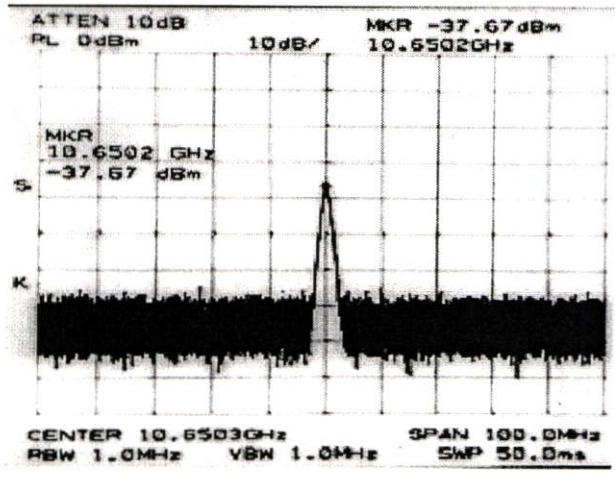
คุณสมบัติในการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศนั้นเป็นสิ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากสำหรับการออกแบบสายอากาศทุกชนิด เพื่อความถูกต้องในการวัดแบบรูปสายอากาศนั้น สายอากาศแผ่นบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำที่สร้างขึ้นถูกนำไปทดสอบในห้องไร้การสะท้อน (Anechoic chamber) ของภาควิชาโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยโตไก ประเทศญี่ปุ่น โดยมีอุปกรณ์ในการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 6.4



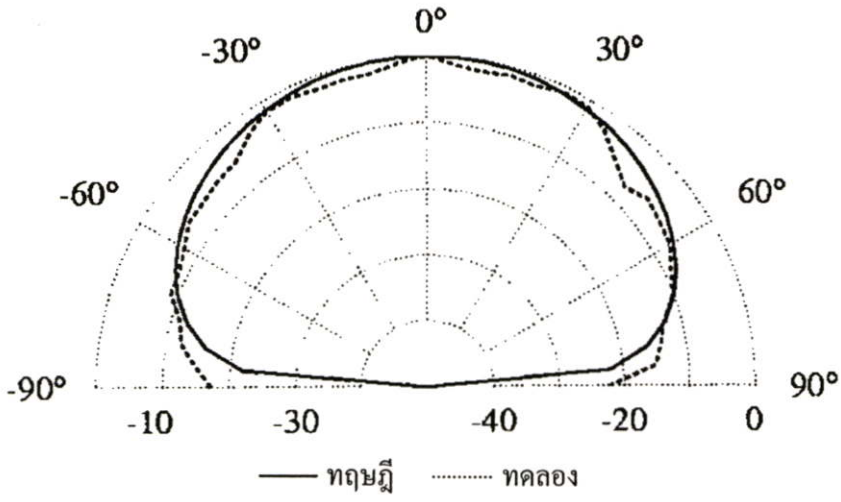
รูปที่ 6.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสายอากาศภายในห้องไร้การสะท้อน

สายอากาศแผ่นบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำถูกใช้เป็นสายอากาศสำหรับแผ่กระจายคลื่น (โมดการส่ง) โดยมีสายอากาศปากแตร (Horn antenna) เป็นตัวรับ โดยมีระยะห่างระหว่างสายอากาศตัวรับและตัวส่ง 1.5 เมตร สัญญาณที่รับได้จากสายอากาศปากแตรจะถูกนำมาแสดงยังเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม รูปที่ 6.5 แสดงสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศปากแตรเมื่อสายอากาศตัวส่ง (สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ) ซึ่งถูกกระตุ้นด้วยกำลังงาน 0 dBm

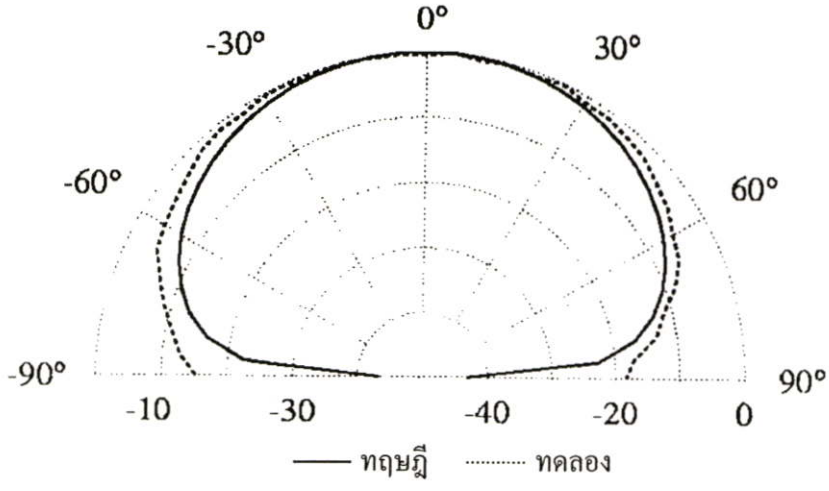
แบบรูปของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) และสนามแม่เหล็ก (H-plane) ที่วัดได้แสดงไว้ในรูปที่ 6.6 (a) และ (b) ตามลำดับ ซึ่งสังเกตเห็นได้ว่าลักษณะของแบบรูปที่วัดได้จะมีความสอดคล้องกับแบบรูปในทางทฤษฎีเป็นอย่างมาก ดังนั้นสายอากาศแผ่นบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำที่ทำการสร้างขึ้นนี้จึงมีคุณสมบัติขั้นพื้นฐานของสายอากาศที่ถูกต้องและเป็นไปตามทฤษฎีทุกประการ



รูปที่ 6.5 สัญญาณที่รับได้จากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม



(a)



(b)

รูปที่ 6.6 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นแบบโมโนลิตริกบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำในระนาบ (a) สนามไฟฟ้า (b) สนามแม่เหล็ก

บทที่ 7
สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอสายอากาศแผ่นแบบโมโนลิตริกบนวัสดุฐานรองซิลิคอนสำหรับสายอากาศรวมแบบแอกทีฟ ซึ่งวัสดุฐานรองซิลิคอนเป็นสารชนิดเอ็น ระนาบ (111) สภาพความต้านทาน 10^2 [$\Omega \cdot$cm] และมีสภาพยอมสัมพัทธ์ $\varepsilon_r = 11.8$ ได้ทำการระเหยในสูญญากาศด้วยทองคำบริสุทธิ์ที่ความร้อนสูง และแพร่อะตอมทองคำในแผ่นผลึกซิลิคอนด้วยอุณหภูมิ 1025 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ด้วยกระบวนการสร้างในลักษณะเดียวกับกระบวนการทางเซมิคอนดัคเตอร์ จากการวัดและการทดสอบวัสดุฐานรองซิลิคอนที่เติมอะตอมทองคำ โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน [4] จะเห็นว่าสภาพความต้านทานเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ขณะที่ยังไม่ได้เติมอะตอมทองคำสภาพความต้านมีค่าเป็น 10^2 [$\Omega \cdot$cm] และเมื่อเติมอะตอมทองคำในแผ่นผลึกซิลิคอนแล้วจะเห็นได้ว่า สภาพความต้านทานเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งมีค่ามากกว่า 10^6 [$\Omega \cdot$cm] ด้วยคุณสมบัติดังกล่าว จึงได้มีแนวคิดนำเอาวัสดุฐานรองซิลิคอนที่เติมด้วยอะตอมทองคำ มาใช้เป็นวัสดุฐานรองของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป ซึ่งเป็นวัสดุฐานรองใหม่สำหรับสายอากาศแบบระนาบด้วยคุณสมบัติของวัสดุฐานรองซิลิคอนที่เติมอะตอมทองคำนั้น นอกจากจะมีสภาพยอมสัมพัทธ์ (ε_r) ที่สูงแล้ว ยังสามารถใช้งานได้ที่ความถี่สูงอีกด้วย จึงเป็นเหตุผลหนึ่งที่สามารถทำให้ขนาดของสายอากาศลดลงได้ ในงานวิจัยที่ผ่านมา คุณสมบัติเบื้องต้นของสายอากาศรวมแบบแอกทีฟนั้น ได้ถูกอธิบายไว้แล้วใน [1-3], [9] แต่บางสิ่งในทางปฏิบัติกับถูกละทิ้งไปในบทความเหล่านั้น ปัญหาเรื่องขนาดของสายอากาศสำหรับสายอากาศรวมแบบแอกทีฟนั้นเป็นสิ่งแรกที่ต้องทำการแก้ไข เมื่อสายอากาศรวมแบบแอกทีฟถูกสร้างขึ้นมาในกรรมวิธีโมโนลิตริก (Monolithic) ซึ่งกำลังได้รับความนิยมกันอยู่ในเทคโนโลยี MMIC ดังนั้นคุณสมบัติของวัสดุฐานรองซิลิคอนที่เติมอะตอมทองคำนี้จะเป็นวัสดุฐานรองของสายอากาศแบบระนาบที่ทำให้ขนาดของสายอากาศลดลงได้

การศึกษาและวิเคราะห์

นอกจากผลที่ได้จากการทดลองแล้ว ยังได้ทำการพิสูจน์ผลเหล่านี้ด้วยการวิเคราะห์ในทางทฤษฎี Electromagnetics เช่น ค่าสภาพความต้านทาน ได้พิจารณาค่า Q ที่ได้รับผลกระทบจากค่าสภาพความต้านทานค่าต่าง ๆ กัน และพิจารณาคุณสมบัติการแผ่กระจายคลื่น ที่มีสภาพความต้านทานค่าต่าง ๆ กันด้วย โดยอาศัยทฤษฎีการวิเคราะห์ด้วยวิธีแบบจำลองคาวิตี้ในกรณีค่า Q และในส่วนคุณสมบัติการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศนั้นได้วิเคราะห์ด้วยวิธีโมเมนต์ จึงยืนยันคุณสมบัติของวัสดุฐานรองได้ว่า สารกึ่งตัวนำแผ่นผลึกซิลิคอนที่ถูกเติมด้วยอะตอมทองคำนั้น จะทำให้มีสภาพความต้านทานสูงขึ้นจากเดิมที่มีสภาพความต้านทาน 10^2 [$\Omega.cm$] ดังนั้นจึงเป็นวัสดุฐานรอง

ที่มีคุณสมบัติดีสำหรับสายอากาศ ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 4.9-4.12 และผลการทดลองในรูปที่ 6.1, 6.5 และ 6.6 ตามลำดับ

การออกแบบสายอากาศแผ่นแบบโมโนลิตริกบนฐานรองซิลิกอน

สำหรับการออกแบบได้ทำการออกแบบโดยใช้โปรแกรมโมเมนตัม (Momentum) ในการจำลองพฤติกรรมของสายอากาศ ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบสายอากาศแผ่นไมโครสตริปองค์ประกอบเดี่ยว ทำงานที่ความถี่ 10 GHz และได้ออกแบบสายป้อนสัญญาณแบบไมโครสตริปด้วยโปรแกรมเดียวกัน หลังจากนั้นจึงได้ใช้โปรแกรม MDS ในการรวมเอาสายอากาศกับสายป้อนสัญญาณแบบไมโครสตริปต่อเข้าด้วยกันเป็นครั้งสุดท้าย เมื่อออกแบบเสร็จเรียบร้อยแล้วจึงได้ทำในขั้นตอนของการสร้างต่อไป

กระบวนการสร้าง

กระบวนการสร้างสายอากาศในวิทยานิพนธ์นี้ ได้ทำตามกระบวนการทางเซมิคอนดัคเตอร์ที่ง่าย ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 5 เมื่อผ่านกระบวนการแพร่อะตอมทองคำในซิลิคอนเรียบร้อยแล้ว จากนั้นจึงมาทำกระบวนการโฟโต้ลิโทกราฟฟี่ เพื่อสร้างลวดลายของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปแบบโมโนลิตริก โดยใช้สารไวแสง AZ 4620A หรือ AZ5200E ซึ่งสปินเนอร์ที่ความเร็ว 3000 rpm/นาที แล้วอบฟิล์มครั้งแรก (Prebake) ที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นจึงนำไปฉายแสงอุลตร้าไวโอเลต (UV) เป็นเวลา 5 วินาที เสร็จแล้วจึงทำการ Development ด้วย AZ Developer แล้วก็นำฟิล์มไปอบอีกครั้ง (Postbake) ที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 10 นาที ในขั้นตอนนี้จะได้ลวดลายของสายอากาศ ขั้นตอนต่อไปเป็นการนำไปเคลือบด้วยทองคำในสูญญากาศอีกครั้ง ซึ่งตรงกับกระบวนการที่ 2 ในบทที่ 5 หลังจากเสร็จขั้นตอนนี้แล้วจึงนำไปเข้ากระบวนการนำสารไวแสงออก (Photoresist removal หรือ Lift off) แล้วก็จะได้สายอากาศบนฐานรองซิลิคอน และเพื่อให้สายอากาศยึดติดแน่นกับฐานรองจึงได้ทำการ Sintering ที่อุณหภูมิประมาณ 350 °C -380 °C ในขั้นตอนนี้ต้องให้ความระมัดระวังเป็นอย่างมาก เพราะอาจทำให้ตัวแผ่นสายอากาศได้รับความเสียหายได้ เมื่อผ่านกระบวนการนี้แล้วจึงนำไปบอนดิ่ง เพื่อเชื่อมเข้ากับตัวต่อ (Connector) ทางด้านจุดป้อนสัญญาณ ในการเชื่อมต่อโดยใช้สารซิลเวอร์ (Silver : Ag) หรือที่เรียกกันว่า "กราวด์เงิน" ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำได้ยากและอาจจะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติของสายอากาศได้ จากนั้นจึงนำสายอากาศไปทดสอบ ความถี่รีโซแนนท์ของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปแบบโมโนลิตริก ได้แสดงในรูปที่ 6.2 และจากนั้นได้ทำการทดสอบแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นแบบโมโนลิตริก ในการทดสอบทั้งหมดได้ทำในห้องไร้การสะท้อนคลื่น ซึ่งเป็นขั้นตอนท้ายสุดในการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศแผ่นแบบโมโนลิตริกบนวัสดุฐานรองซิลิคอน

การทดลองและผลการทดลอง

ผลที่ได้จากการทดสอบได้แสดงไว้ในบทที่ 6 สำหรับขั้นตอนในการทดสอบต้องเตรียมเครื่องมือวัดคือเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum Analyzer) และเครื่องกำเนิดสัญญาณให้พร้อม การทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศแผ่นแบบโมโนลิตริกบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ ได้ทำการทดสอบภายในห้องไร้การสะท้อน ที่มหาวิทยาลัยโตไก ประเทศญี่ปุ่น โดยให้สายอากาศแผ่นไมโครสตริปแบบโมโนลิตริกบนวัสดุฐานรองซิลิคอนเป็นตัวแผ่กระจายคลื่น และมีสายอากาศแบบปากแตรเป็นตัวรับคลื่น ระยะห่างระหว่างสายอากาศที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นกับสายอากาศปากแตรประมาณ 1.5 เมตร สัญญาณที่รับได้สังเกตเห็นได้ด้วยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมดังแสดงในรูปที่ 6.4 พบว่าสายอากาศที่สร้างขึ้น ทำงานที่ความถี่ 10.6502 GHz กำลังงานที่รับได้เท่ากับ –37.67 dBm และในรูปที่ 6.5(a) ได้แสดงแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและในรูปที่ 6.5(b) แสดงแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก จากการสังเกตแบบรูปการแผ่กระจายทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะเห็นได้ว่าแบบรูปเป็นไปตามทฤษฎี ดังนั้นจึงเป็นการแสดงว่าซิลิคอนโดปทองคำที่นำมาใช้เป็นวัสดุฐานรองสำหรับสายอากาศแผ่นแบบโมโนลิตริกนี้ เป็นวัสดุฐานรองที่ดีและมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับวงจรรวมทางไมโครเวฟแบบโมโนลิตริก (MMIC)

ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

จากผลการวิเคราะห์วัสดุฐานรองที่มีสภาพความต้านทานที่ต่างกันโดยใช้แบบจำลองคาวิตี้และวิธีโมเมนต์ ส่วนการออกแบบได้ทำโดยใช้วิธีการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมโมเมนตัมและ MDS สำหรับการสร้างได้ใช้กระบวนการทางเซมิคอนดัคเตอร์ และการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปแบบโมโนลิตริกดังกล่าว ตลอดจนสามารถสรุปวิเคราะห์ข้อดีและข้อเสีย ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในตอนต้นของบทนี้ โดยที่ในบทนำได้กล่าวถึงวัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์ไว้แล้วว่าเป็นการศึกษาพื้นฐานของสายอากาศแผ่นแบบโมโนลิตริกบนฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ และสายอากาศรวมแบบแอกทีฟเพื่อนำไปใช้เป็นพื้นฐานการศึกษา ค้นคว้าและวิจัย อีกทั้งยังเป็นอุปกรณ์ประกอบการเรียน และการทดลองให้แก่นักศึกษาของภาควิชาเทคนิคอุตสาหกรรม สาขาเทคโนโลยีโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากในการศึกษาวิชาสายอากาศและการแผ่กระจายคลื่นวิทยุ ดังนั้นเพื่อให้สายอากาศมีความสมบูรณ์มากขึ้น จึงควรได้มีการพัฒนาปรับปรุงต่อไป สำหรับแนวความคิดของผู้เขียนตอนนี้คิดว่า มีจุดที่น่าสนใจในการพัฒนาสายอากาศแผ่นไมโครสตริปแบบโมโนลิตริกบนวัสดุฐานรองซิลิคอนดังนี้

1. พัฒนาสร้างเป็นสายอากาศแผ่นแบบแถวลำดับ (Array) บนฐานรองซิลิคอน เพื่อทำให้บีมแคบลงและมีแบนด์วิดท์กว้างขึ้น คุณสมบัติการแผ่กระจายคลื่นและประสิทธิภาพทางด้านความถี่จึงจะมีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น โดยต้องทำการวิเคราะห์และออกแบบอย่างถูกต้อง กระบวนการสร้างทุกขั้นตอนต้องให้ความระมัดระวังเป็นอย่างมาก ซึ่งนอกจากมีราคาแพงแล้ว อาจเกิดอันตรายได้

2. การวิจัยและพัฒนาสร้างเป็นสายอากาศแบบแอกทีฟโดยการสร้างสายอากาศแผ่นไมโครสตริปรวมเข้ากับอุปกรณ์แอกทีฟ โดยกระบวนการสร้างทำพร้อมกับตอนแรก อาจจะทำเป็นองค์ประกอบเดี่ยวก่อน จากนั้นจึงค่อยทำเป็นแถวลำดับที่มีจำนวนองค์ประกอบมากขึ้น เพื่อพัฒนาไปใช้งานทางด้านระบบแลนไร้สาย (Wireless LAN) และเรดาร์ขนาดเล็ก

3. ควรศึกษาวิจัยพัฒนาต่อ โดยทำการออกแบบที่ความถี่สูงขึ้น ซึ่งจะเป็นผลทำให้สายอากาศแผ่นแบบโมโนลิตริกบนฐานรองซิลิคอนนี้มีขนาดเล็กลงได้มาก แต่อาจจะสร้างยากขึ้นตามไปด้วยในการเริ่มต้น แต่อย่างไรก็ตามเป็นงานวิจัยที่น่าสนใจเพราะเป็นวัสดุฐานรองใหม่สำหรับสายอากาศไมโครสตริป ผู้เขียนคิดว่ายังมีสิ่งที่น่าสนใจมากบนวัสดุฐานรองซิลิคอนที่เติมอะตอมทองคำ

4. ในส่วนของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ได้พัฒนาสร้างเป็นไอซีได้แล้ว แต่ว่าไอซีสำหรับสายอากาศยังไม่มีใครสร้าง ซึ่งที่ผ่านมาจะเห็นว่าสายอากาศแผ่นไมโครสตริปจะถูกสร้างบนวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกจึงเป็นการยากที่จะทำเป็นไอซีได้ จึงต้องศึกษาวิจัยมาสร้างสายอากาศแผ่นไมโครสตริปแบบโมโนลิตริกบนวัสดุฐานรองซิลิคอนที่เติมอะตอมทองคำ จึงมีความเป็นไปได้ที่จะสร้างสายอากาศรวมกับวงจรรวมแอกทีฟบนระนาบเดียวกันแบบโมโนลิตริก ซึ่งจะเป็นการพัฒนาเทคโนโลยี MMIC ไปอีกระดับหนึ่ง

ในลำดับสุดท้ายนี้ ผู้เขียนหวังว่าสายอากาศแผ่นแบบโมโนลิตริกบนวัสดุฐานรองซิลิคอนซึ่งได้ทำเป็นต้นแบบนี้ คงจะเป็นประโยชน์ขั้นพื้นฐานแก่ผู้ที่ศึกษาค้นคว้าและนำไปใช้งานตามวัตถุประสงค์ที่ได้มุ่งหวังไว้ และถ้าหากมีผู้สนใจที่จะศึกษาวิจัยต่อไปจริง ก็คงจะได้แนวความคิดและความรู้ทางเทคนิคต่าง ๆ จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งผู้เขียนเต็มใจอุทิศไว้ให้แก่การพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคมของประเทศสืบไป

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 ศุภเดช, วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง, จิรวัฒน์ ปานกลาง, อนุชา เรืองพานิช และ มนชนก ศรีเสือขาม, "ความคล่องตัวของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดเอ็นที่เติมอะตอมทองคำ," การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 13, หน้าที่ 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*, 2nd 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 Proceeding 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, FA, pp. 405-408, May 1995.

[10] สมเกียรติ ศุภเดช, *วงจรรวมเบื้องต้น*, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พิมพ์ครั้งที่ 1, พ.ศ. 2525.

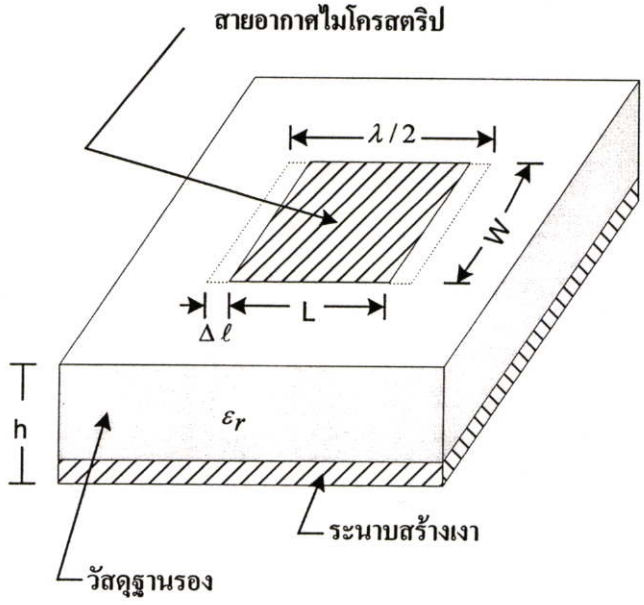
[11] H. Pues and A. Van de Capelle, "Accurate transmission line model for the Rectangular microstrip antenna," Proc. IEE, vol. 131, pt. H, no.6, pp. 334-340, Dec 1984.

[12] I. J. Bahl, "Design of microstrip antennas covered with a dielectric layer," IEEE Trans on Antenna & Propagation, March 1982.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

การคำนวณขนาดของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า



รูปที่ ก1 สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ความกว้าง (W) และความยาว (L) ของ MPA สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการดังต่อไปนี้ [11], [12]

$$W = \frac{\lambda_0}{2}\left(\frac{\varepsilon_r + 1}{2}\right)^{-1/2} \qquad (ก.1)$$

$$L = \frac{c}{2f_r\sqrt{\varepsilon_e}} - 2\Delta l \qquad (ก.2)$$

อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายอากาศ (Z_c) หาได้จาก

$$Z_c = \frac{\eta_0}{\sqrt{\varepsilon_{re}}}\frac{h}{W_e} \qquad (ก.3)$$

แอดมิตแตนซ์ของสายอากาศ (Y_s) สามารถคำนวณได้จาก

$$Y_s = G_s + jB_s$$

$$= \frac{1}{\pi\eta_0}\left[\begin{array}{l}\left(wSi(w)+\frac{\sin w}{w}\cos w-2\right)\left(1-\frac{s^2}{24}\right)\\ +\frac{s^2}{12}\left(\frac{1}{3}+\frac{\cos w}{w^2}+\frac{\sin w}{w^3}\right)\end{array}\right]+jY_c\tan(\beta\Delta l) \qquad \text{(ก.4)}$$

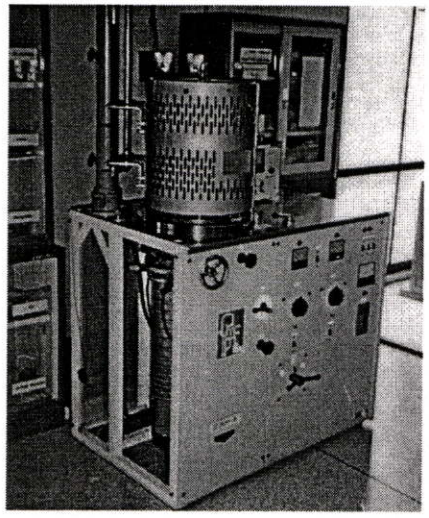
แอดมิตแตนซ์ร่วมระหว่างช่องการแผ่กระจายของ MPA สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$Y = G_m + jB_m = G_s F_g K_g + jB_s F_b K_b \qquad \text{(ก.5)}$$

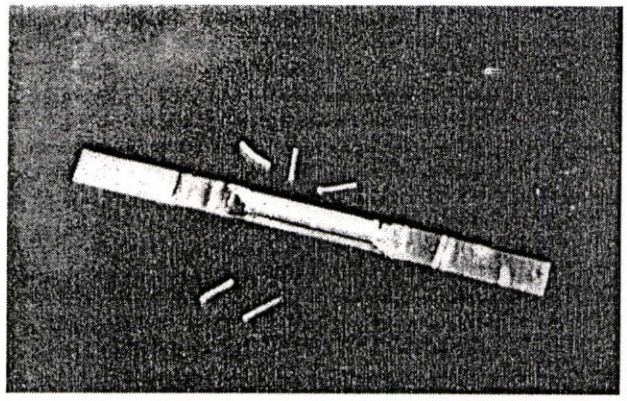
ดังนั้น อินพุทอิมพีแดนซ์ (Z_{Pin}) ของ MPA สามารถคำนวณได้จาก

$$Z_{Pin} = \frac{Y_s + Y_c\,coth(\Psi)}{Y_c^2 + Y_s^2 - Y_m^2 + 2Y_s + Y_c\,coth(\Psi) - 2Y_m + Y_c\,\cos ech(\Psi)} \qquad \text{(ก.6)}$$

2. กระบวนการระเหยสารทองคำในสูญญากาศ



รูปที่ ข1 อุปกรณ์เคลือบในสูญญากาศ

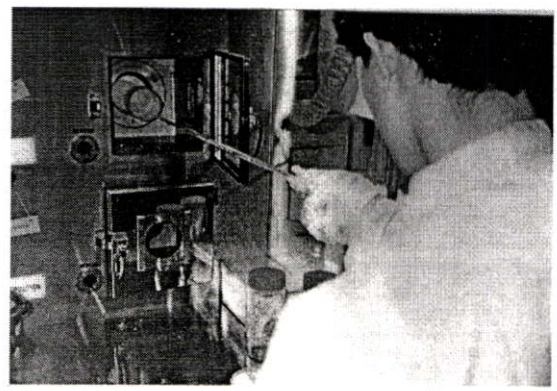


รูปที่ ข2 ฐานแบบโบ๊ตและชิ้นทองคำ

- ทำความสะอาดและเตรียมผิวแผ่นผลึกให้แห้ง
- วางแผ่นผลึกลงใน chamber ที่ตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อให้ชั้นสารที่เคลือบมีความหนาสม่ำเสมอ
- ปิดวาล์วของ chamber ทำการดูดอากาศออกให้ความดันภายในต่ำลงมาเหลือประมาณ 10^{-3} Torr โดยใช้ Rotary pump
- ปิดวาล์วของ Rotary pump เปิดวาล์วของ Diffusion pump เพื่อทำให้ความดันใน chamber ลดลงเหลือราว $10^{-6} - 10^{-7}$ Torr
- เริ่มทำสารทองคำที่เคลือบให้เป็นไอ โดยมีกำบังเพื่อมิให้สารที่เจือปนอยู่ไปเคลือบแผ่นผลึกซิลิคอน

- ทำการเคลือบสารเจือสารทองคำบนแผ่นผลึกให้หนาตามต้องการ ขณะทำการเคลือบสารทองคำบนแผ่นผลึกซิลิคอน บางครั้งควรให้ความร้อนบนแผ่นผลึกที่เหมาะสมเพื่อให้ชั้นสารทองคำที่เคลือบติดแน่นกับแผ่นผลึกซิลิคอน
- หยุดทำการเคลือบสาร ปล่อยให้ทุกอย่างใน chamber เย็นตัวลง 30 นาที
- ปล่อยอากาศเข้าไปใน chamber อย่างช้า ๆ จนความดันเป็นปกติ แล้วยก chamber ขึ้น

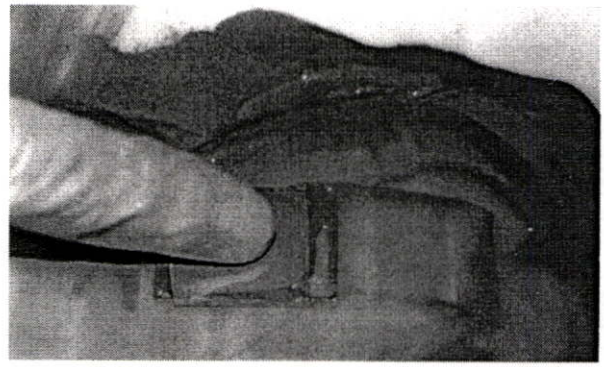
3. กระบวนการแพร่สารทองคำ (Au Diffusion)



รูปที่ ข3 เตาแพร่อะตอมทองคำในแผ่นผลึกซิลิคอน

- เตรียมแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการเคลือบสารด้วยทองคำวางบนโบ๊ตแก้ว
- ทำการเปลี่ยนท่อหลอดแก้วที่ใช้สำหรับการแพร่อะตอมทองคำ
- หาระยะที่อุณหภูมิ 1025° ก่อนที่จะนำเอาแผ่นซิลิคอนที่แพร่ด้วยสารทองคำเข้าเตา
- เมื่อตรวจสอบระยะอุณหภูมิเสร็จแล้วนำแผ่นซิลิคอนที่แพร่ด้วยสารทองคำแล้วเข้าเตา ต้องดันเข้าเตาอย่างช้ามาก ๆ จนถึงจุดที่ตรวจสอบอุณหภูมิ ใช้เวลาอย่างน้อย 5 นาที
- ใช้เวลาในการแพร่อะตอมทองคำลงในแผ่นผลึกซิลิคอน 6 ชั่วโมง
- เมื่อครบ 6 ชั่วโมงตอนเอาแผ่นซิลิคอนที่เติมอะตอมทองคำลงไปออกจากท่อหลอดแก้วอย่างรวดเร็ว แล้วจุ่มในลงในลิควิดไนโตรเจน (Liquid Nitrogen) เพื่อหยุดปฏิกิริยาของทองคำ
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน N_2

4. กระบวนการขัดผิวหน้าแผ่นซิลิคอนโดปทอง (Au Lapping)

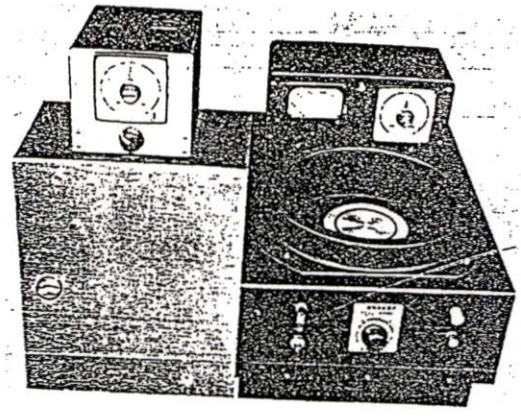


รูปที่ ข4 การขัดผิวหน้าแผ่นซิลิคอนโดปทอง

- นำแผ่นซิลิคอนโดปทองคำเคลือบด้วยอิเล็กทรอนิกส์แวก (electronic vax) ด้านที่ไม่ต้องการขัดผิว แล้วทำการขัดผิวหน้าที่ Evaporated ทอง ให้เรียบ
- ทำการแล็บปิ้งด้วยผงขัดซิลิคาไบร์ #1000
- ทำความสะอาด จุ่มในน้ำ
- ทำการแล็ปปิ้งด้วยผงขัดซิลิคาไบร์ #2000
- ทำความสะอาด จุ่มในน้ำ
- ทำการแล็ปปิ้งด้วยผงขัดซิลิคาไบร์ #4000
- ทำความสะอาด จุ่มในน้ำ
- ละลายแวกออกจากแผ่นซิลิคอน
- ทำความสะอาดผิวหน้า
  - ต้มใน Tricholocthylenene เป็นเวลา 5 นาที
  - Ultrasonic ใน Acetone 3 นาที
  - จุ่มในในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
  - จุ่มในในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
  - เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน N_2

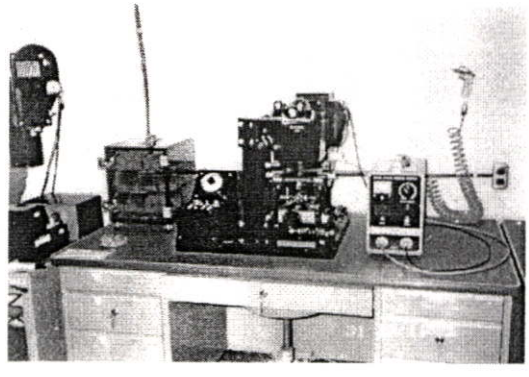
5. กระบวนการโฟโต้ลิโทกราฟฟี่

- เคลือบสารไวแสงชนิดบวก (AZ4620A) spin 3000 rpm.



รูปที่ ข5 เครื่องสปรินเนอร์

- อบฟิล์มที่ 90° C 10 นาที (prebake)
- Alignment Expose เป็นเวลา 5 วินาที



รูปที่ ข6 เครื่อง Alignment Expose

- Develop ฟิล์มโดย
  - AZ Developer แก้วที่หนึ่ง 30 วินาที
  - AZ Developer แก้วที่สอง 30 วินาที
  - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
  - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
  - เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
  - อบฟิมล์ครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 90° C 10 นาที (postbake)

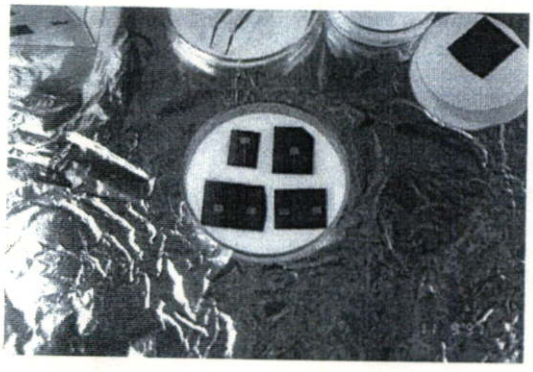
6. กระบวนการระเหยทองคำในสูญญากาศ (Au Evaporated) ครั้งที่ 2

- กระบวนการนี้เหมือนกับกระบวนการ Au Evaporated ในกระบวนการที่ 2 ทุกประการ

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

- จุ่งลงใน Acetone แก้วที่หนึ่ง 1 นาที
- จุ่งลงใน Acetone แก้วที่สอง 1-3 นาที
- จุ่มในในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

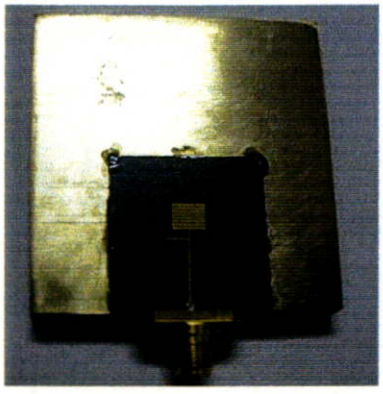
8. กระบวนการซินเตอริง



รูปที่ ข7 หลังจากที่ทำการซินเตอริง

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

9. กระบวนการเชื่อมต่อ



รูปที่ ข8 การเชื่อมต่อ

- ใช้เงิน (Ag) อย่างเหมาะสมในการเชื่อมต่อกับคอนเนคเตอร์

ภาคผนวก ค
การวัดหาค่าพิกัดความต้านทาน

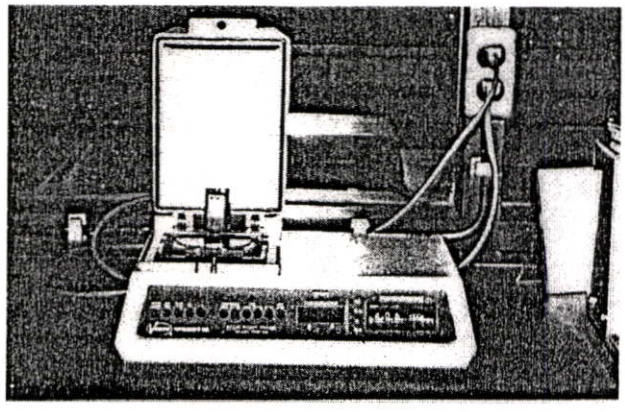
ในสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิคอน นิยมวัดหาค่าแผ่นความต้านทานด้วยวิธีโฟร์พอยท์โพรบ ดังแสดงในรูปที่ ค1

ในการวัดเข็มโลหะที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าทั้งสี่ จะถูกกดลงบนผิวของแผ่นผลึกซิลิคอน เข็มโลหะดังกล่าวจะห่างจากกันเป็นระยะ s เท่า ๆ กัน จากนั้นจะป้อนไบอัสทำให้เกิดกระแส I ไหลผ่านเข็มโลหะที่อยู่ริมนอกสุด คือ เข็มที่ 1 และ 4 กระแสดังกล่าวจะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมผลึกสารกึ่งตัวนำ โดยวัดแรงดันตกคร่อม (V) ระหว่างขั้วของเข็มโลหะด้านใน

เมื่อทราบค่าแผ่นความต้านทาน (R_s) แล้ว สามารถหาค่าพิกัดความต้านทาน (ρ) ได้โดย

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

ในกรณีนี้แผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำมีความยาวและความกว้างมากกว่าระยะห่างระหว่างเข็มโลหะ



รูปที่ ค1 เครื่องโฟร์พอยท์โพรบ

ภาคผนวก ง

บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิทยานิพนธ์นี้มี 2 บทความ ดังต่อไปนี้

[1] **Sathaporn Promwong**, Panarat Rawiwan, Nattapon Chinda, U-Thai Sritheeravirojana, Prakit Tangtisanon and Shigeo Kawasaki, "Characteristics of Gold doped Silicon Substrate for Monolithic Microstrip Patch Antenna," IEEE International Symposium on Intelligent Signal Proceeding and Communication System, Dec. 1999.

[2] Prakit Tangtisanon, **Sathaporn Promwong**, Kazuki Hayata, Tomoyuki Goi, Hidehisa Shiomi and Shigeo Kawasaki, "Active Integrated Antenna Composed of Patch Resonator is Feedback Loop," Thailand – Japan Joint Symposium on Antenna and Propagation, pp. 127- 130, May 1997.

1999 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS'99)

Wednesday, December 8 - Friday, December 10, 1999
Phuket Arcadia Hotel & Resort, Phuket, Thailand

Organizing Committee:

General Chair
Pairash Thajchayapong
National Science and Technology Development Agency

Technical Program Chair
Nobuo Fujii
Tokyo Institute of Technology
Tokyo, Japan

Technical Program Co-Chair
Sawasd Tantaratana
Sirindhorn International Institute of Technology, Thammasat University

Tutorial Chair
Wanlop Surakampontorn
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Special Session Chair
Yong Hwan Lee
Seoul National University, Korea

Local Arrangement Chair
Manas Sangworasil
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Local Arrangement Co-Chair
Chusak Limsakul
Prinoe of Songkla University

Publicity Chair
Somchai Chatratana
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok

International Coordination Chair
Ekachai Leelarusmee
Chulalongkorn University

Publication Chair
Pansak Siriruchatapong
National Electronics and Computer Technology Center

Finance Chair
Somsak Choomchuay
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

General Secretary
Monai Krairiksh
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Sponsored by:
National Science and Technology Development Agency
National Electronics and Computer Technology Center
Japan International Cooperation Agency
Sirindhorn International Institute of Technology, Thammasat University

Technical Co-Sponsored by:
IEEE Communication Society

In Cooperation with the *IEICE*

Organized by:
Communications Chapter, IEEE Thailand Section

ISPACS'99 Symposium Secretariat
Research Center for Communications and Information Technology (ReCCIT)
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand
Tel.: +662-7372500 Ext.5023, 5024
Fax.: +662-7392375
Email: ispacs99@kmitl.ac.th
http: //www.kmitl.ac.th/~reccit

Signal Processing and Communications Beyond 2000

July 13, 1999

Dr.Sathaporn Promwong
Dept. of Industrial Technology
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok 10520
THAILAND

Dear Dr.Promwong:
I am pleased to inform that your paper entitled:

CMS 245
Characteristics of Gold Doped Silicon Substrate for Monolithic Microstrip Patch Antenna

has been accepted for Poster presentation at ISPACS'99. Please note that there is no distinction of quality between oral and poster presentation. At the beginning of each poster session, authors must present a three minutes oral presentation to make the poster session active.

Authors of the accepted papers are requested to submit a four-page A4-size camera-ready manuscript following the ISPACS'99 format. Please be informed that any pages exceeding 4 will not be included in the Symposium proceedings. In order to guarantee the publication of your paper in the symposium proceedings, the following must be received by the symposium secretariat by September 15, 1999.

- Camera-ready manuscript
- Payment of symposium advanced registration fee
- Completed ISPACS'99 Copyright Form

The ISPACS'99 Copyright Form, ISPACS'99 camera-ready format for paper preparation, a brochure containing symposium information and registration forms will be delivered to you by August 15, 1999.

The advance program will be available by July 15,1999 on the ISPACS'99 web site at http://www.kmitl.ac.th/~reccit.

On behalf of the Organizing Committee, we look forward to meeting you at the ISPACS'99 in Phuket Thailand, December.

Yours sincerely

Prof. Nobuo Fujii
Chairman, Technical Program Committee

Characteristics of Gold doped Silicon Substrate for Monolithic Microstrip Patch Antenna

S. Promwong, P. Rawiwan, N. Chinda, U. Sritheeravirojana,
P. Tangtisanon and S. Kawasaki[†]

Department of Industrial Technology, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Chalongkrung Road,
Ladkrabang, Bangkok, Thailand 10520
Email: kpsathap@kmitl.ac.th

[†]Department of Communications Engineering, Tokai University
1117 Kita-Kaname, Hiratsuka, Kanagawa 259-12 Japan

Abstract

Characteristics of gold doped silicon substrate for a monolithic microstrip patch antenna (MMPA) are presented. The semiconductor process is used for fabrication. This process leads to the high resistivity of the substrate which is the desired property for the antenna substrate. In this paper, analysis and experiment of the antenna are proposed. It is found that the measured radiation patterns are in good with the computed radiation patterns. Therefore, the silicon doped gold substrate which has good characteristic can be used for the small antenna.

Introduction

Telecommunication has become increasingly importance to develop the country, almost all departments use communication system, such as a personal communication system, a mobile telephone system and a multi-media system, for convenient. In order to realize these systems, technologies for multi-function, namely, high performance, small size, light weight and low cost are requested. An antenna is also importance in the communication system, therefore the characteristic of the good antenna is required and the first one which should consider is the suitable and good material.

For developing to high performance structure, circuits and antennas, such as MMIC (Monolithic Microwave Integrated circuit) and active integrated antenna are combined together.

In this paper, the characteristic of the gold doped silicon substrate for the monolithic microstrip patch antenna using the semiconductor process is proposed. Owing to the high resistivity of the silicon doped gold substrate, the monolithic microstrip patch antenna used this substrate is high performance and it can be develop to MMIC and active integrated antenna.

Configuration and Design

An n-type silicon (111) wafer which resistivity is 100 $\Omega \cdot cm$ used as a starting material. Then gold was diffused into the silicon wafer. Diffusion temperature was 1025° C and diffusion time was 6 hour. Sample structure is shown in fig. 1

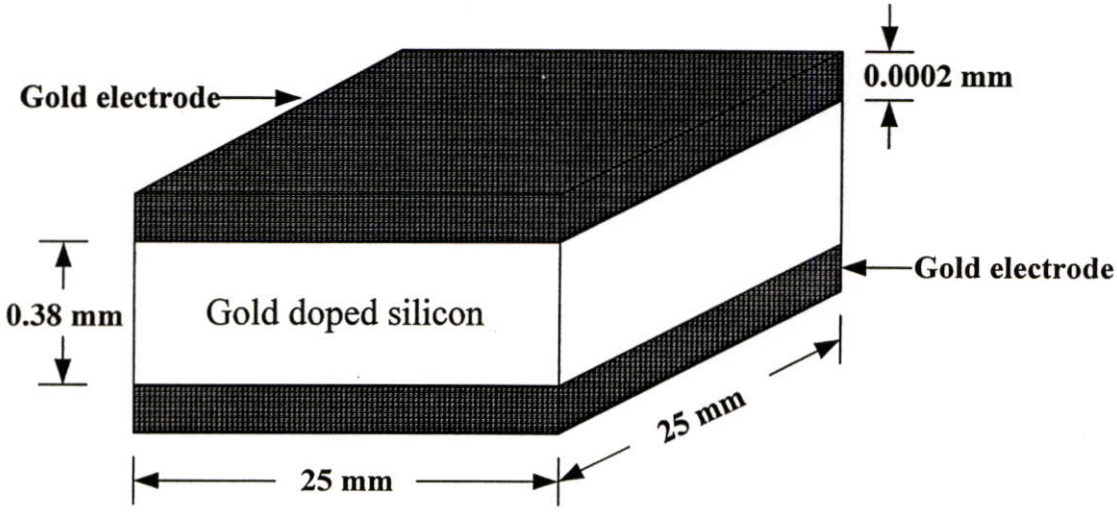


Fig.1 Sample Structure.

It is well known that gold atoms doped in to silicon simultaneously form a deep acceptor level. Figure 2 shows a schematic sketch of energy band diagram when gold is doped into n-type silicon. Since electrons in the shallow donor level are compensated by gold acceptor level, the conduction band is decreased so that resistivity of the sample becomes high by gold diffusion.

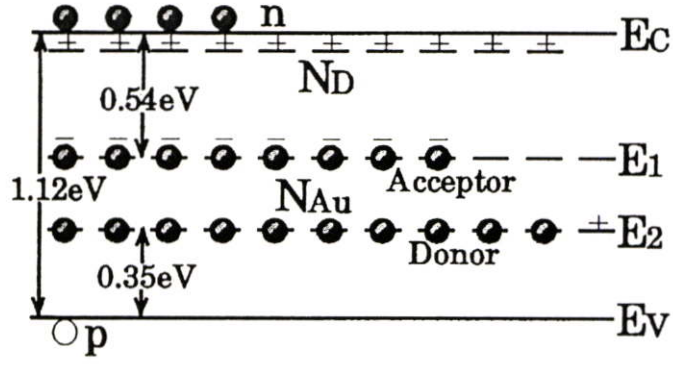
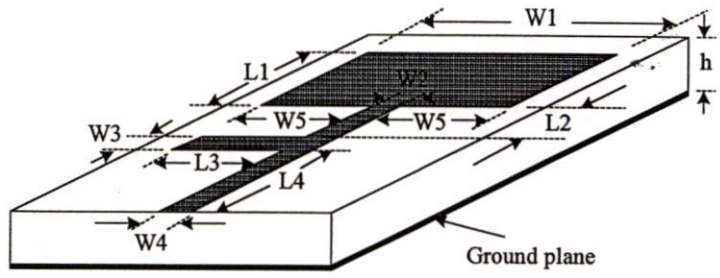


Fig.2 Energy band diagram of gold doped silicon.

As shown in fig. 3, the dimension of the designed microstrip patch antenna with an operating frequency 10 GHz is demonstrated. The input impedance of the antenna at the feeding points is 50 Ω to match the input and output. The return loss of the microstrip patch antenna was calculated by the electromagnetic field simulator at 10 GHz.



Substrate
$\varepsilon_r = 11.8$, $\sigma = 4.513\times10^{7}$ (S/m)
h = 0.38 (mm), $t = 0.2\times10^{-3}$ (mm)

Characteristics
f = 10 (GHz)
Zin = 50.770 – j0.677 (Ω)
Γ = –39.847 (dB)

Design
L1 = 4.2920 (mm)
L2 = 1.32335 (mm)
L3 = 3.3847 (mm)
L4 = 10.0000 (mm)
W1=5.3240 (mm)
W2=0.3061 (mm)
W3=0.3061 (mm)
W4=0.3061 (mm)
W5=2.50895 (mm)

Fig.3 The dimension of the microstrip patch antenna.

The computed S-parameters are shown in Fig. 4.

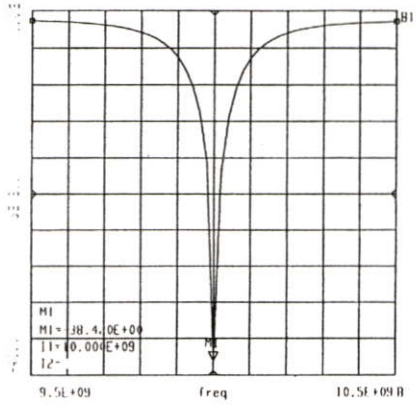


Fig.4 The S-parameter characteristics of microstrip patch antenna.

Experiment and results

The monolithic microstrip patch antenna was designed by using the gold doped silicon substrate, which has the resistivity $\rho = 100\ \Omega\cdot cm$. When gold is doped into n-type silicon by using semiconductor process, so that resistivity of the sample becomes highly change to $10^{6}\ \Omega\cdot cm$ by gold diffusion. The monolithic microstrip patch antenna has specification as:

Relative permittivity (ε_r) = 11.8
Thickness of the substrate (h) = 0.38 mm
Thickness of the conductor (t) = 0.2×10^{-3} mm
Conductivity (σ) = 4.513×10^{7} S/m

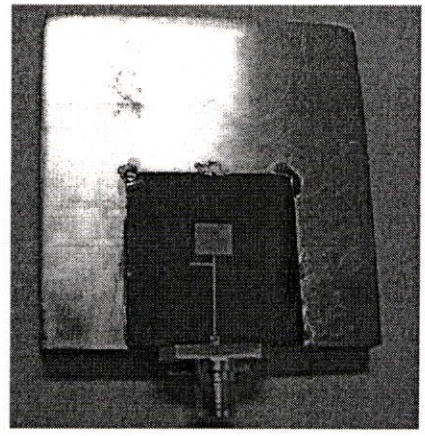


Fig.5. The MMPA on a silicon substrate

An experimental set-up for the measurements of the demonstrated microstrip path antenna characteristics are shown in fig.5. The measurement was carried out in an anechoic chamber. The radiated electric field from the fabricated microstrip patch antenna settled on the turn table was received by the standard gain horn antenna. The distance between the microstrip patch antenna and the standard gain horn antenna was about 1.5 m. The received signal was observed using a spectrum analyzer.

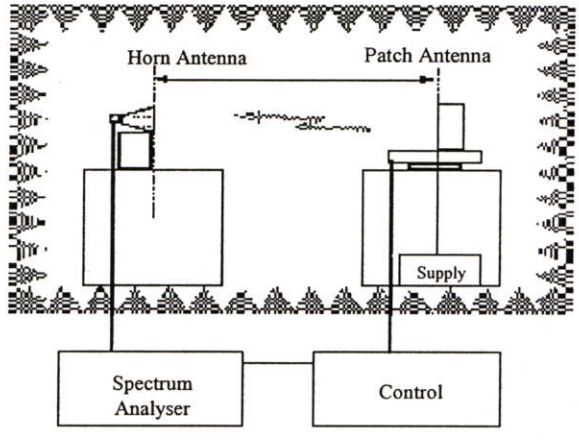


Fig.6 The experimental set-up.

As shown in fig. 7, the spectrum of the received signal from the spectrum analyzer with the center frequency of 10.65 GHz is demonstrated.

As shown in fig.8, the measured E-plane radiation pattern and the calculated pattern of the microstrip patch antenna were compared. The dot line shows the measured value and the solid line shows the computed value.

As shown in fig.9, the measured H-plane radiation pattern and the calculated pattern of the microstrip patch antenna were compared. The dot line shows the measured value and the solid line shows the computed value.

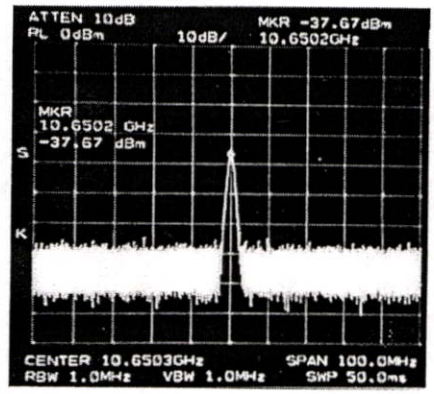


Fig.7 Observed spectrum of the MMPA on a silicon substrate.

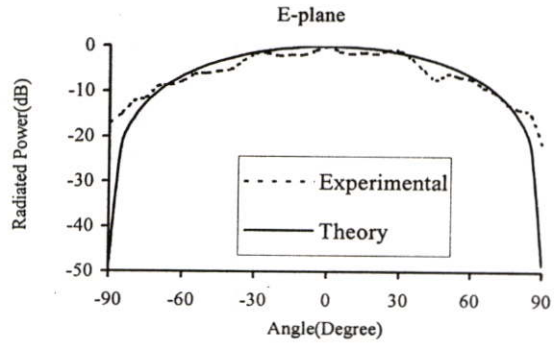


Fig.8 The E-plane radiation pattern of the MMPA

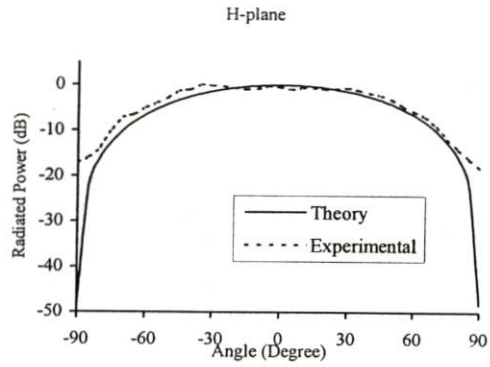


Fig.9 The H-plane radiation pattern of the MMPA

References

[1] H. Kimura, T. Kurosu, Y. Akiba and M. Iida, Appl. Phys. A53 (1991) 194.

[2] H. Kimura, K. Kasai, Tateki Kurosu and M. Iida "Spike Current Response in Gold Doped Silicon," Proceedings of the RESTECS'96, pp. E54-E57, Jury 1996.

[3] P. Tangtisanon, S. Promwong, K. Hayata, T. Goi, H. Shiomi and S. Kawasaki "Active Integrated Antenna Composed of Patch Resonator in Feedback Loop," Proceedings of TJSAP'97, pp. 127-131, May 1997.

[4] I. J. Bahl, P. Bhartia "Microstrip Antennas," Artech House, 1982.

Proceedings of the 1997 Thailand-Japan Joint Symposium on Antennas and Propagation (TJSAP'97)

May 21-22, 1997
KMITL, Bangkok, Thailand

Cosponsored by

IEICE Technical Group of Antennas and Propagation
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Chulalongkorn University
IEEE AP-S Tokyo Chapter
IEEE MTT/AP/ED Thailand Chapter

社団法人 電子情報通信学会
THE INSTITUTE OF ELECTRONICS,
INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

信学技報
TECHNICAL REPORT OF IEICE.
A・P97-41 (1997-05)

Active Integrated Antenna Composed of Patch Resonator in Feedback Loop

Prakit Tangtisanon, Sathaporn Promwong, Kazuki Hayata,Tomoyuki Goi*, Hidehisa Shiomi*, and Shigeo Kawasaki**

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Department of Industrial Technology
Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

**Tokai University*
Department of Communications Engineering
1117 Kita-Kaname, Hiratsuka, Kanagawa 259-12 Japan

ABSTRACT

In this paper, an active integrated antenna consisting of a parallel feedback FET oscillator and a patch antenna is reported. In this case, the patch antenna as a resonator was incorporated into oscillator feedback loop to enhance stability of an operation frequency, namely for the high Q status. Two slot apertures were embedded in the bottom of the patch resonator and electromagnetically coupled with microstrip feed lines. An observed spectrum and an antenna pattern were also shown and discussed in the text.

Introduction

In the microwave and millimeter-wave engineering, a personal communication system and a multi-media system are growing interest. In order to realize these systems, technologies for multi-function, high performance, small size, light weight and low cost are requested. Among many technologies, the quasi-optical technique is one of the most suitable technologies for coping with these requirements.

Essentially, the quasi-optical and active integrated antenna techniques are demonstrated for high power generation by power combining from solid state devices which only have small capability of generation of millimeter-waves[1]. Recent research works seem to be focused on this topic on behalf of military-use oriented application. However, for civil-use oriented applications such as an indoor wireless LAN system and an automobile collision avoidance radar[2], relatively medium output power is requested. Due to the advantage of the active integrated antenna[3], the small-sized and light-weighted system with the medium power can be realized with low cost. In addition, from the view point of the executive application, the quasi-optical and active integrated antenna techniques are strongly required to realize a beam control and high stability of operation[4].

For the beam control, adjacent oscillator circuits in the array should be desired in the condition of constant phase progress. In order to obtain this situation, the external control signal is inserted into the array circuit as with a simple configuration as possible. When the parallel feedback type oscillator in the active integrated antenna with appropriate injection mechanism is used, the control signals can be inserted without a complex circuit topology.

In this paper, an active integrated antenna with a patch radiator resonator in the oscillator parallel feedback loop is described in the stacked fashion. The oscillator feedback loop is coupled through two slot apertures with the patch antenna, and has the adequate circuit pattern to incorporate a coupler for the injection signal from the external source. The design method and experimental results are discussed in the text.

Configuration and Design

The structure of the active integrated antenna demonstrated here are shown in Fig. 1. It consists of the

circuit part, the coupling slot part and the antenna part. The parallel feedback loop of the oscillator couples with the patch antenna through the two slot apertures. Therefore from the other view point, the patch antenna improves the stability of the oscillation frequency and radiates the RF power into the free space, due to the nature of a resonator with radiation loss.

The equivalent circuit of this structure is shown in Fig. 2. The demonstrated active integrated antenna is constructed by the parallel feedback type oscillator across the patch antenna in the oscillator loop. The patch antenna is equivalent to the L-C parallel resonator circuit with the radiation loss, Rrad. Therefore, it works two functions of the stabilizer for the oscillation frequency and the radiator.

In order to design the active integrated antenna with the parallel feedback, the design procedure was divided into two steps, the antenna design and the oscillator design. At first, the patch antenna was designed with an operating frequency of 10 GHz, and as a part of the parallel feedback type active integrated antenna with two feed points. The input impedance of the antenna at the feeding points should be 50 Ω to match the input and the output of the FET parallel feedback oscillator and the transmission coefficient between the two feeding points via the patch antenna should be settled with the value in which the oscillation is started. In Fig. 3, the dimension of the designed patch antenna is indicated. The return loss of the patch antenna was calculated by the electromagnetic field simulator with 9 dB at 10 GHz. Therefore, the matching network for the 50 Ω load was added in the antenna feed circuit. The computed S-parameters are shown in Fig. 4.

As the second step, using the S-parameters of the antenna part, the oscillator design was carried out. The electrical length of the feedback loop included the length between the two feeds of the patch antenna was settled to the $n\lambda_g$(n is integer). In order to start up the oscillation, the small signal operation was investigated. The amplitude and the phase characteristics of the ideal directional coupler at the reference point are shown in Fig. 5. From Fig. 5, it is found that the amplitude is more than 0 dBm at 10 GHz and the phase is zero at 10 GHz. Therefore, including the result from the step one of the antenna and feed line configuration, investigated the parallel feedback type active integrated antenna can operate at 10 GHz.

Experiment and Consideration

According to the design concept described above, the active integrated antenna with the parallel feedback was fabricated. The substrate used was a glass crossed Teflon substrate (ARLON Inc. DICLAD880-0303317) with the relative permittivity of 2.17 and the substrate thickness of 0.762 mm. The FET used was a package-type low-noise HEMT (MITSUBISHI MGF4314D).

The photographs of the fabricated active integrated antenna are shown Fig. 6. In Fig. 6, (a) is the oscillation circuit part, (b) indicates the coupling slot part which is reverse side of the circuit part, and (c) shows the antenna part of the patch. The reverse side of the antenna part has no conductor because the conductor embedding the two slot in the circuit part works as the common ground plane of the patch antenna. As one of good features, the common ground plane separates the unnecessary radiation of the circuit part from the radiation of the antenna part. The substrates of the circuit and that of the patch were stacked by the glue as shown in Fig. 6(d).

An experimental set-up for the measurements of the demonstrated active integrated antenna characteristics are shown in Fig. 7. The measurement was carried out in a anechoic chamber. The radiated electric field from the fabricated active integrated antenna settled on the turn table was received by the standard gain horn antenna. The distance between the active integrated antenna and the standard gain horn antenna was about 1.6 m. The received signal was observed using a spectrum analyzer.

The fabricated active integrated antenna operated at 9.5 GHz with the gate-source voltage (Vgs) of -0.15 V and the drain-source voltage (Vds) of 2.0 V and the drain current (Ids) of 10 mA. The receiving power from the active integrated antenna was -35 dBm including the cable loss. The causes of the low receiving power may be due to the unexpected radiation from the circuit and the coupling loss at the two slot apertures. It is believed that the receiving power of the parallel feedback antenna can increase due to solve these problems.

In Fig. 8, the spectrum of the receiving signal from the spectrum analyzer with the center frequency of 9.498 GHz and the frequency span of 10 MHz was shown. It seems that the stability for driving is good because of the phase noise decrease by the resonator function of the patch with the quality factor Q of 170

at 10 GHz. The maximum tuning range of the operation frequency was -10 MHz by the gate bias tuning with the Vds of 3.5 V. Therefore, it is believed that the patch antenna works as the frequency stabilizer for the active integrated antenna with the patch resonator in the parallel feedback loop.

As shown in Fig. 9, the measured E-plane radiation pattern and the calculated pattern of the active integrated antenna were compared. The plots indicate the measured value and the solid line shows the computed value. From its observation, the measured pattern didn't good agree with the calculated pattern from a typical patch antenna. Because of the radiation power from the patch antenna didn't separate from the unnecessary radiation power from the circuit by the common ground plane. In order to avoid this problem the common ground plane should be larger than the present structure.

Conclusion

In this paper, the design method and the experimental results of the active integrated antenna with the radiating patch resonator in the parallel feedback loop was demonstrated. The design was carried out using both electromagnetic simulator and circuit simulator. The fabricated active integrated antenna operated at 9.5 GHz and its measured receiving was -35 dBm. The measured radiation pattern from the active integrated antenna showed good agreement with the computed antenna pattern. It is believed that the active integrated antenna demonstrated here is used to realize the small sized active integrated antenna array.

References

[1] De Lisio, M.P., S.W. Duncan, Der-wei Tu, S. Weinreb, Chen-Ming Lju, and D.B. Rutledge, "A 44-60 GHz monolithic pHEMT grid amplifier, MWSYM 96, pp. 1127-1130 vol.2.

[2] Y. Takimoto, "Recent Activities on Millimeter Wave Indoor LAN System Development in Japan", The 1995 IEEE MTT-S Int'l Microwave Symposium, Orlando, FA, May 1995, pp 405-408.

[3] S. Kawasaki and T. Itoh, "Quasi-Optical Planar Arrays with FET's and Slots", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 41, pp. 1838-1844.

[4] M. Kaneko, T. Goi, M. Tanaka and S. Kawasaki, "A 3x3 Strong Coupling Quasi-Optical Array with the Stable In-Phase Mode by Dielectric Resonator",ISAP'96, Chiba, Japan, Sep. 1996, pp. 133-136.

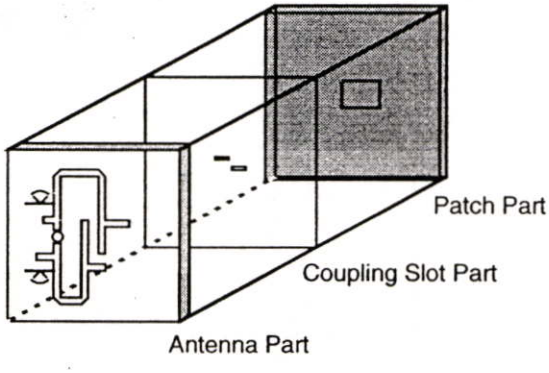


Fig. 1 The configuration of the active integrated antenna

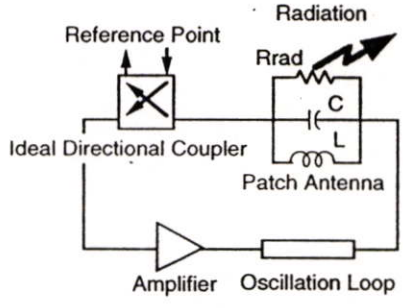


Fig. 2 The equivalent circuit of the active integrated antenna

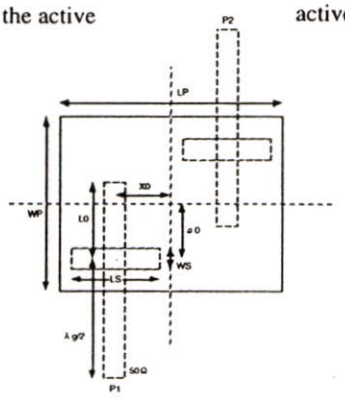


Fig. 3 The dimension of the patch antenna

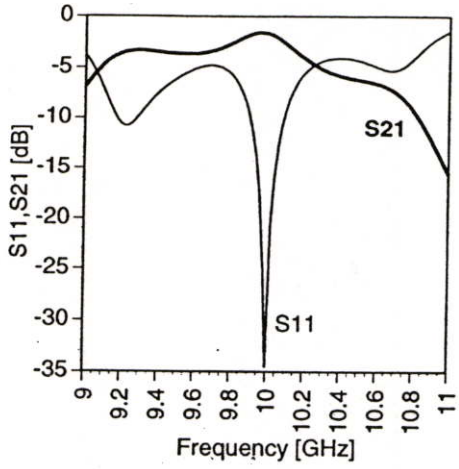


Fig. 4 The S-parameter characteristics of the patch antenna

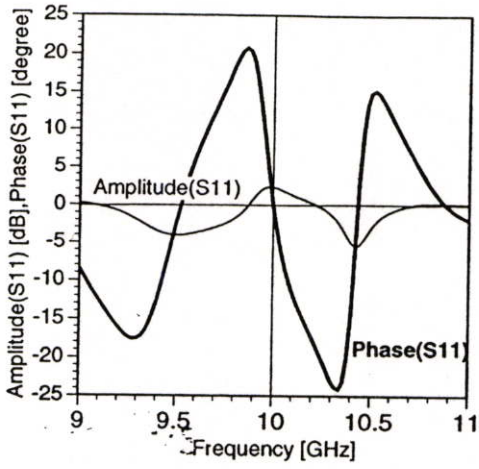
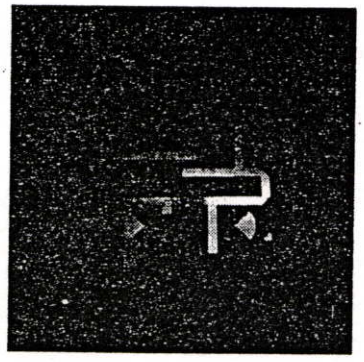
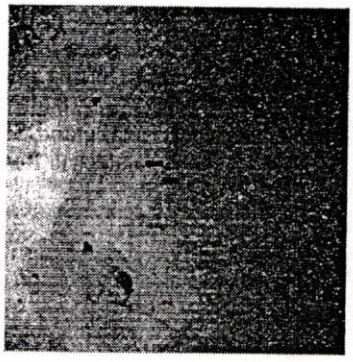


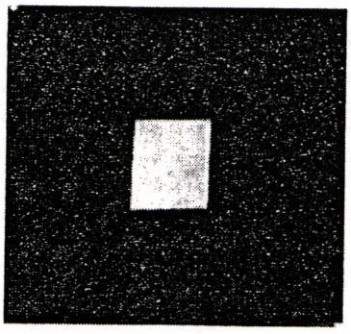
Fig. 5 The amplitude and phase characteristics of the ideal directional coupler at the reference point



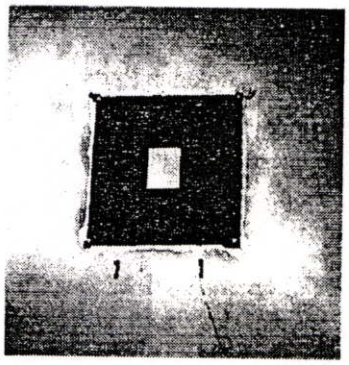
(a) The Circuit part



(b) The Common Ground plane with two slot apertures



(c) The Patch antenna part



(d) The Stacked patch antenna part on the common ground plane.

Fig.6 The fabricated active integrated antenn:

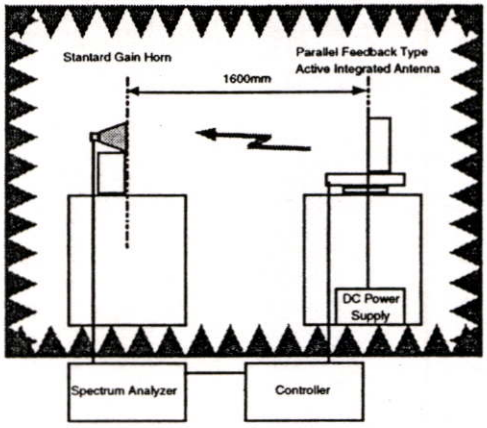


Fig. 7 The Experimental set-up

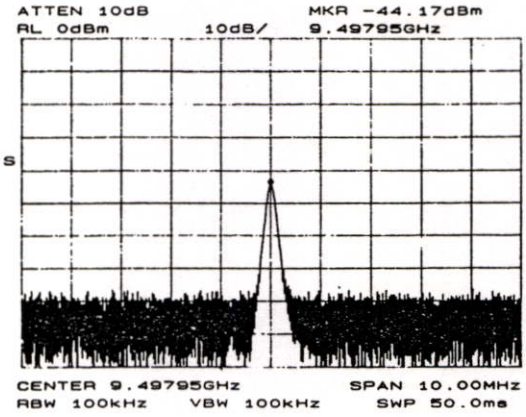


Fig. 8 The Spectrum of the active integrated antenna

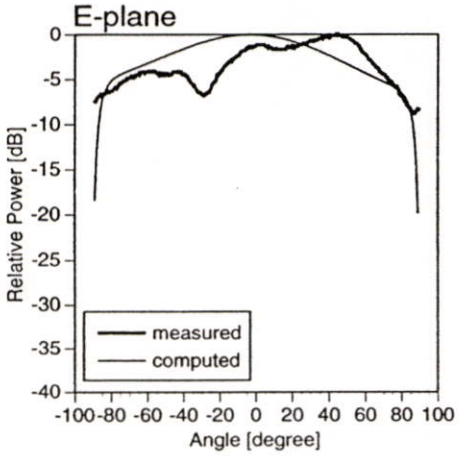


Fig. 9 The Radiation pattern of the active integrated antenna

ประวัติผู้เขียน

นายสถาพร พรหมวงศ์ เกิดเมื่อวันที่ 15 เมษายน 2509 ที่จังหวัดเชียงใหม่ สำเร็จการศึกษาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต (เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2536 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (อิเล็กทรอนิกส์) จากมหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ ปีการศึกษา 2533 และประกาศนียบัตรวิชาชีพ (อิเล็กทรอนิกส์) ปีการศึกษา 2530

ในระหว่างการศึกษาระดับปริญญาโท มีบทความตีพิมพ์ในประเทศและต่างประเทศรวมทั้งสิ้น 13 บทความ ภาษาไทย 6 บทความ และภาษาอังกฤษ 7 บทความ

ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ นอกเหนือจากวิทยานิพนธ์

1. Tomoyuki Goi, Yasuaki Tomioka, Kazuki Hayata, **Sathaporn Promwong**, Prakit Tantisanon and Shigeo Kawasaki, "3-Element Linear Active Integrated Antenna Arrays with a Slot Shrunk by a Double Layered Substrate," IEEE Antenna and Propagation Society International Symposium, pp. 1958-1961, July 1997.
2. **สถาพร พรหมวงศ์**, มนต์ชัย แช่มช้อย, ณัฐพล สุทธินนท์ ประกิจ ตังติสานนท์, Tomoyuki Goi, and Shigeo Kawasaki, " การลดขนาดร่องของสายอากาศแอกทีฟแบบแถวลำดับเชิงเส้นขนาด 2 องค์ประกอบด้วยการทำวัสดุฐานรองเป็นสองชั้น," การประชุมการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 20, หน้า 193-197, พฤศจิกายน 2540.
3. พนารัตน์ ระวิวรรณ, พรรณระวี ภู่พัฒนะกุล, ประกิจ ตังติสานนท์, อุทัย ศรีธีระวิโรจน์ และ **สถาพร พรหมวงศ์**, "การศึกษาคุณสมบัติของแบบแผนคลื่นของท่อนำคลื่น NRD," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21, หน้า 525-528, พฤศจิกายน 2541.
4. มนต์ชัย แช่มช้อย, **สถาพร พรหมวงศ์**, อุทัย ศรีธีระวิโรจน์, และ ประกิจ ตังติสานนท์, "ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่ารีแอกแตนซ์ที่มีต่อวงจรควอไซออปติคอลเฟตออสซิลเลเตอร์," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21, หน้า 612-615, พฤศจิกายน 2541.
5. พิชญ สุพรรณกุล, ประกิจ ตังติสานนท์, อุทัย ศรีธีระวิโรจน์ และ **สถาพร พรหมวงศ์**, "การวิเคราะห์ท่อนำคลื่นแบบไม่สม่ำเสมอโดยวิธี ไฟไนท์-ดิฟเฟอร์เรนซ์ ไทม์-โด

6. **สถาพร พรหมวงศ์**, มงคล ยศสุนทร, ณัฐพล จินดา, ประกิจ ตังติสานนท์ และ Shigeo Kawasaki," สายอากาศรวมแบบแอกทีฟสำหรับระบบการสื่อสารส่วนบุคคล," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21, หน้า 620-623, พฤศจิกายน 2541.
7. **สถาพร พรหมวงศ์**, ยรรยง ซุงรัมย์, ชวลิต เบญจางคประเสริฐ, อุทัย ศรีธีระวิโรจน์ และ ประกิจ ตังติสานนท์, "ต้นแบบสายอากาศแอกทีฟแบบแถวลำดับ 3 องค์ประกอบแถบความถี่เอ็กซ์ โดยใช้เทคนิคควอไซออปติคอล," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21, หน้า 624-627, พฤศจิกายน 2541.
8. Panarat Rawiwan, Pichaya Supanakoon, **Sathaporn Promwong** and Prakit Tangtisanoon, "Measurement of Nonradiative Dielectric Waveguide Using Difference Excitation," Thailand-Japan Joint Symposium on Microwaves 1999, September 1999.
9. Nattapon Chinda, Monchai Chamchoy, **Sathaporn Promwong** and Prakit Tangtisanoon, "10 GHz LNA with Simultaneous Low Input VSWR by Using Series Feedback Technique," Thailand-Japan Joint Symposium on Microwaves 1999, September 1999.
10. **Sathaporn Promwong**, Jun-ichi Takada, Kazuki Hayata, Shin-ya Tahata, Naoki Ohkubo, Harunobu Seita and Shigeo Kawasaki, " A Microstrip Patch Antenna on a Semi-insulated Si Substrate," Thailand-Japan Joint Symposium on Microwaves 1999, September 1999.
11. **Sathaporn Promwong**, Prakit Tangtisanoon, Jun-ichi Takada, Shigeo Kawasaki, "A Monolithic Patch Antenna on Semi-insulated Si Substrate for Active Integrated Antenna," Ladkrabang Engineering Journal, Vol. 16 No. 3 August 1999.

รางวัลทุนการศึกษา

1. ได้รับทุนจากมูลนิธิเพื่อการศึกษาคอมพิวเตอร์และการสื่อสาร (C&C)
2. โครงการความร่วมมือระหว่างสถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบังกับมหาวิทยาลัยโตไก ดูงานวิจัย ณ ประเทศญี่ปุ่น ด้วยทุนประเภท 2
3. โครงการความร่วมมือระหว่างไทย-ญี่ปุ่น (NRCT-JSPS) ดูงานวิจัยที่ประเทศญี่ปุ่นปี พ.ศ. 2541
4. ทบวงมหาวิทยาลัย ทุนประเภท ก. ดูงานวิจัย ณ ประเทศญี่ปุ่น ปี พ.ศ. 2540

5. มูลนิธิเพื่อการศึกษาคอมพิวเตอร์และการสื่อสาร มอบทุนเพื่อการศึกษาตลอดระยะเวลาระหว่างการศึกษาในระดับปริญญาโท

สถานที่ทำงาน

ภาควิชาเทคนิคอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประสบการณ์การทำงาน

4 ปี

ตำแหน่งหน้าที่การทำงานปัจจุบัน

ปี พ.ศ. 2537 เข้ารับราชการในตำแหน่ง อาจารย์ 3 สังกัดคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทบวงมหาวิทยาลัย และปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ 4 สังกัดคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง