สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองกระจก สำหรับสายอากาศรวมแบบแอกทีฟ

A MICROSTRIP PATCH ANTENNA ON A GLASS SUBSTRATE FOR ACTIVE INTEGRATED ANTENNA

นายณรงค์ศักดิ์ มโนสิทธิชัย

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 62879
วัน,เดือน,ปี 23 ส.ค. 2549
b 11633127
เ.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A MICROSTRIP PATCH ANTENNA ON A GLASS SUBSTRATE FOR ACTIVE INTEGRATED ANTENNA

Mr. NARONGSAK MANOSIITICHAI

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF

THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHELOR IN DEPARTMENT OF INFORMATION ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองกระจก สำหรับสายอากาศรวมแบบแอกทีฟ
ชื่อนักศึกษา	นายณรงค์ศักดิ์ มโนสิทธิชัย รหัสประจำตัว 46015665
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ. นิกร สุขุตมตันติ อาจารย์สถาพร พรหมวงศ์
ระดับการศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ
ภาควิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ
ปีการศึกษา	2548

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้รับปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับความเห็นชอบจากอาจารย์ที่ปรึกษาเป็นที่เรียบร้อยแล้ว

.....

รศ. นิกร สุขุตมตันติ

อาจารย์ที่ปรึกษา

.....

อาจารย์สถาพร พรหมวงศ์

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองกระจก สำหรับสายอากาศรวมแบบแอกทีฟ
ชื่อนักศึกษา	นายณรงค์ศักดิ์ มโนสิทธิชัย รหัสประจำตัว 46015665
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ. นิกร สุขุดมดันติ อาจารย์สถาพร พรหมวงศ์
ระดับการศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ
ภาควิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ
ปีการศึกษา	2548

บทคัดย่อ

โครงงานนี้นำเสนอสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองกระจก สำหรับสายอากาศรวมแบบแอกทีฟ ในวัสดุฐานรองจะเป็นทองแดงบนกระจก ด้วยกระบวนการทางเซมิ-คอนดัคเตอร์ ซึ่งเป็นวัสดุฐานรองใหม่สำหรับสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป โดยเปรียบเทียบกับการสายอากาศไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ ซึ่งเป็นวัสดุฐานรองที่มีคุณสมบัติดีสำหรับสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป อีกทั้งยังง่ายต่อการสร้างเข้าด้วยกันกับวงจรรวมแอกทีฟ นอกจากนี้แล้ววัสดุฐานรองแบบซิลิคอนโดปทองคำยังช่วยให้ประสิทธิภาพและปรับปรุงอัตราการขยายของสายอากาศเพิ่มขึ้น รวมทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานบนรถยนต์ (Car) หรือการเชื่อมโยงผ่านย่านไมโครเวฟ (Microwave Link) ได้ ในงานวิจัยนี้จะอธิบายทฤษฎีและหลักการใช้ และทำการวัดคุณสมบัติการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ได้ สร้างขึ้นในย่านความถี่เอกซ์ (10 GHz) เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างรูปแบบที่ได้จากการวัดกับทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	A Microstrip Patch Antenna On A Glass Substrate For Active Integrated Antenna
Student	Mr. Narongsak Manosittichai ID. 46015655
Advisor	Mr. Sathaporn Promwong
	Assoc. Prof. Nikorn Sukutamatunti
Graduate Level	Bachelor Degree of Information Engineering
Department	Information Engineering
Academic Year	2005

Abstract

This project present a microstrip patch antenna on a glass substrate for active integrated antenna. Glass substrate doped with copper by the semi-conductor process which substrate is the new technology for a microstrip patch antenna also compare with a microstrip patch antenna on a gold dope silicon substrate. This substrate yields good performance for the microstrip patch antenna and it is easy to fabricate with the active integrated antenna. In addition , a gold dope silicon substrate increased efficiency and improved gain antenna. Also its make useful for car or microwave link. Theory and measurement for the dispersion characteristic of the fabricated antenna for X-band (10 GHz) was shown in the project. The measurement result compared with the theoretical ones were demonstrated as well.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี ผู้เขียนน้อมจิตและกายใจ กราบขอบพระคุณ ท่านอาจารย์ สถาพร พรหมวงศ์ และรองศาสตราจารย์นิกร สุขุตมตันติ เป็นอย่างสูง ที่ได้ช่วยให้คำแนะนำ และคอยเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ในการแนะนำศาสตร์วิชาด่างๆ อีกทั้งยังเป็นผู้ให้ความเมตตาในการตรวจทานต้นฉบับของปริญญานิพนธ์เล่มนี้ ทำให้ผู้เขียนสามารถทำงานวิจัยจนประสบความสำเร็จตามเป้าหมายที่วางไว้

ขอกราบขอบพระคุณทุกท่านที่ได้มีส่วนช่วยเหลือในการทำปริญญานิพนธ์เล่มนี้

- Prof. Kiyomichi Araki form Department of Electrical & Electronics Tokyo Institute of Technology, Japan ที่ได้ให้ความรู้ทางด้าน Wireless Communication Engineering
- นายรังสรรค์ เมืองเหลือ เจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ที่คอยช่วยเหลือในการทำวิจัยโครงงานในครั้งนี้
- พี่ๆ ห้อง UWBRS-LAB และ WIS-LAB ที่คอยช่วยให้คำปรึกษา และคอยแนะนำในสิ่งที่ดีๆ ตลอดเสมอมา
- เพื่อนๆ ทุกคน ที่คอยให้กำลังใจและให้คำปรึกษาที่ดีต่อ ผู้เขียนตลอดเสมอมา

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ทำให้ผู้เขียนมีลมหายใจ และมีชีวิตขึ้นมา อีกทั้งยังช่วยให้ ทุนสนับสนุนและให้กำลังใจในการทำวิจัยโครงงานในครั้งนี้ จนประสบความสำเร็จได้

ขอกราบขอบพระคุณ สถาบันวิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ที่เป็นสถานที่ในการสร้างและอนุเคราะห์ทางด้านอุปกรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ ที่เป็นสถานที่ที่ให้ผู้เขียนมีโอกาสได้ศึกษา และทำวิจัยโครงงานในครั้งนี้ตลอดเวลา นี้

ณรงค์ศักดิ์ มโนสิทธิชัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ก

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....ข

กิตติกรรมประกาศ.....ค

สารบัญ.....ง

สารบัญตาราง.....ซ

สารบัญภาพ.....ฌ

สัญลักษณ์.....ฎ

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 บทนำ.....1

1.2 วัตถุประสงค์ในการทำปริญญานิพนธ์.....2

1.3 หลักการใหม่ในปริญญานิพนธ์.....2

1.4 โครงงานประกอบปริญญานิพนธ์.....3

บทที่ 2 สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป.....6

2.1 บทนำ.....6

2.1.1 ข้อดีและข้อเสียของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป.....7

2.1.2 การนำไปประยุกต์ใช้งาน.....8

2.2 คุณสมบัติพื้นฐานของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป.....8

2.3 การป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป.....10

2.4 การแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป.....12

2.5 ตัวแปรแสดงคุณภาพ (quality factor) แบนด์วิดท์ และประสิทธิภาพ.....13

2.6 บทสรุป.....16

บทที่ 3 ทฤษฎีซิลิคอนโดปทองคำ.....17

3.1 บทนำ.....17

3.2 ทฤษฎี.....17

3.2.1 สัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมทองคำในซิลิคอน.....18

3.2.2 ระดับพลังงานของอะตอมทองคำในซิลิคอน.....21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.3 ค่าพิกัดความต้านทานของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยทองคำ.....22
3.3 การวัดพารามิเตอร์ของวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทอง.....22
3.3.1 การวัดค่าพิกัดความต้านทาน.....22
3.3.2 การวัดค่าความต้านทานแผ่น.....24
3.4 สรุป.....26

บทที่ 4 ทฤษฎีและหลักการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป.....27
4.1 กล่าวนำ.....27
4.2 การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองคาวิตี้.....27
4.3 การวิเคราะห์ด้วยวิธีโมเมนต์.....39
4.3.1 ควอไซกรีนฟังก์ชัน.....39
4.4 การสูญเสียในวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ.....42
4.5 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่น.....44
4.6 ขั้นตอนการออกแบบ.....45
4.6.1 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริป
วัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ.....45
4.6.2 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริป
วัสดุฐานรองกระจก.....53

4.7 สรุป.....59

บทที่ 5 กระบวนการสร้างสายอากาศ.....60
5.1 กระบวนการสร้างสายอากาศ.....60
5.1.1 ขั้นตอนการเตรียมกระจกต้นแบบ.....60
5.1.2 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นซิลิคอน.....61
5.1.3 กระบวนการเคลือบสารทองคำ.....60
5.1.4 กระบวนการแพร่อะตอมทองคำ.....65
5.1.5 ขัดผิวกำจัดเศษทองคำ.....66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.6 กระบวนการโฟโต้ลิโทกราฟฟี....66
5.1.7 การฉายแสงอุลตร้าไวโอเลต....68
5.1.8 การล้างสารไวแสง....69
5.1.9 การเคลือบสารทองคำบนลวดลาย....70
5.1.10 การลอกฟิล์มด้วยวิธีการ Lift off....70
5.1.11 การซินเตอร์ (Sintering)....71
5.1.12 การเชื่อมเข้ากับตัวต่อ....71
5.2 สรุป....73

บทที่ 6 การทดลองและผลการทดลอง....74
6.1 การทดลองและผลการทดลอง ของสายอากาศไมโครสตริป
บนวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ....74
6.1.1 การทดลองวัดพารามิเตอร์ของชิ้นสาร....74
6.1.2 การทดสอบความถี่รีโซแนนท์ของสายอากาศ....75
6.1.3 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น....77
6.2 การทดลองและผลการทดลอง ของสายอากาศไมโครสตริป
บนวัสดุฐานรองกระจก....79
6.2.1 ขั้นตอนการทดลอง....79
6.2.2 ผลการทดลอง....80

บทที่ 7 บทสรุป....83
7.1 การศึกษาและวิเคราะห์....84
7.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา....84

เอกสารอ้างอิง....86

ภาคผนวก
ภาคผนวก ก การคำนวณขนาดของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป
รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า....87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข การสร้างสายอากาศแผ่นไมโครสตริปแบบโมโนลิตริก
บนวัสดุฐานรองซิลิคอน.....89
ภาคผนวก ค การวัดหาค่าพิกัดความต้านทาน.....96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 การเปรียบเทียบสายอากาศที่มีโครงสร้างเป็นระนาบเรียบชนิดต่างๆ.....6

3.1 ค่า correction สำหรับโฟร์พอยท์โพรบ เมื่อใช้วัดแผ่นบาง.....25

3.2 Correction factor ของ ρ เมื่อ t ไม่น้อยกว่า S มาก.....26

4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตอิมพีแดนซ์ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับและความถี่.....51

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตอิมพีแดนซ์ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับและความถี่.....56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

2.1 สายอากาศไมโครสตริปและระบบพิกัด....9
2.2 รูปร่างของแผ่นสายอากาศไมโครสตริปแบบต่างๆ....9
2.3 การป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศไมโครสตริป....10
2.4 วงจรสมมูลย์ของการป้อนสัญญาณตามรูปที่ 2.3....11
2.5 ประสิทธิภาพและแบนด์วิดท์ต่อความสูงของวัสดุฐานรองที่ความถี่รีโซแนนซ์ของ
สายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยใช้วัสดุฐานรองที่แตกต่างกัน 2 ชนิด....15
3.1 ตัวอย่างโครงสร้างซิลิคอนโตปทองคำ....18
3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมของธาตุชนิดต่างๆ....19
3.3 การแพร่ของอะตอมทองคำเข้าไปอยู่ระหว่างอะตอมซิลิคอน....20
3.4 Solid Solubility ของสารเจือชนิดต่างๆ ในซิลิคอน....20
3.5 ไดอะแกรมระดับพลังงานของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมทองคำ....21
3.6 การวัดค่าพิกัดความต้านทานโดยวิธีโฟร์พอยท์โพรบ....23
4.1 การแผ่กระจายประจุและความหนาแน่นของกระแสบนแผ่นสายอากาศไมโครสตริป....27
4.2 โครงสร้างทางเรขาคณิตของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า....28
4.3 โครงสร้างของสนามสำหรับสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า....32
4.4 ความหนาแน่นกระแสสมมูลบนด้านทั้ง 4 ของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า....33
4.5 ร่องสำหรับแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า
และกระแสแม่เหล็กสมมูล....35
4.6 แบบรูปในสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสำหรับแผ่นไมโครสตริปร่องเดี่ยว
และทั้งสองร่อง....35
4.7 ความหนาแน่นกระแสบนร่องที่ไม่มีการแผ่กระจายคลื่นสำหรับสายอากาศไมโครสตริป
รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า....36
4.8 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปและวัสดุฐานรอง....40
4.9 องค์ประกอบ Q เปรียบเทียบกับสภาพความต้านทานของวัสดุฐานรอง....43
4.10 แบบรูปการแผ่กระจายสนามไฟฟ้าบนวัสดุฐานรองที่ ρ ต่างกัน....44
4.11 สัมประสิทธิ์การสะท้อนบนวัสดุฐานรองที่ ρ ต่างกัน....45
4.12 อัตราการขยายของสายอากาศและประสิทธิภาพเทียบกับสภาพความต้านทาน....45
4.13 โครงสร้างของสายอากาศแผ่น....47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.14 โครงสร้างในส่วนของแมตซ์ชิ่ง....47
4.15 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศเมื่อนำสายอากาศแผ่นมารวมเข้ากับวงจรในส่วนของแมตซ์ชิ่งเรียบร้อยแล้ว....48
4.16 ขนาดของสายอากาศและส่วนที่แมตซ์ชิ่งหลังการออกแบบเรียบร้อยแล้ว....49
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตอิมพีแดนซ์กับความถี่ (วัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ)....49
4.18 S_{11} ที่ได้จากโปรแกรมโมเมนตัม (วัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ)....49
4.19 ขนาดของสายอากาศและส่วนแมตซ์ชิ่งหลังการออกแบบเรียบร้อยแล้ว....54
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตอิมพีแดนซ์กับความถี่ (วัสดุฐานรองกระจก)....55
4.21 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตอิมพีแดนซ์กับความถี่ (วัสดุฐานรองกระจก)....55
5.1 กระจกมาร์ค....60
5.2 กระบวนการสร้างของสายอากาศ....62
5.3 ภาพตัดขวางแผ่นผลึกซิลิคอน....63
5.4 ภาพตัดขวางการเคลือบสารทองคำ....63
5.5 อุปกรณ์เคลือบในสุญญากาศ....64
5.6 ภาพตัดขวางการแพร่อะตอมทองคำลงในแผ่นซิลิคอน....64
5.7 เตาแพร่อะตอมทองคำในแผ่นซิลิคอน....64
5.8 ภาพตัดขวางหลังการ Lapping....65
5.9 การขัดผิวหน้าแผ่นซิลิคอนโดปทอง....65
5.10 ขั้นตอนขบวนการโฟโต้ลิโทกราฟฟี....65
5.11 ภาพตัดขวางหลังจากเคลือบสารไวแสง....67
5.12 ภาพตัดขวางขั้นตอนExposure....67
5.13 เครื่อง Alignment Expose....68
5.14 ภาพตัดขวางหลังจาก Developer....68
5.15 ภาพตัดขวาง Au Evaporation....69
5.16 ภาพตัดขวางของชิ้นงานที่ได้หลังจากการลอกฟิล์มออกแล้ว....69
5.17 ชิ้นงานเมื่อทำการลอกฟิล์มแล้ว(ซิลิคอนโดปทองคำ)....69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

5.18 โครงสร้างภาพตัดขวางของสายอากาศที่ได้หลังการ Bonding
(ซิลิคอนโดปทองคำ).....70
5.19 สายอากาศแผ่นไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำที่เชื่อมต่อเสร็จแล้ว.....70
5.20 ชิ้นงานเมื่อทำการลอกฟิล์มแล้ว (ทองแดงบนกระจก).....71
5.21 โครงสร้างภาพตัดขวางของสายอากาศที่ได้หลังการเชื่อมต่อ (วัสดุฐานรองกระจก).....71
5.22 สายอากาศแผ่นไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองกระจกที่เชื่อมต่อเสร็จแล้ว.....72
6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของแผ่นผลึกซิลิคอน
ชนิดเอ็นที่เติมอะตอมทองคำโดปทองคำ.....74
6.2 สายอากาศแผ่นแบบโมโนลิตริกบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ.....75
6.3 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศแผ่นแบบโมโนลิตริก
บนวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ.....75
6.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสายอากาศภาย.....76
6.5 สัญญาณที่รับได้จากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม.....77
6.6 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปบน
วัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำในระนาบ (a) สนามไฟฟ้า (b) สนามแม่เหล็ก.....78
6.7 เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer)ที่ใช้ในการทดลองรุ่น HP 8510C.....79
6.8 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองกระจก.....80
6.9 ค่า SWR ของสายอากาศไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองกระจกที่ความถี่ 9.88125 GHz 80
6.10 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปบน
วัสดุฐานรองกระจกในระนาบ (a) สนามไฟฟ้า (b) สนามแม่เหล็ก.....81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์ (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 (ความถี่รีโซแนนซ์)
$f(\theta,\phi)$	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)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์	ความหมาย
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 factor (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 (สภาพยอมในอากาศว่าง)
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 (สภาพความคล่องตัวในอากาศว่าง)
Γ, Γ_{mn}	Reflection coefficients (สัมประสิทธิ์การสะท้อน)
σ	Conductivity (สภาพนำ)
Ω	Ohms (โอห์ม)
ϕ	Electrostatic Potential Azimuth angle (มุมเอซิมัทศักย์ไฟฟ้าสถิต)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์	ความหมาย
θ	Angle (มุม)
C	ความเร็วคลื่นแสง
D	ค่าคงที่การแพร่
D	สัมประสิทธิ์การแพร่
E	พลังงาน
E_A	ระดับพลังงานผู้รับ
E_a	ระดับพลังงานผู้รับ
E_C	พลังงานของแถบความนำ
E_D	ระดับพลังงานผู้ให้
E_d	ระดับพลังงานผู้ให้
E_i	ระดับพลังงานกึ่งกลางช่องว่าง
E_F	ระดับพลังงานเฟอร์มิ
E_{FAu}	ระดับพลังงานเฟอร์มิเมื่อเติมทองคำ
E_{FP}	ระดับพลังงานเฟอร์มิของสารชนิดพี
E_fn	ระดับพลังงานเฟอร์มิของสารชนิดเอ็น
E_g	พลังงานช่องว่าง
E_V	พลังงานของแถบวาเลนซ์
E_C	พลังงานแถบความนำ
E_F	พลังงานระดับเฟอร์มิ
E_G	พลังงานแถบต้องห้าม
E_I	พลังงานระดับอินทรินซิก
E_V	พลังงานแถบวาเลนซ์
J	ความหนาแน่นกระแส
N	ความหนาแน่นสารเจือ
N_A	ความหนาแน่นสารเจือผู้รับ
N_{Au}	ความหนาแน่นของอะตอมทองคำ
N_B	ความหนาแน่นสารเจือเดิม
N_C	ความหนาแน่นสารเจือในคอลเลคเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์	ความหมาย
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_s	พิกัดความต้านทานแผ่น
σ	ความนำไฟฟ้าจำเพาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 บทนำ

การวิจัยค้นคว้าในการใช้ประโยชน์จากคลื่นไมโครเวฟ (Microwave) และคลื่นมิลลิเมตร (Millimeter-Wave) มีมากขึ้น ซึ่งสายอากาศรวมแบบแอกทีฟ (Active Integrated Antenna : AIA) ได้ใช้เทคนิคควอไซออปติคอล (Quasi-Optical Technique) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมอยู่ในปัจจุบัน ด้วยจุดเด่นที่มีโครงสร้างกะทัดรัด ขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และใช้ต้นทุนต่ำ ตลอดจนมีเสถียรภาพด้านความถี่สูงและเป็นระบบการสื่อสารแบบไร้สาย

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

สำหรับจุดมุ่งหมายของการประดิษฐ์สายอากาศแบบระนาบที่ถูกป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสติปบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโคปทองคำ เพื่อเป็นการง่ายขึ้นในการรวมเข้ากับ MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) ของวงจร RF ในภาคแรก แต่อย่างไรก็ตามข้อจำกัดในการใช้กับวงจรมากๆ ยังคงต้องพิจารณาต่อไป และในปัจจุบันยังคงมีการพัฒนาเทคโนโลยีของสายอากาศขึ้นมาอย่างต่อเนื่องซึ่งได้แก่ สายอากาศแบบโมโนลิตริกที่รวมอยู่ในสายอากาศแบบแอกทีฟและการประยุกต์ไปใช้งานเช่น ระบบแลนด์ไร้สายภายใน ระบบแลนด์ไร้สายภายใน และเรดาร์ป้องกันการชนของรถยนต์

ดังนั้นจึงได้นำความรู้เกี่ยวกับสายอากาศแบบระนาบซึ่งได้แก่ สายอากาศแผ่นบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโคปทองคำ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงจุดที่มีประสิทธิภาพต่ำ, มีประสิทธิภาพในการแผ่กระจายคลื่นต่ำ และเกิดการสูญเสียเนื่องจากคลื่นผิว จากรายละเอียดข้างต้น จะเห็นถึงปัญหาหลายอย่างในการใช้งานที่ความถี่สูง และผลที่ได้จากสายอากาศแผ่นคือ มีอัตราขยายและประสิทธิภาพต่ำ ซึ่งมีสาเหตุจากการคัปปลิ้ง โพลาไรเซชัน และการที่ต่อเข้าด้วยกันหลายชิ้น แต่อย่างไรก็ตามจุดด้อยต่างๆ สามารถแก้ไขได้โดยการสร้างให้เหมาะสมโดยให้ทำงานในสารกึ่งตัวนำโดยใช้ซิลิกอนโคปทองคำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์สายอากาศส่วนใหญ่จะอาศัยทฤษฎีทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในการแก้ปัญหาต่างๆ ในปริญญานิพนธ์นี้ได้ใช้วิธีการวิเคราะห์ซึ่งได้แก่ แบบจำลองคาวิตี้และวิธีโมเมนต์ (Moment Method) และได้แสดงถึงการประดิษฐ์สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ ซึ่งเป็นวัสดุฐานรองที่ดีดังที่ได้เปรียบเทียบกับข้อมูลจากการทดลองกับการวิเคราะห์จากทฤษฎี และได้แสดงถึงการใช้อุณหภูมิสูงในการปฏิบัติการสร้าง ซึ่งมีข้อจำกัดในการทำสารซิลิคอนกับสารทองคำบริสุทธิ์เพื่อแก้ไขให้ดีขึ้น โดยได้นำมาสร้างเป็นสายอากาศ ซึ่งมีสภาพความต้านทาน (Resistivity) สูงกว่า $10^{6}\ [\Omega \cdot cm]$ ข้อมูลนี้ได้จากการวัดเปรียบเทียบกับกราฟความสัมพันธ์กระแสและแรงดันที่ได้จากทฤษฎี และการสูญเสียที่เปลี่ยนแปลงไปตามพารามิเตอร์โดยการวิเคราะห์ด้วยวิธีโมเมนต์ สำหรับสายอากาศแบบระนาบวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำได้ทำการประดิษฐ์ขึ้นจริง

อนึ่งยังได้มีการสร้างสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองกระจก ซึ่งเป็นวัสดุฐานรองชนิดใหม่ เพื่อที่จะนำมาวิจัยและพัฒนาใช้กับเทคโนโลยีสมัยใหม่ จากการสร้างสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองทั้งสองประเภทจะทำการวัดทดสอบเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดกับผลทางทฤษฎี รวมทั้งเหตุผลความแตกต่าง ได้แสดงไว้ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ครบถ้วนแล้ว

1.2 วัตถุประสงค์ในการทำปริญญานิพนธ์

จากที่กล่าวมาในต้อนต้น เป็นการแนะนำเกี่ยวกับหลักการและข้อดีของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองซิลิคอน และเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีสายอากาศ ซึ่งสาระในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษา และพัฒนาวัสดุฐานรองสำหรับสายอากาศที่มีความเหมาะสม เพื่อวิจัยหลักการเบื้องต้นของสายอากาศรวมแบบแอกทีฟ ทั้งนี้ได้นำมาใช้เป็นประโยชน์เพื่อประกอบการอธิบายแสดงทฤษฎีของสายอากาศรวมแบบแอกทีฟ และใช้เป็นอุปกรณ์ในการศึกษาทดลองให้แก่นักศึกษา อีกทั้งยังมีการประยุกต์เพื่อสร้างสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองกระจก โดยปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังที่จะให้เป็นแนวทางในการศึกษาเพื่อสร้างสรรค์และพัฒนาให้แก่นักศึกษา นำไปประยุกต์และพัฒนาสำหรับใช้งานในด้านเทคโนโลยีอีเล็กทรอนิกส์และเทคโนโลยีการสื่อสารต่อไป

1.3 หลักการใหม่ในปริญญานิพนธ์

เสนอวัสดุฐานรองใหม่สำหรับสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป โดยปกติแล้วสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปจะถูกสร้างบนวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก ก็ยังมีปัญหาเรื่องขนาดของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศอยู่แต่ในปัจจุบันนั้นมีความต้องการคุณสมบัติของสายอากาศที่มีประสิทธิภาพสูง 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 ในปริญญานิพนธ์นี้ได้ออกแบบสายอากาศ ทำงานที่ความถี่ 10 GHz ด้วยคุณสมบัติพารามิเตอร์ข้างต้น สามารถออกแบบและสร้างสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปให้มีขนาดเล็กลงได้ เมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศที่สร้างบนวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก อีกทั้งยังมีความเหมาะสมกว่าด้วย ดังนั้นด้วยกระบวนการทางเซมิคอนดัคเตอร์สำหรับสายอากาศ จึงมีความเป็นไปได้ที่จะสร้าง IC สำหรับสายอากาศได้ ซึ่ง IC สำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ถูกสร้างไปแล้ว แล้วนอกจากนี้ยังง่ายต่อการเชื่อมต่อกับ MMIC ด้วยเหตุผลที่ได้กล่าวมานี้ ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ประดิษฐ์สายอากาศแผ่นไมโครสตริป บนวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ เพื่อเป็นข้อมูลในงานวิจัยพื้นฐานสำหรับการพัฒนาไปสู่ การประดิษฐ์สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป บนวัสดุฐานรองกระจกสำหรับสายอากาศรวมแบบแอกทีฟ และเทคโนโลยี MMIC ต่อไป

1.4 โครงประกอบของปริญญานิพนธ์

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 7 บท โดยมีบทนำอยู่ในบทที่ 1 เป็นการกล่าวแนะนำข้อดีและข้อเสียของสายอากาศแบบไมโครสตริป หลักการเบื้องต้น และวัตถุประสงค์ในการทำปริญญานิพนธ์ ส่วนรายละเอียดของบทต่างๆ อีก 6 บทมีดังต่อไปนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงคุณสมบัติพื้นฐานของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป เป็นการแนะนำหลักการพิจารณาองค์ประกอบของโครงสร้าง คุณสมบัติและพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศ วิธีการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป โดยใช้สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป (Microstrip) คุณสมบัติการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป

บทที่ 3 เป็นการกล่าวถึงสารทองคำโดปแผ่นผลึกซิลิคอน ด้วยกระบวนการทางเซมิคอนดัคเตอร์ โดยการใช้ความร้อน สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายอะตอมทองคำในเนื้อสารซิลิคอนด้วยวิธีการระเหย (Evaporate) ด้วยความร้อนและการแพร่อะตอมทองคำในแผ่นผลึกซิลิคอน ระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานของอะตอมทองคำในแผ่นผลึกซิลิคอน โดยการพิจารณาเมื่อซิลิคอนเป็นชนิดอินทรินซิก และพิจารณาเมื่อเติมอะตอมทองคำ ค่าพิกัดความต้านทานของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมทองคำ พิจารณาก่อนแพร่อะตอมทองคำและหลังแพร่อะตอมทองคำลงไปในเนื้อสารซิลิคอน มีปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงของสภาพความต้านทานสูงขึ้น และหัวข้อสุดท้ายเป็นการสรุปเนื้อหาโดยรวมของบทนี้ และการเปลี่ยนแปลงของวัสดุฐานรองซิลิคอน เมื่อเติมอะตอมทองคำ

บทที่ 4 เป็นการกล่าวถึงการวิเคราะห์และขั้นตอนการออกแบบของสายอากาศแผ่นแบบไมโคร สตริปบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองและสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองกระจก เป็นการกล่าวถึงหลักการและวิธีการวิเคราะห์วัสดุฐานรองของสายอากาศและตัวสายอากาศด้วย ได้ทำการวิเคราะห์ 3 วิธี วิธีแรกเป็นการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองคาวิตี้ (Cavity Mode) และการวิเคราะห์ด้วยวิธีโมเมนต์ (MM) สำหรับกรณีวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทอง และอีกวิธีหนึ่งเป็นการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม ไมโครเวฟออฟฟิต (Microwave office) จากนั้นได้กล่าวถึงกระบวนการออกแบบวิธีการเลียนแบบ โดยการจำลองด้วยโปรแกรมโมเมนตัม (Momentum) ,โปรแกรม Microwave Design System: MDS และโปรแกรมไมโครเวฟออฟฟิต (Microwave office) และหัวข้อสุดท้ายก็จะกล่าวสรุปเนื้อหาโดยรวมของบทนี้ ในวิธีการวิเคราะห์และหลักการออกแบบ

บทที่ 5 จะได้กล่าวในกระบวนการสร้าง หลักการและขั้นตอนต่างๆ ของการสร้างสายอากาศแผ่นไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ ประกอบด้วยขั้นตอนการสร้างแต่ละกระบวนการ เช่น กระบวนการแพร่สารเจือทองคำในเนื้อสารซิลิคอน โดยกระบวนการทางเซมิคอนดัคเตอร์ โดยระเหยสารเจือทองคำด้วยความร้อน และการแพร่ (Diffusion) อะตอมทองคำลงในแผ่นผลึกซิลิคอน จากนั้นก็เป็นกระบวนการโฟโต้ลิโทกราฟฟี่ (Photolithography) จะได้กล่าวถึงวิธีการใช้สารไวแสงและทำการฉายด้วยแสงและทำการฉายด้วยแสงอัลตราไวโอเลต การพัฒนารูป (Development) และกระบวนการสุดท้ายเป็นการสร้างลวดลายของสายอากาศบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ โดยเทคนิคการ Lift off โดยน้ำยาสารเคมีเพื่อการให้สารไวแสงออก (Resist Removal) ซึ่งจะได้สายอากาศแผ่นไมโครสตริปบนฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ จากนั้นจึงทำการ ซินเตอริง (Sintering) เพื่อให้สายอากาศติดแน่นกับฐานรองและนำไปบอนดิ้ง (Bonding) ที่จุดป้อนสัญญาณของสายอากาศเพื่อทำการทดสอบและการใช้งาน

ส่วนขั้นตอนการทำสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองกระจกนั้น จะออกแบบและสร้างลวดลายสำหรับสายอากาศที่มีวัสดุฐานรองแบบกระจก โดยคำนวณตามค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลง โดยไม่ต้องมีการแพร่สารเจือเหมือนกับสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปบนฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ ในหัวข้อสุดท้ายเป็นการสรุปกระบวนการสร้างต่างๆ ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปบนฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ และสายอากาศแผ่นไมโครสตริปบนฐานรองกระจก

บทที่ 6 ได้กล่าวถึงการทดสอบและผลที่ได้จากการทดสอบสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปบนฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ และสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองกระจก การวัดค่าและทดสอบคุณสมบัติการแผ่กระจายคลื่น ของสายอากาศแผ่นแบบไมโคร สตริปบนฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ และสายอากาศแผ่แบบไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองกระจก สุดท้ายจะได้สรุปการทดลองและผลการทดลองต่างๆในบทนี้

บทที่ 7 เป็นบทสรุปและอธิบายผลที่ได้จากการสร้างสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ และสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองกระจก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป

2.1 บทนำ

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

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

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบสายอากาศที่มีโครงสร้างเป็นระนาบเรียบชนิดต่างๆ

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%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 ข้อดีและข้อเสียของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป

ข้อดีของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศชนิดอื่นที่ใช้ในย่านความถี่ไมโครเวฟ โดยมีการความถี่ใช้งานอยู่ในช่วง 100 MHz ถึง 50 GHz คือ

- น้ำหนักเบา,ขนาดเล็ก โครงสร้างเป็นแผ่นราบ ซึ่งสามารถทำเป็นรูปต่างๆได้ง่าย
- ราคาถูก กระบวนการสร้างไม่ยุ่งยาก
- มีลักษณะบาง ทำให้ติดตั้งเข้ากับยานพาหนะได้ง่าย
- ง่ายในการติดตั้งบนจรวดและดาวเทียม
- สายอากาศมีการแผ่กระจายตามแนวภาคตัดขวางน้อย
- สามารถทำให้มีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นหรือวงกลมได้ง่ายเพียงเปลี่ยนตำแหน่งของจุดป้อน
- สามารถทำเป็นสายอากาศสองความถี่ได้ง่าย
- ไม่ต้องใช้โพรงด้านหลัง
- ไมโครสตริปสามารถเชื่อมต่อเข้ากับการออกแบบที่ประกอบด้วยอุปกรณ์โซลิดสเตท (Solid state) เช่น วงจรออสซิลเลเตอร์ วงจรขยาย,สวิตช์,ตัวเลื่อนเฟสได้ง่าย
- สามารถสร้างให้มีการป้อนและการแมตช์อิมพีแดนซ์ได้พร้อมๆกัน ในโครงสร้างสายอากาศ

อย่างไรก็ตาม สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปยังมีข้อเสียเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศชนิดอื่น คือ

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

หมายเหตุ ปัจจุบันสายอากาศถูกพัฒนาเรื่อยๆ จนจะแก้ข้อเสียได้หมดแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 การนำไปประยุกต์ใช้งาน

ในทางปฏิบัติ ได้มีการนำสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปไปออกแบบใช้งานในด้านต่างๆมากมาย ข้อดีของสายอากาศไมโครสตริปมีมากกว่าข้อเสีย ในการนำสายอากาศไมโครสตริปไปประยุกต์ใช้งาน เช่น

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

2.2 คุณสมบัติพื้นฐานของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป

ลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแสดงดังรูปที่ 2.1(a) ซึ่งประกอบแผ่นตัวนำที่บางมากวางอยู่บนวัสดุฐานรอง ส่วนอีกด้านหนึ่งของวัสดุฐานรองจะเป็นระนาบสร้างเงา

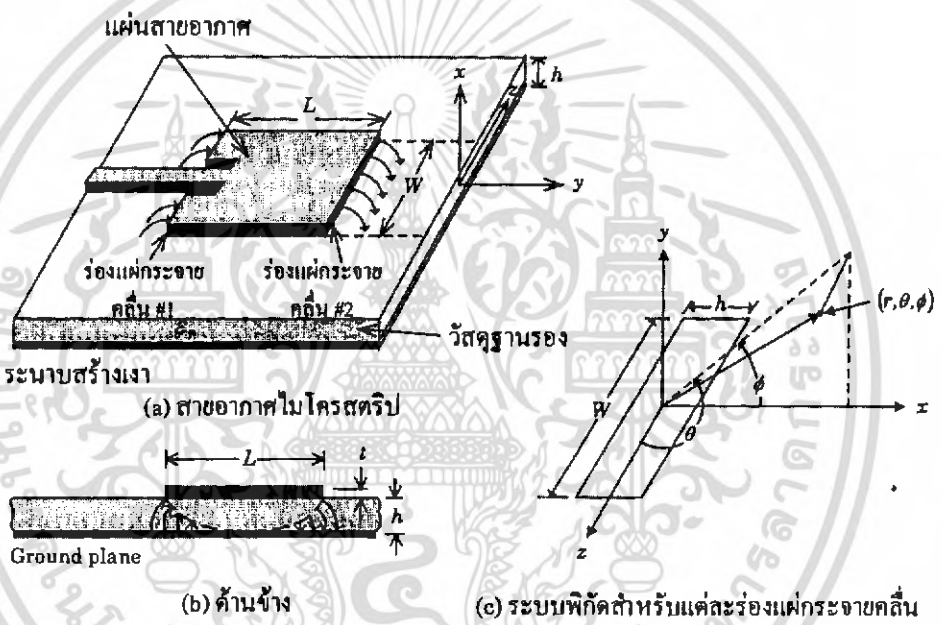
วัสดุฐานรองสำหรับนำมาสร้างสายอากาศไมโครสตริปนั้นมีด้วยกันหลายชนิด โดยปกติแล้วสภาพยอมสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกนั้นจะอยู่ในช่วง $2.2 \leq \varepsilon_r \leq 12$ และสิ่งที่สำคัญในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปคือความหนาของวัสดุฐานรอง (h) การออกแบบโดยใช้สภาพยอมสัมพัทธ์ในช่วงต่ำๆ จะทำให้สายอากาศมีประสิทธิภาพสูง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

บ่อยครั้งที่เรามักเรียกสายอากาศไมโครสตริปว่า “สายอากาศแผ่น” (Patch Antenna) โดยปกติส่วนที่ทำหน้าที่แผ่กระจายคลื่นและส่วนที่ใช้ในการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศจะอยู่บนวัสดุฐานรองเดียวกัน ส่วนที่ใช้แผ่กระจายคลื่นหรือแพ็ทช์นี้อาจมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส

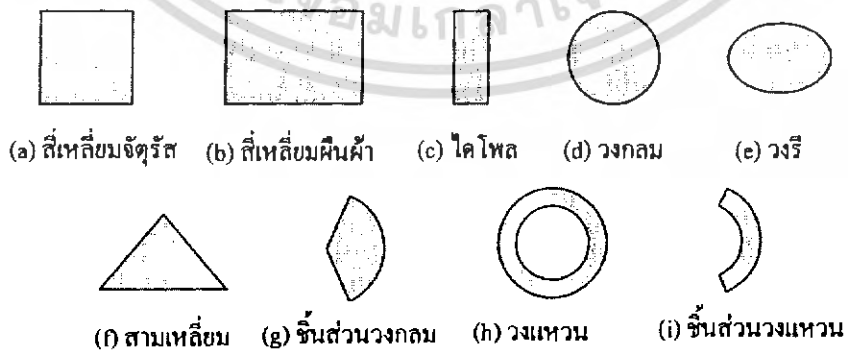
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สี่เหลี่ยมผืนผ้า เป็นแผ่นบางๆ หรือไดโพล วงกลม วงรี สามเหลี่ยม หรือรูปร่างอื่นๆ อีกก็ได้ซึ่งในรูปที่ 2.2 ได้แสดงลักษณะของแผ่นไมโครสตริปรูปร่างต่างๆไว้แล้ว

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



รูปที่ 2.1 สายอากาศไมโครสตริปและระบบพิกัด

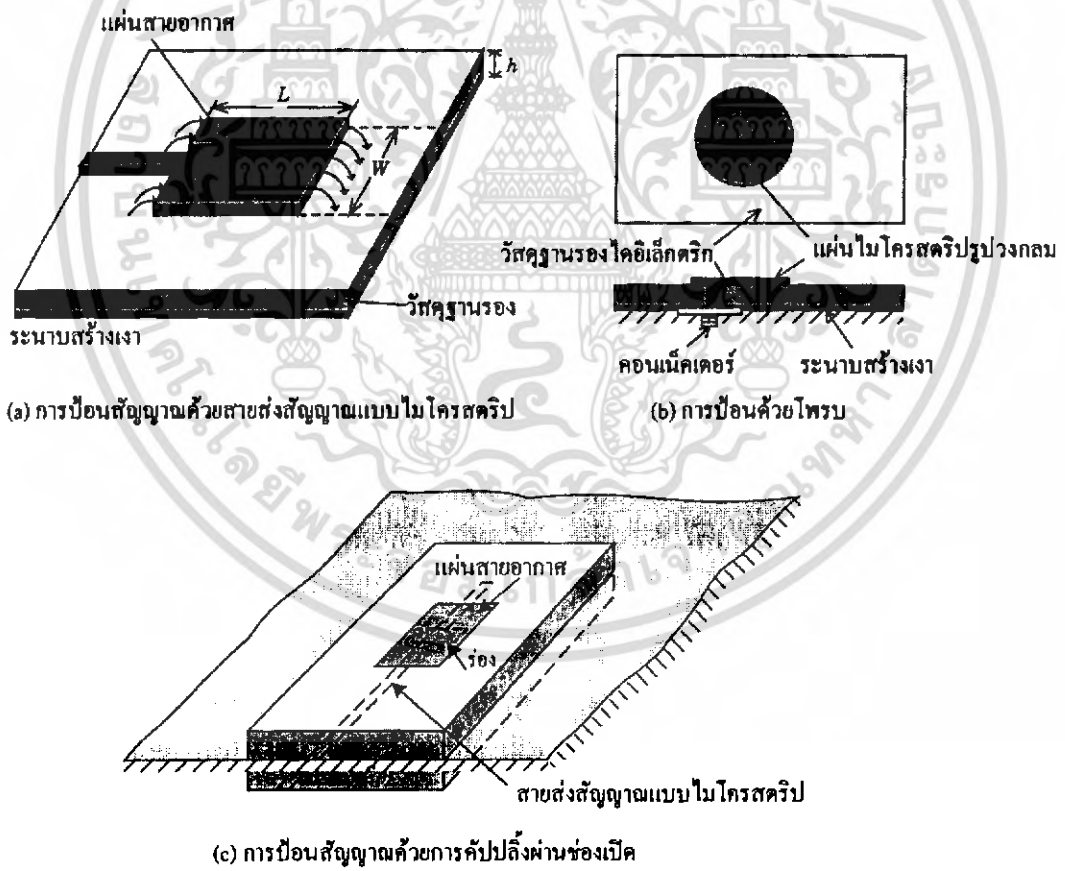


รูปที่ 2.2 รูปร่างของแผ่นสายอากาศไมโครสตริปแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

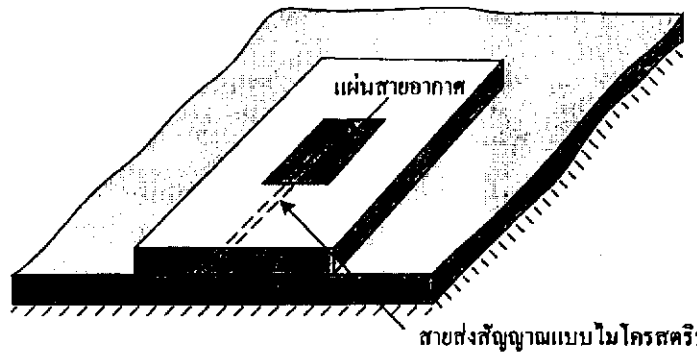
2.3 การป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป

การป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศไมโครสตริปนั้นสามารถทำได้หลายวิธี แต่ที่นิยมนั้นจะมีอยู่ด้วยกัน 4 วิธีคือ การป้อนสัญญาณด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป สายโคแอกเชียล การคัปปลิ้งผ่านช่องเปิด (Aperture) และการคัปปลิ้งด้วยการวางไว้ใกล้กัน (Proximity) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และวงจรสมมูลของการป้อนสัญญาณในแต่ละแบบแสดงดังรูปที่ 2.4 ลักษณะของสายป้อนสัญญาณแบบไมโครสตริปจะเป็นแผ่นตัวนำ ซึ่งปกติแล้วจะมีความกว้างน้อยกว่าความกว้างของแพ็ทซ์มาก การป้อนสัญญาณด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปจะง่ายต่อการสร้างและการแมตช์อิมพีแดนซ์โดยการควบคุมตำแหน่งจุดป้อน อีกทั้งยังค่อนข้างง่ายต่อการวิเคราะห์ แต่ถ้าความหนาของวัสดุฐานรองเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดคลื่นผิวมากขึ้น และยังทำให้เกิดการแผ่กระจายปลอมปนจากตัวป้อนสัญญาณอีกด้วย ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วการป้อนด้วยวิธีนี้จะมีแบนด์วิดท์ประมาณ 2-5 %



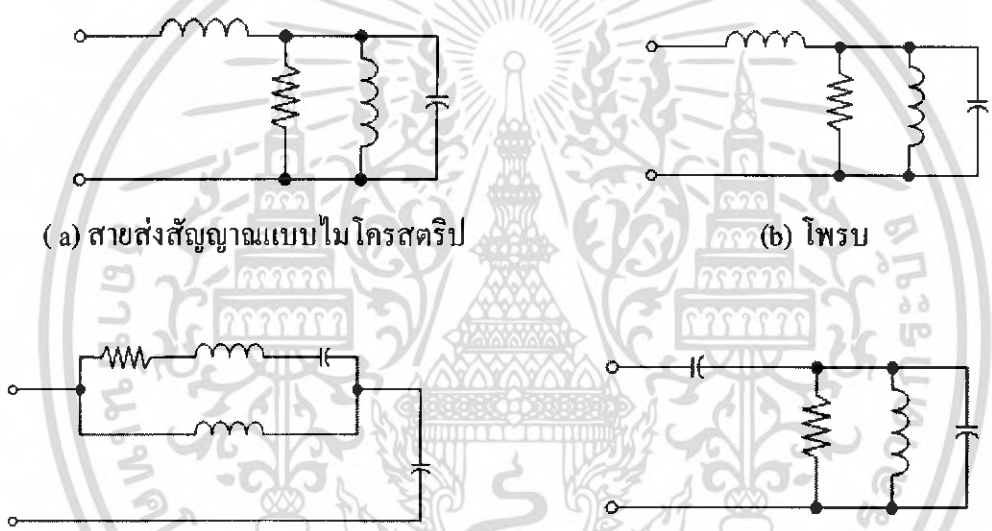
รูปที่ 2.3 การป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศไมโครสตริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(d) การป้อนสัญญาณด้วยการวางไว้ใกล้กัน

รูปที่ 2.3 การป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศไมโครสตริป (ต่อ)



(a) สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป (b) โพรบ

(c) การคับปลิ้งผ่านช่องเปิด (d) การคับปลิ้งด้วยการวางไว้ใกล้กันช่องเปิด

รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลย์ของการป้อนสัญญาณตามรูปที่ 2.3

การป้อนสัญญาณด้วยสายโคแอกเชียล ตัวนำด้านในของสายโคแอกเชียลจะต่ออยู่กับแพ็ทช์ที่ทำหน้าที่แผ่กระจายคลื่น ในขณะที่ตัวนำด้านนอกของสายจะต่ออยู่กับระนาบสร้างเงา การป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศโครสตริปแบบนี้เป็นแบบที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากง่ายต่อการสร้างและการแมตช์อิมพีแดนซ์ และมีการแผ่กระจายปลอมปนน้อย แต่วิธีนี้ยังคงทำให้แบนด์วิดท์แคบและยากต่อการสร้างแบบจำลอง

การป้อนสัญญาณทั้งแบบไมโครสตริปและแบบสายโคแอกเชียล โดยธรรมชาติแล้วจะไม่สมมาตรกัน ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดโมดในอันดับที่สูงกว่าขึ้น (Higher Order Mode) ทำให้การแผ่กระจายมีโพลาไรซ์ไขว้เกิดขึ้น เพื่อที่จะแก้ปัญหาเหล่านี้จึงต้องอาศัยการป้อนสัญญาณด้วยการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คับปลิ้งผ่านช่องเปิด ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (c) และ 2.3 (d) การคับปลิ้งผ่านช่องเปิดดังแสดงในรูปที่ 2.3 (c) เป็นแบบที่สร้างได้ยากที่สุดในทั้ง 4 แบบ และยังคงมีแบนด์วิดท์ที่แคบ การคับปลิ้งในลักษณะนี้จะช่วยลดการแผ่กระจายปลอมปนได้ ลักษณะโครงสร้างของการ คับปลิ้งผ่านช่องเปิดนั้นจะประกอบด้วยวัสดุฐานรอง 2 ชั้น ถูกแยกออกจากกันด้วยระนาบสร้างเงา ด้านล่างของวัสดุฐานรองแผ่นล่างสุดจะเป็นสายป้อนสัญญาณแบบไมโครสตริป ซึ่งพลังงานจะถูกคับปลิ้งผ่านร่อง (Slot) ที่อยู่บนระนาบสร้างเงาไปยังตัวแผ่กระจายคลื่น โดยปกติแล้ววัสดุฐานรองด้านล่างจะเป็นวัสดุที่มีสภาพยอมสัมพัทธ์สูง ส่วนวัสดุฐานรองอันบนจะเป็นวัสดุที่มีสภาพยอมสัมพัทธ์ต่ำกว่า ระนาบสร้างเงาที่แบ่งวัสดุฐานรองทั้งสองออกจากกันนั้นจะช่วยป้องกันส่วนที่แผ่กระจายคลื่นออกจากส่วนป้อนสัญญาณ ซึ่งจะช่วยลดการแผ่กระจายปลอมปน และทำให้ได้โพลาไรเซชันที่บริสุทธิ์ขึ้น โดยทั่วไปแล้วการแมตช์อิมพีแดนซ์ทำได้โดยการควบคุมความกว้างของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป และควบคุมความยาวของร่อง การคับปลิ้งผ่านร่องนี้สามารถสร้างแบบจำลองได้โดยอาศัยทฤษฎีของ Bethe ซึ่งจะพิจารณาเกี่ยวกับการ คับปลิ้งผ่านช่องเปิดเล็กๆ บนระนาบของตัวนำการป้อนสัญญาณทั้ง 4 แบบนี้ การคับปลิ้งโดยการวางไว้ใกล้ๆ กันนี้จะมีแบนด์วิดท์กว้างที่สุด อีกทั้งยังง่ายต่อการสร้างแบบจำลองและมีการปลอมปนของการแผ่กระจายคลื่นต่ำ แต่การสร้างก็ยังทำได้ยากอยู่

2.4 การแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป

สนามการแผ่กระจายของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปจะเกิดจากสนามขอบระหว่างขอบของตัวนำสายอากาศแผ่นไมโครสตริปกับระนาบสร้างเงา กระบวนการของการแผ่กระจายคลื่นจะเกิดจากสายส่งไมโครสตริปวงจรเปิด ได้มีการทดสอบการแผ่กระจายคลื่นจากความไม่ต่อเนื่องของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป โดยมีการวิเคราะห์อยู่บนพื้นฐานการไหลของกระแสในตัวนำ วิธีนี้สามารถใช้คำนวณหาผลกระทบของการแผ่กระจายที่มีต่อค่าตัวร่วม Q ของรีโซเนเตอร์ไมโครสติป การวิเคราะห์เบื้องต้นบนสนามในแบบช่องว่าง โดยเปิดขอบของไมโครสตริปและระนาบสร้างเงา ดังนั้นการวิเคราะห์แบบนี้ผลของการแผ่กระจายทั้งหมดตัวประกอบคุณภาพจะกล่าวถึงในส่วนของขนาดรีโซเนเตอร์ (Resonator) ความถี่ในการใช้งานสัมพันธ์กับสภาพยอมสัมพัทธ์และความหนาของวัสดุฐานรอง ผลทฤษฎีและการทดลอง แสดงให้เห็นว่าความถี่สูงการแผ่กระจายจะสูญเสียมากที่ตัวนำและไดอิเล็กตริก ซึ่งเป็นข้อยืนยันได้ว่าการแผ่กระจายของวงจรเปิดสายส่งแบบไมโครสตริปจะใช้กำลังงานมาก เมื่อทำการสร้างสายอากาศโดยที่วัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกมีความหนาน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ตัวแปรแสดงคุณภาพ (quality factor) แบนด์วิดท์ และประสิทธิภาพ

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

ตัวแปรแสดงคุณภาพเป็นตัวเลขคุณค่าที่แสดงการสูญเสียของอากาศ ปกติแล้วคือการสูญเสียเนื่องจากการแผ่กระจาย ความนำ Ohmic ของไดอิเล็กตริกและการสูญเสียเนื่องจากคลื่นผิว ดังนั้นตัวแปรแสดงคุณภาพรวม Q_0 จึงเป็นค่าความสูญเสียรวมทั้งหมดและปกติจะอยู่ในรูป

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

โดยที่ Q_0 คือ ตัวแปรแสดงคุณภาพรวม

Q_r คือ ตัวแปรแสดงการสูญเสียเนื่องจากการแผ่กระจายคลื่น (คลื่นในอากาศ)

Q_c คือ ตัวแปรแสดงการสูญเสียเนื่องจากความนำไฟฟ้า

Q_d คือ ตัวแปรแสดงการสูญเสียเนื่องจากไดอิเล็กตริก

Q_{sw} คือ ตัวแปรแสดงการสูญเสียเนื่องจากคลื่นผิว

สำหรับวัสดุฐานรองที่บางมากๆ ความสูญเสียเนื่องจากคลื่นผิวก็จะมีค่าน้อยมากๆ จนสามารถละทิ้งได้ แต่สำหรับวัสดุฐานรองที่หนาขึ้นจะต้องนำค่านี้มาพิจารณาด้วย ความสูญเสียเหล่านี้สามารถทำให้ลดลงได้โดยอาศัยคาวิตี้

สำหรับวัสดุฐานรองที่บางมากๆ ($h << \lambda_0$) สำหรับแพ็ทช์รูปร่างใด ๆ (ประกอบด้วยสี่เหลี่ยมผืนผ้าและวงกลม) สูตร โดยประมาณสำหรับหาค่าของตัวแปรแสดงคุณภาพของความสูญเสียหลายๆอย่าง สามารถเขียนได้ว่า

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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 ถ้าไม่ได้พิจารณาการแมตช์อิมพีแดนซ์ที่จุดอินพุตของสายอากาศ คำจำกัดความของแบนด์วิดท์ที่ให้ความหมายดีขึ้นควรจะครอบคลุมตลอดย่านความถี่ โดยที่ค่า VSWR ที่จุดต่ออินพุตจะมีค่าเท่ากับหรือน้อยกว่าค่ามากที่สุดต้องการ เมื่อสมมติให้ VSWR มีค่าเป็น 1 ที่ความถี่ที่ต้องการ สมการที่แก้ไขมาจากสมการ 2.6 ซึ่งนำการแมตช์อิมแดนซ์มาพิจารณาด้วยนั้นจะได้เป็น

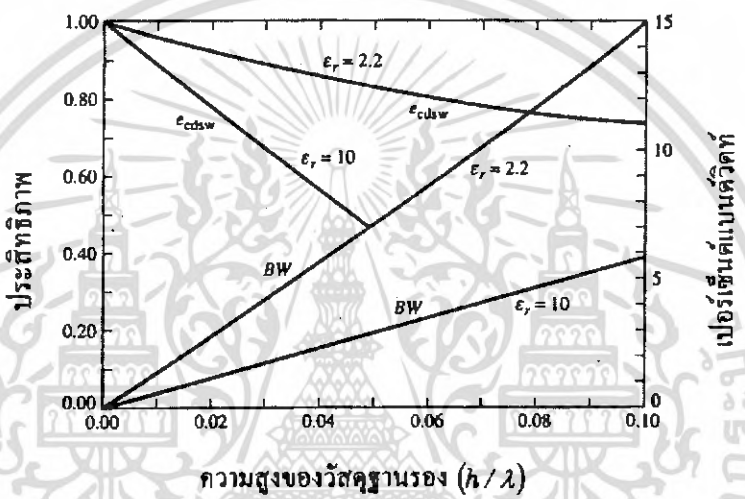
$$\frac{\Delta f}{f_o} = \frac{VSWR - 1}{Q_0 \sqrt{VSWR}} \tag{2.6a}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปแล้วแบนด์วิดท์จะเป็นสัดส่วนกับปริมาตร ซึ่งสำหรับสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความถี่รีโซแนนท์คงที่ สามารถเขียนได้เป็น

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

$$\sim \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r}} \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r}} \sqrt{\varepsilon_r} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r}} \tag{2.7}$$



รูปที่ 2.5 ประสิทธิภาพและแบนด์วิดท์ต่อความสูงของวัสดุฐานรองที่ความถี่รีโซแนนท์ของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยใช้วัสดุฐานรองที่แตกต่างกัน 2 ชนิด

ดังนั้นแบนด์วิดท์จึงเป็นสัดส่วนผกผันกับค่ารากที่สองของสภาพะยอมสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง การเปลี่ยนแปลงของแบนด์วิดท์ของสายอากาศไมโครสตริป ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความสูงของวันดุฐานรองที่ทำการนอร์มอลไลซ์แล้วสำหรับวัสดุฐานรอง 2 แบบแสดงดังรูปที่ 2.5 ซึ่งจะเห็นได้ว่าแบนด์วิดท์จะเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของวัสดุฐานรองสูงขึ้น

ประสิทธิภาพการแผ่กระจายของสายอากาศถูกนิยามให้เป็นสัดส่วนของกำลังงานที่แผ่กระจายออกไปต่อกำลังงานอินพุต ซึ่งสามารถแสดงในเทอมของตัวแปรแสดงคุณภาพสำหรับสายอากาศไมโครสตริปได้ด้วย

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ Q_0 กำหนดให้ตามสมการ (2.1) การเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพซึ่งเป็นฟังก์ชั่นความสูงของวัสดุฐานรองสำหรับสายอากาศไมโครสตริปที่มีวัสดุฐานรองต่างกันสองชนิดแสดงดังรูปที่ 2.5

2.6 บทสรุป

ในบทนี้ได้ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของสายอากาศแบบไมโครสตริป การประยุกต์ไปใช้งานเพื่อใช้เป็นแนวทางในการนำความสัมพันธ์ของค่าต่าง ๆและการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศแผ่นไมโครสตริป รวมทั้งการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป การพิจารณาถึงแบนด์วิดท์และประสิทธิภาพของสายอากาศ ที่กล่าวมาข้างต้นนี้จะเป็นพื้นฐานในการคาดการณ์ล่วงหน้า และการวิเคราะห์ที่มีหลักการถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
ทฤษฎีซิลิคอนโดปทองคำ

3.1 บทนำ

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

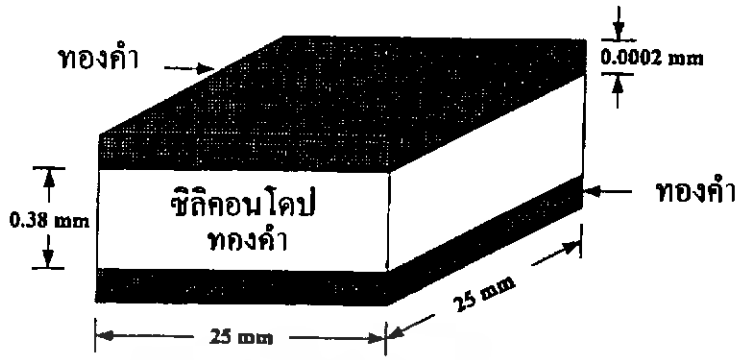
$$D = \frac{kT}{q} \cdot \mu \tag{3.1}$$

โดยที่ q คือขนาดประจุของอิเล็กตรอน
k คือค่าคงตัวของโบส์ตมันน์
T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์
μ คือค่าคล่องตัวของอนุภาค $\left(cm^2/V-\sec\right)$

3.2 ทฤษฎี

สารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดเอ็น ที่ถูกเติมอะตอมทองคำ ดังแสดงตัวอย่างโครงสร้างในรูปที่ 3.1 จะแสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากทองคำในเนื้อสารซิลิคอนชนิดเอ็นจะมีพฤติกรรมซึ่งพอกล่าวสรุปเป็นข้อๆ ได้ดังนี้

62879
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

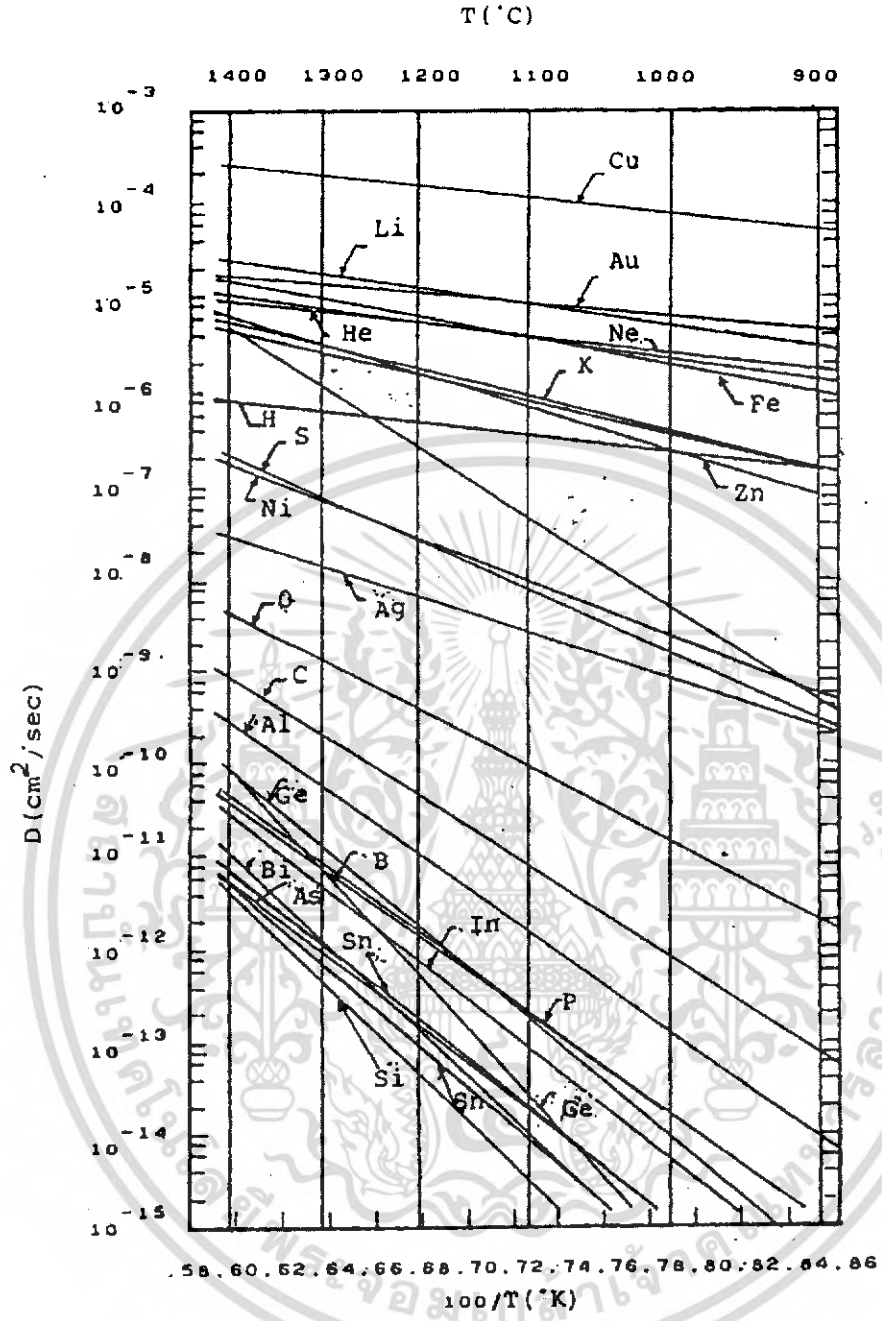


รูปที่ 3.1 ตัวอย่างโครงสร้างซิลิคอนโดปทอง

3.2.1 สัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมทองคำในซิลิคอน

ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมของธาตุชนิดต่างๆ (D) ในซิลิคอนกับอุณหภูมิ (T) แสดงดังรูปที่ 3.2 พบว่าเมื่อพิจารณาว่าอะตอมทองคำเป็นสารเจือระดับลึกจะมีสัมประสิทธิ์การแพร่เป็นไปตามกราฟ คือ ประมาณ 2.5×10^{-5} cm^2/sec ที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส เช่นที่อุณหภูมิ 1100 ^0C จะมี $D=9\times10^{-6}$ cm^2/sec เป็นต้น ดังนั้นจึงสามารถควบคุมปริมาณของอะตอมทองคำในซิลิคอนได้ โดยการควบคุมอุณหภูมิการแพร่ของอะตอมทองคำ การแพร่ของอะตอมทองคำจะแพร่เข้าไปอยู่ระหว่างอะตอม (Interstitial) ของซิลิคอน โดยไม่มีพันธะใด ๆ ยึดกับอะตอมของซิลิคอน ดังแสดงในรูป 3.3 นั้นอัตราการแพร่ชนิดนี้จะเร็วกว่าอัตราการแพร่แบบเข้าไปแทนที่ (Sub-Stitutional Diffusion)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

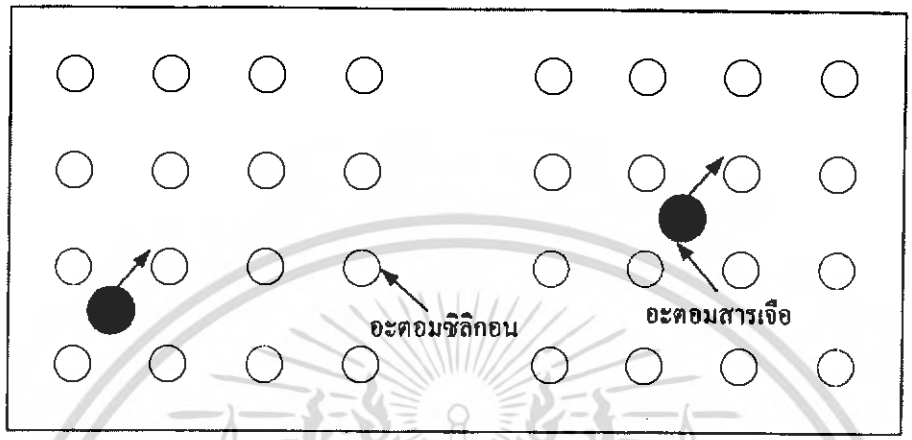


รูปที่ 3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมของธาตุชนิดต่างๆ

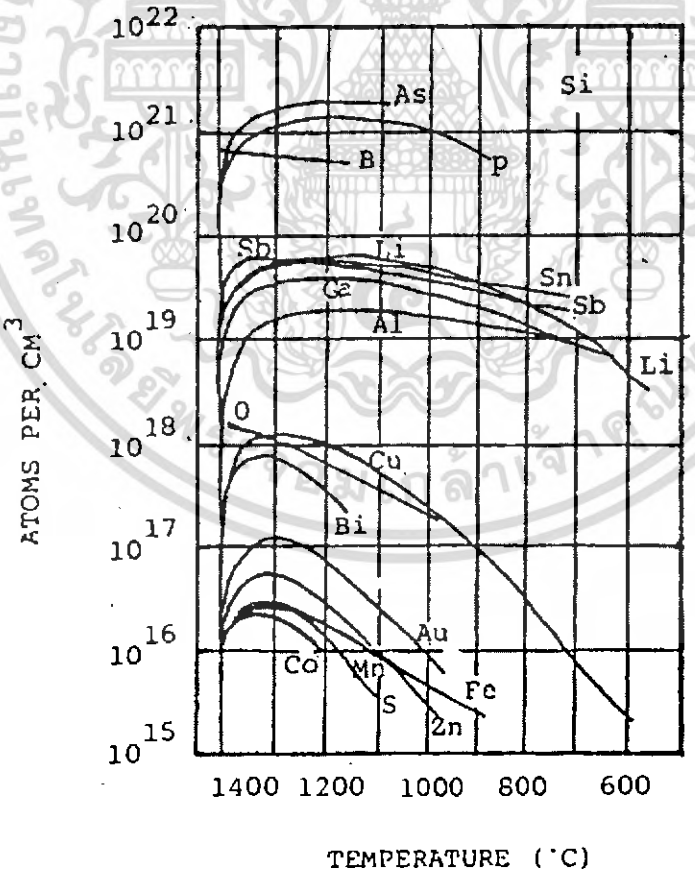
การแพร่อะตอมของทองคำเข้าไปในซิลิคอน จะช่วยให้อัตราการรวมตัวกันใหม่ (Recombination Rate) มีค่าสูงขึ้น เป็นผลให้อายุของพาหะ (Carrier Life Time) มีค่าลดลง บางทีเราเรียกทองคำว่าเป็น Carrier life time killer ผลดังที่กล่าวมานี้ จะทำให้ Switching speed ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำมีค่ามากขึ้น และทองคำจะมีค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่สูงด้วยการแพร่ทองคำ นิยมทำกันมากกับสิ่งประดิษฐ์หรือวงจรรวมที่นำมาใช้งานเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเภท สวิทช์ เช่น สวิชต์ชิ่งไดโอด สวิทช์ชิ่งทรานซิสเตอร์ และวงจรรวมทางดิจิตอล แบบต่างๆ เป็นต้น สำหรับปริญญานิพนธ์นี้ได้พัฒนานำมาเป็นฐานของสายอากาศ



รูปที่ 3.3 การแพร่ของอะตอมทองคำเข้าไปอยู่ระหว่างอะตอมซิลิคอน



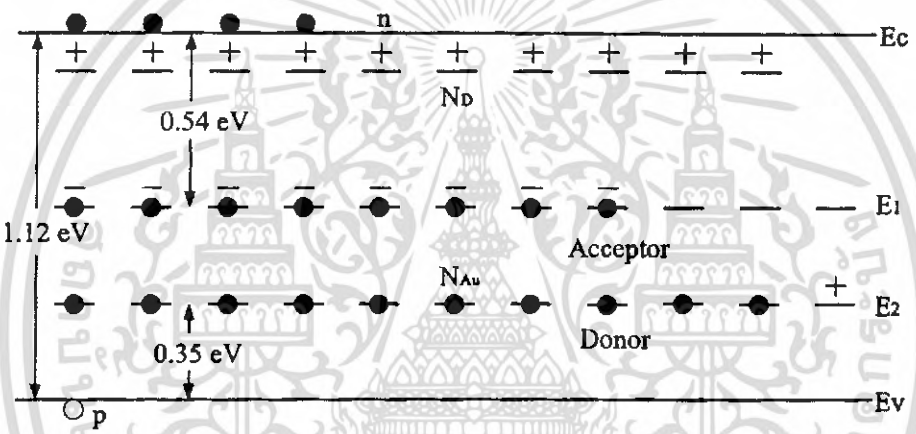
รูปที่ 3.4 Solid Solubility ของสารเจือชนิดต่างๆในซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 acocptor level ใต้แถบความนำ (Conduction Band) ลงมา 0.54 eV สำหรับระดับพลังงานของทองคำในซิลิคอนที่สภาวะต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ไดอะแกรมระดับพลังงานของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมทองคำ

ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมทองคำดังแสดงไดอะแกรมระดับพลังงานและสามารถหาความหนาแน่นของอะตอมทองคำในซิลิคอนได้ดังสมการ

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

N_{Au} : ความหนาแน่นของทองคำ

n_{00} : ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนก่อนการแพร่ทองคำ

n_0 : ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนหลังการแพร่ทองคำ

n_i : ความหนาแน่นของคลื่นพาห์อินทรินซิก (Intrinsic carrier density)

E_1 : ระดับพลังงานผู้รับของทองคำ (Acceptor-level of Au)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

E_F : ระดับเฟอร์มิ (Fermi level)

k : ค่าคงตัวโบลทซ์แมนน์ (Boltzmann constant)

T : อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

ρ : ความต้านทานหลังการแพร่อะตอมทองคำ

3.2.3 ค่าพิกัดความต้านทานของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยตะตอมทองคำ

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

ที่กล่าวมาข้างต้นคือคุณสมบัติบางประการของทองคำในเนื้อซิลิคอน หลังจากที่เติมอะตอมทองคำแล้วจะทำให้ค่าความคล่องตัวของประจุพาหะเปลี่ยนแปลงไป

3.3 การวัดพารามิเตอร์ของวัสดุฐานรองซิลิคอนโคปทอง

3.3.1 การวัดค่าพิกัดความต้านทาน

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

$$\sigma = 1/\rho \qquad (3.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้แล้วค่าความต้านไฟฟ้าดังกล่าวนี้ จะขึ้นอยู่กับจำนวนของอิเล็กตรอนและโฮลอิสระประจุไฟฟ้าของพาหะแต่ละตัวก็คือ q ซึ่งมีค่า 1.602×10^{-19} คูลอมบ์ และยังขึ้นอยู่กับความสามารถในการเคลื่อนที่ของพาหะ ซึ่งเราเรียกว่า ความคล่องตัว (μ) ดังนั้นค่าความนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำจึงแสดงได้โดยสมการ

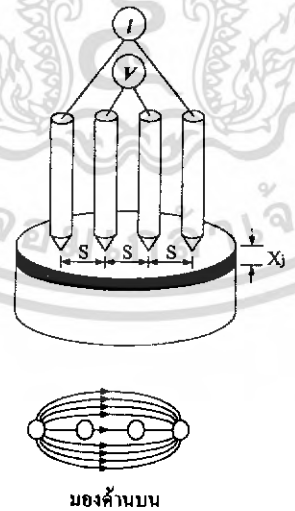
$$\sigma = q\mu_n + q\mu_p p \tag{3.4}$$

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 $[\Omega\cdot cm]$ นี้ สามารถวัดค่าได้โดยใช้เครื่องมือโฟร์พอยท์โพรบ (Four Point Probe)



มองด้านบน

รูปที่ 3.6 การวัดค่าพิกัดความต้านทานโดยวิธีโฟร์พอยท์โพรบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือดังกล่าวนี้นิยมใช้วัดค่า แผ่นความต้านทาน (sheet resistance) โดยแทนด้วยสัญลักษณ์ ρ_s ซึ่งมีหน่วยเป็นโอห์มต่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Ω/□) ทำให้เราสามารถทราบค่าพิกัดความต้านทาน $\rho = \rho_s \times$ ความหนาหรือ $\rho = \rho_s \times t$

เครื่องโฟร์พอยท์โพรบ นี้จะประกอบด้วยเข็มโลหะ ซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าทั้งสี่ซึ่งจะห่างจากกันเป็นระยะ S เท่าๆกัน 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 resistibity ρ_s)

ในงานสารกึ่งตัวนำมักจะวัดค่านี้เสมอๆ เพราะแผ่นเวเฟอร์ทั่วไปจะบางและการแพร่สารเจือนั้น สารเจือจะลงไปไม่ทะลุตลอดแผ่น วิธีที่ใช้กันมากที่สุด คือโฟร์พอยท์โพรบ โดยจะมีโพรบของกระแส 1 คู่ และสำหรับวัดแรงดันอีก 1 คู่

สูตรพื้นฐานสำหรับการคำนวณหาการวัดความต้านทานแผ่น ก็คือ

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

โดยค่าของ F^* สามารถที่จะหาได้จากตารางที่ 3.1

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 ซึ่งค่าสามารถหาได้จากตารางข้างล่างนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

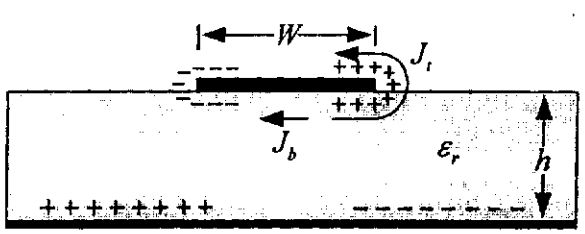
บทที่ 4
ทฤษฎีและหลักการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป

4.1 กล่าวนำ

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

4.2 การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองคาวิตี้

ในการวิเคราะห์สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปด้วยแบบจำลองคาวิตี้ นั้นโครงสร้างของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.1 จะถูกพิจารณาว่ามีลักษณะเป็นคาวิตี้ที่มีสารไดอิเล็กตริกบรรจุอยู่ภายใน ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และเพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจจึงเปรียบคาวิตี้นี้ว่าถูกปิดล้อมด้วยด้วยแผ่นตัวนำไฟฟ้าทั้งด้านบนและด้านล่าง ส่วนด้านข้างทุกด้านจะถูกปิดล้อมด้วยผนังสนามแม่เหล็กที่มีสภาวะเปิดวงจร แบบจำลองนี้จะใช้สำหรับการพิจารณาสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าภายในคาวิตี้ ดังนั้นเราจึงสามารถคำนวณแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น อินพุตอิมพีแดนซ์และความถี่รีโซแนนท์ของสายอากาศได้

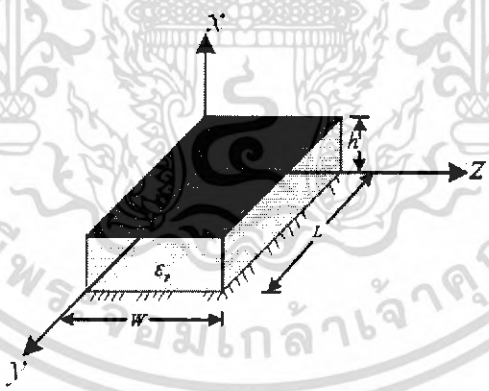


รูปที่ 4.1 การแผ่กระจายประจุและความหนาแน่นของกระแสบนแผ่นสายอากาศไมโครสตริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปถูกกระตุ้น สนามภายในคาวิตี้จะแผ่กระจายออกไปตามผนังของคาวิตี้ ทำให้เกิดประจุแผ่นกระจายอยู่บนผิวด้านบนและด้านล่างของแผ่นสายอากาศ 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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะได้ผลเฉลยของสมการในรูปทั่วไปเป็น

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

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

$$\begin{aligned} E_x &= -j\frac{1}{\omega\mu\varepsilon}\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + k_2\right)A_x & H_x &= 0 \\ E_y &= -j\frac{1}{\omega\mu\varepsilon}\frac{\partial^2 A_x}{\partial x \partial y} & H_x &= \frac{1}{\mu}\frac{\partial A_x}{\partial z} \\ E_z &= -j\frac{1}{\omega\mu\varepsilon}\frac{\partial^2 A_x}{\partial x \partial z} & H_z &= \frac{1}{\mu}\frac{\partial A_x}{\partial y} \end{aligned} \tag{4.3}$$

โดยอาศัยเงื่อนไข

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

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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

ในที่สุดจะได้ว่ารูปแบบของศักย์เวคเตอร์ A_x ภายในคาวิตี้ คือ

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

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

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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_x = -j\frac{\left(k^2 - k_x^2\right)}{\omega\mu\varepsilon} A_{mnp}\cos(k_x x')\cos(k_y y')\cos(k_z z')$$

$$E_y = -j\frac{k_x k_y}{\omega\mu\varepsilon} A_{mnp}\sin(k_x x')\sin(k_y y')\cos(k_z z')$$

$$E_z = -j\frac{k_x k_z}{\omega\mu\varepsilon} A_{mnp}\sin(k_x x')\cos(k_y y')\sin(k_z z') \qquad (4.12)$$

$$H_x = 0$$

$$H_y = -\frac{k_z}{\mu} A_{mnp}\cos(k_x x')\cos(k_y y')\sin(k_z z')$$

$$H_z = -\frac{k_y}{\mu} A_{mnp}\cos(k_x x')\sin(k_y y')\cos(k_z z')$$

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

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

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

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

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

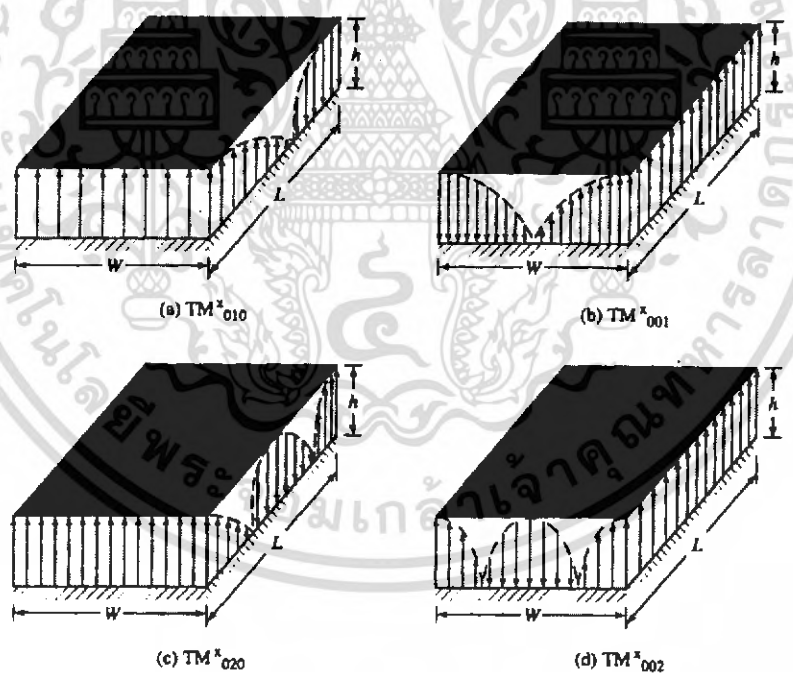
$$(f_r)_{020} = \frac{1}{L\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{v_o}{L\sqrt{\varepsilon_r}} \qquad (4.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนั้นจะสมมติให้ไม่ผลเนื่องจากสนามฟริงกิงตามขอบของคาวิตี้ 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 ด้านจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงได้ด้วยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า J_s และความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก M_s ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (a) โดยที่

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

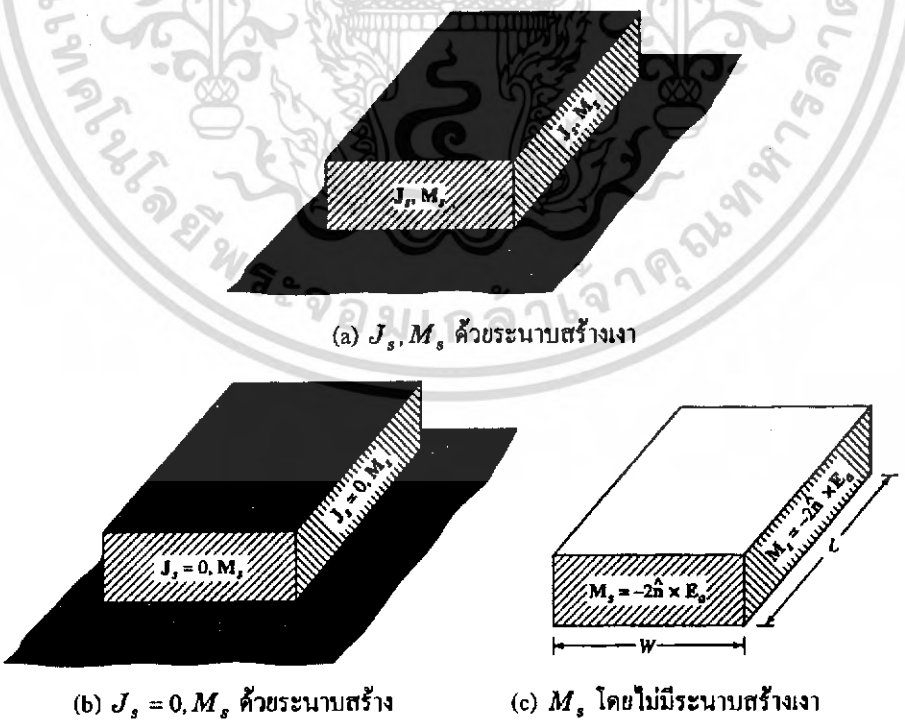
และ

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

เนื่องจากสายอากาศไมโครสตริปมีอัตราส่วนของความสูงต่อความกว้างค่อนข้างน้อย ดังนั้น J_t ที่อยู่ด้านบนจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ J_b ที่อยู่ด้านล่าง จึงสมมติได้ว่า J_t มีค่าเป็นศูนย์ และจะไม่นำมาคิด จึงทำให้สนามแม่เหล็กที่บริเวณขอบ ซึ่งเกิดจาก J_t มีค่าเป็นศูนย์ (หรือมีค่าน้อยมาก) ด้วยส่งผลให้ 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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^{z}_{010} องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะลดลงจากสมการ 4.12 เป็น

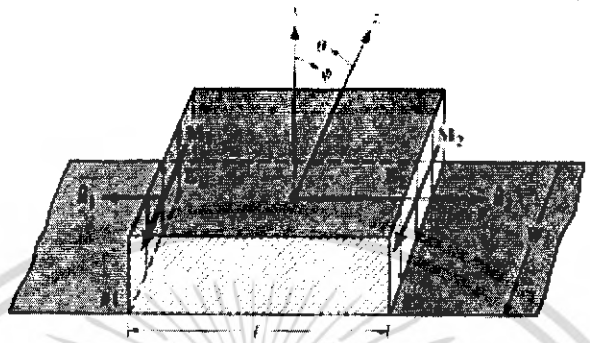
$$\begin{aligned} E_x &= E_0 \cos\left(\frac{\pi}{L}y'\right) \\ H_z &= H_0 \sin\left(\frac{\pi}{L}y'\right) \\ E_y &= E_z = H_x = H_y = 0 \end{aligned} \tag{4.19}$$

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

การแผ่กระจายคลื่นของแต่จะร่องนั้นจะถูกสมมติให้เป็นไดโพลแม่เหล็ก 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) ซึ่งเป็นแบบรูปการแผ่

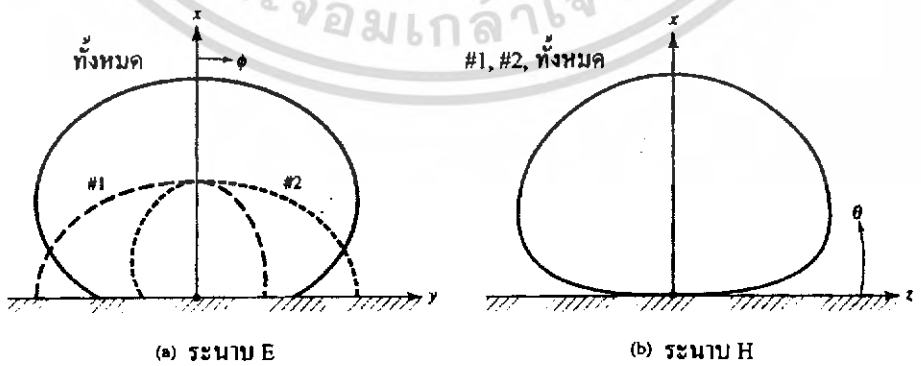
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระจายคลื่นของแต่ละร่องในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) ส่วนแบบรูปในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) ได้นำมาแสดงไว้ในรูปที่ 4.6(b)



รูปที่ 4.5 ร่องสำหรับแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า และกระแสแม่เหล็กสมมูล

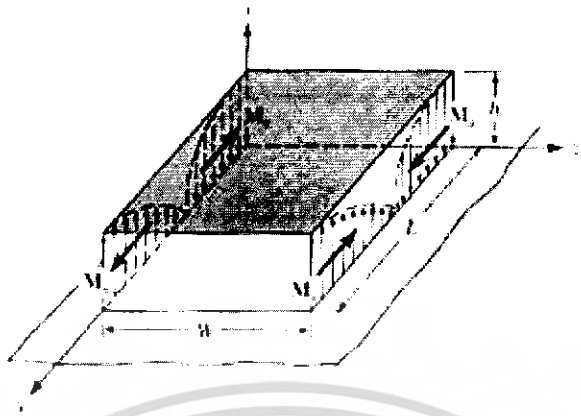
ความหนาแน่นกระแสสมมูลสำหรับร่อง 2 ร่องแบบอื่นๆ โดยที่แต่ละร่องยาว L และสูง h แสดงดังรูปที่ 4.7 ดังนั้นความหนาแน่นกระแสบนผนังแต่ละด้านจะมีขนาดเดียวกันแต่มีทิศทางตรงกันข้ามกัน สนามที่แผ่กระจายโดยร่องทั้งสองนี้ก็จะไปหักล้างกับสนามอื่นๆ ในระนาบสนามแม่เหล็ก ดังนั้นเมื่อร่องที่อยู่ตรงข้ามกันจะมีเฟสแตกต่างกัน 180° ซึ่งจะไปหักล้างกับสนามอื่นๆ ในระนาบสนามไฟฟ้าด้วย ดังจะได้แสดงในการวิเคราะห์ต่อไป การแผ่กระจายของสนามจากผนังทั้ง 2 ด้านนี้จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับผนังอีก 2 ด้านที่เหลือ ดังนั้นร่องทั้งสองเหล่านี้จึงเรียกว่า "ร่องที่ไม่มีการแผ่กระจาย"



(a) ระนาบ E (b) ระนาบ H

รูปที่ 4.6 แบบรูปในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสำหรับแผ่น ไมโครสตริปร่องเดี่ยว และทั้งสองร่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ความหนาแน่นกระแสบนร่องที่ไม่มีการแผ่กระจายคลื่นสำหรับสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

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

ร่องการแผ่กระจายคลื่น การแผ่กระจายของสนามไฟฟ้าในระยะไกลจากแต่ละร่องสามารถหาได้โดยอาศัยความหนาแน่นกระแสสมมูลจากสมการ 4.18 สามารถเขียนได้ว่า

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

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

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 $(k_0 h << 1)$ สมการ 4.20b จะลดลงเหลือ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 มีค่าน้อยมากๆ $(k_0 h << 1)$ 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

สำหรับสายอากาศไมโครสตริปในระบบ x–y (θ=90°,0°≤ϕ≤90°, และ 270°≤ϕ≤360°) เป็นระนาบสนามไฟฟ้า สำหรับในระนาบนี้ สมการสำหรับหาสนามที่แผ่กระจายจากสมการ 4.23-4.23b จะลดลงเหลือ

$$E_\phi = -j\frac{2k_o WV_o e^{-jk_o r}}{\pi r}-\left\{\frac{\sin\left(\frac{k_o h}{2}\cos\phi\right)}{\frac{k_o h}{2}\cos\phi}\right\}\cos\left(\frac{k_o L_e}{2}\sin\phi\right) \tag{4.25}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$E_\phi = -j\frac{2k_o W V_o e^{-jk_o r}}{\pi r}\left\{\sin\theta \frac{\sin\left(\frac{k_o h}{2}\sin\theta\right)}{\frac{k_o h}{2}\sin\theta}\frac{\sin\left(\frac{k_o W}{2}\cos\theta\right)}{\frac{k_o W}{2}\cos\theta}\right\} \tag{4.26}$$

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

$$E_\theta = j\frac{k_o h L_e E_o e^{-jk_o r}}{4\pi r}\left\{\cos\phi \frac{\sin(X)}{X}\frac{\cos Y}{(Y)^2-(\pi/2)^2}\right\} \tag{4.28a}$$

$$E_\phi = -\frac{k_o h L_e E_o e^{-jk_o r}}{4\pi r}\left\{\cos\theta\sin\phi \frac{\sin(X)}{X}\frac{\cos Y}{(Y)^2-(\pi/2)^2}\right\} \tag{4.28b}$$

โดยที่

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

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

เมื่อร่องทั้งสองนี้จะเป็นอาเรย์ขนาด 2 องค์ประกอบ ซึ่งมีขนาดเดียวกันแต่มีเฟสตรงกันข้าม วางแยกออกจากกันในแกน z ด้วยระยะทาง W จะได้อาเรย์เฟคเตอร์เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ดังนั้นสนามไฟฟ้ารวมในระยะไกลจะเป็นผลคูณของสมการ 4.28a และ 4.28b กับอาเรย์แฟคเตอร์ตามสมการ 4.29

ในระนาบสนามไฟฟ้า ($\theta = 90^\circ, 0^\circ \le \phi \le 90^\circ$ และ $270^\circ \le \phi \le 360^\circ$) และสมการ 4.28a และ 4.28b จะมีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากสนามที่แผ่กระจายไปหนึ่งส่วนสี่รอบของแต่ละร่องจะถูกหักล้างจากสนามที่แผ่กระจายจากหนึ่งส่วนสี่รอบจากที่อื่นๆ และในลักษณะเดียวกันในระนาบสนามแม่เหล็ก ($\phi = 0^\circ, 0^\circ \le \theta \le 180^\circ$) สนามรวมจะมีค่าเป็นศูนย์เพราะว่าสมการ 4.29 ไม่มีค่า ดังนั้นแสดงว่าสนามที่แผ่กระจายจากแต่ละร่องจะถูกหักล้างโดยสนามที่แผ่กระจายจากร่องอื่นๆ 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 ซึ่งได้กำหนดฟังก์ชั่นมาตรฐาน (Basis Function) และฟังก์ชั่นถ่วงน้ำหนัก (weighting function) ปัญหานี้สามารถกำหนดโดยดลอไซกรีนฟังก์ชั่น (quasi-Green's function)

4.3.1 ควอไซกรีนฟังก์ชั่น

ในกระแสแม่เหล็กที่หายไปนั้น สนามที่แผ่กระจายในขอบเขตที่ 1 และขอบเขตที่ 2 เกิดขึ้นจากกระแสเชิงพื้นผิว J_s บนแผ่นสายอากาศถูกกำหนดโดยสมการ

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

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

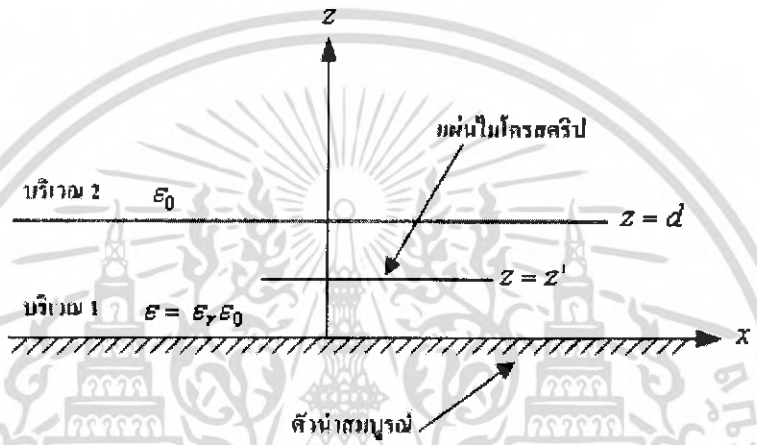
$$(\nabla^2 + k^2)A = -\mu J_s \tag{4.30}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสของแหล่งกำเนิด J_i คือแหล่งกำเนิดที่สร้าง J_s และคือกระแสไฟฟ้าบนสายส่งไมโครสตริป ซึ่งถูกกำหนดโดย

$$J_i = I_o \Psi \tag{4.31}$$

สำหรับสายส่งแบบไมโครสตริป เราจะได้



รูปที่ 4.8 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปและวัสดุฐานรอง

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

เมื่อ w_1 เป็นความกว้างประสิทธิผลของสายส่ง สำหรับวัสดุฐานรองบางได้มีการ ประมาณ w_1 เป็น $w_1 = w + 2z'$ เมื่อ w เป็นความกว้างของสายส่งไมโครสตริปที่ ป้อนสู่แผ่นสายอากาศ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

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

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

โดยขึ้นอยู่กับเงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสมสำหรับแต่ละขอบเขต

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

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

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

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

ศักย์เวคเตอร์ของกรีนฟังก์ชั่นสำหรับขอบเขตที่ 1 และ 2 หาได้จากการใช้การแปลงฟูเรียร์ผกผัน (inverse Fourier transform) ของ $\bar{G}_A^1$ และ $\bar{G}_A^2$ สำหรับขอบเขตไดอิเล็กตริกจะได้

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

เมื่อ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

ในสมการที่กล่าวมาข้างต้น

$$k_{z1} = \begin{cases} \left(\varepsilon_r k_0^2 - k_t^2\right)^{1/2} & ;k_t^2 \le \varepsilon_r k_0^2 \\ -j\left(k_t^2 - \varepsilon_r k_0^2\right)^{1/2} & ;\text{otherwise} \end{cases} \quad (4.42)$$

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

เมื่อ $k_t^2 = k_x^2 + k_y^2$

4.4 การสูญเสียในวัสดุฐานรองซิลิคอนโคปทองคำ

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

Q_r เป็น Q เนื่องจากความสูญเสียในการแผ่กระจาย

Q_d เป็น Q เนื่องจากความสูญเสียในตัวนำ

Q_d เป็น Q เนื่องจากความสูญเสียไดอิเล็กตริก

โดยที่ Q_0 สามารถหาได้จากค่าของ Q_r, Q_d และ Q_d ดังสมการ

$$\frac{1}{Q_0} = \frac{1}{Q_r} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} \quad (4.44)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสามารถเขียนความสัมพันธ์ของ Q_0 และประสิทธิภาพ η ได้ว่า

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

โดยที่

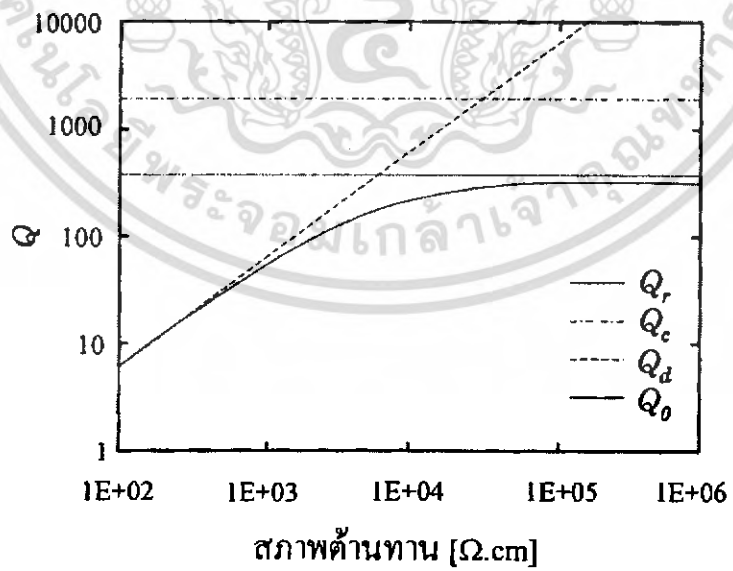
$$Q_r = \frac{3}{8}\varepsilon_r \frac{\lambda_0}{h}$$

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

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

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

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



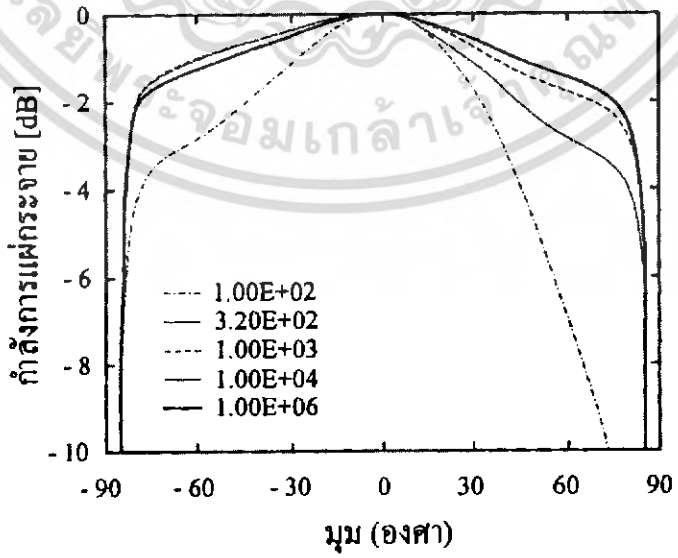
รูปที่ 4.9 องค์ประกอบ Q เปรียบเทียบกับสภาพความต้านทานของวัสดุฐานรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่น

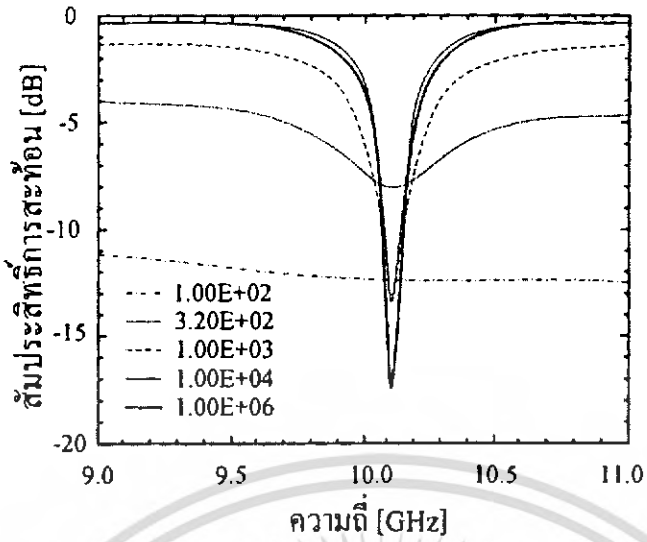
เนื่องจากวัสดุฐานรองที่มีค่าความต้านทานและค่าการสูญเสียที่ต่างกันนั้น จะมีผลต่อแบบ รูปการแผ่กระจายคลื่นโดยตรง ดังนั้นการวิเคราะห์ถึงแบบรูปการแผ่กระจายที่ได้จากการสร้างสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ จึงเป็นสิ่งที่ใช้ในการพิสูจน์ถึงการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศว่ามีประสิทธิภาพแตกต่างจากการสร้างบนวัสดุฐานรองที่เป็นฉนวนแบบอื่นอย่างไร โดยในการวิเคราะห์หาแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นนี้ได้อาศัยคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์ โดยใช้โปรแกรม Ensamble ของบริษัท Ansoft เพื่อหาคุณลักษณะของสายอากาศ เช่น แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นตลอดจนการเนื่องจากการสะท้อนกลับ ซึ่งโปรแกรมนี้ได้อาศัยการวิเคราะห์ด้วยวิธีโมเมนต์ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนต้น โดยสายอากาศที่สร้างขึ้นนั้นทำงานอยู่ในโมด TM_{100}

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

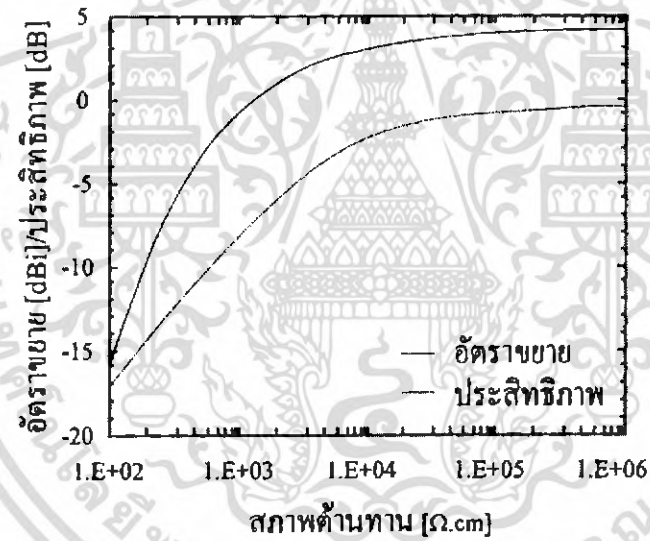


รูปที่ 4.10 แบบรูปการแผ่กระจายสนามไฟฟ้าบนวัสดุฐานรองที่ ρ ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 สัมประสิทธิ์การสะท้อนบนวัสดุฐานรองที่ ρ ต่างกัน



รูปที่ 4.12 อัตราขยายของสายอากาศและประสิทธิภาพเทียบกับสภาพความต้านทาน

4.6 ขั้นตอนการออกแบบ

4.6.1 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ

ในหัวข้อนี้เราจะมาพิจารณากันถึงขั้นตอนการออกแบบตลอดจนวิธีการออกแบบสายอากาศแบบไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งเป็นแบบที่ง่ายที่สุดสำหรับการออกแบบสายอากาศในลักษณะนี้ เนื่องจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ต้องการชี้ให้เห็นถึงคุณสมบัติของวัสดุฐานรองที่มีความเหมาะสม สำหรับการออกแบบได้อาศัยคอมพิวเตอร์ช่วยในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกแบบ โดยได้ใช้โปรแกรมโมเมนตัมของ (HP EEsof) แต่อย่างไรก็ตามผู้ออกแบบยังคงต้องป้อนค่าเริ่มต้นให้กับคอมพิวเตอร์ก่อน ค่าที่ป้อนให้นี้จะถูกใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการเลียนแบบ (Simulate) ซึ่งผู้ออกแบบเป็นผู้กำหนดคุณสมบัติต่างๆ ของสายอากาศที่ต้องการ เช่น ความถี่รีโซแนนท์ อินพุตอิมพีแดนซ์ ขนาดของสายอากาศ แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น ฯลฯ โดยอาศัยค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบดังนี้

ออกแบบที่ความถี่ f_r = 10GHz

สภาพยอมสัมพัทธ์ ε_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 พารามิเตอร์ต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.13

1.คำนวณค่า

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

โดยที่

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

$$\varepsilon_{reff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2}\left(1 + 12\frac{h}{w}\right)^{-\frac{1}{2}}$$

2.กำหนดค่าขนาดของแพ็ทช์โดยให้ $W_1 = \frac{\lambda_g}{2}$ และ $L_1 < \frac{\lambda_g}{2}$

3.ใส่พอร์ต ณ บริเวณตรงกลางขอบล่างของแพ็ทช์โดยให้เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $\frac{W_1}{100}$

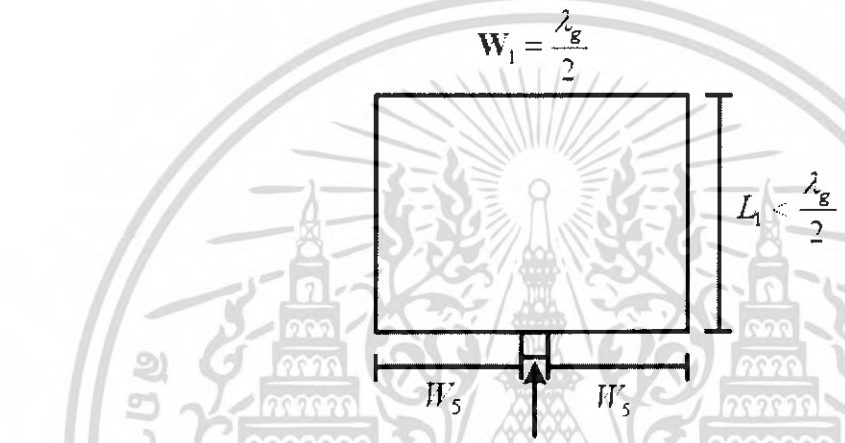
4.ทำการจำลอง (Simulate) โดยใช้โปรแกรมโมเมนตัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

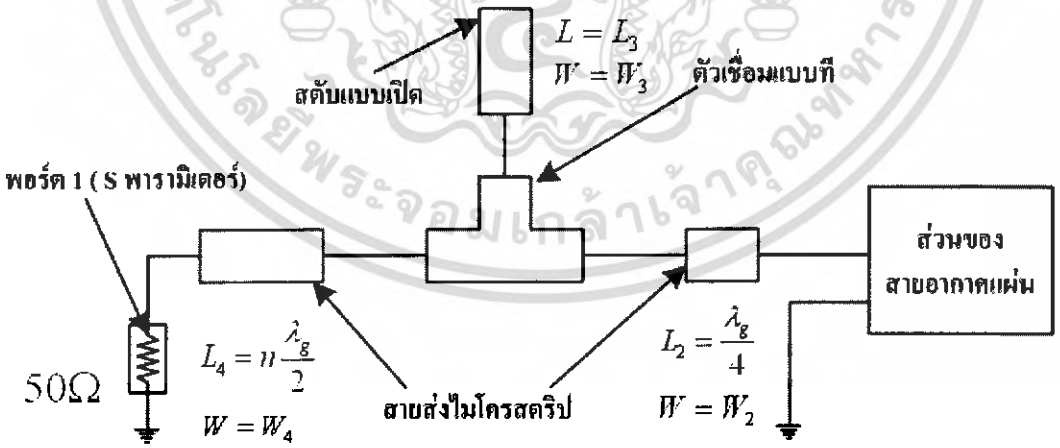
5.คำนวณค่า Z_{in} จาก S-Parameter, S_{11} โดย $Z_{in} = \frac{1+S_{11}}{(1-S_{11})*50}$

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 ค่าใหม่นี้ใช้ได้



รูปที่ 4.13 โครงสร้างของสายอากาศแผ่น



รูปที่ 4.14 โครงสร้างในส่วนของแมตซ์ชิ่ง

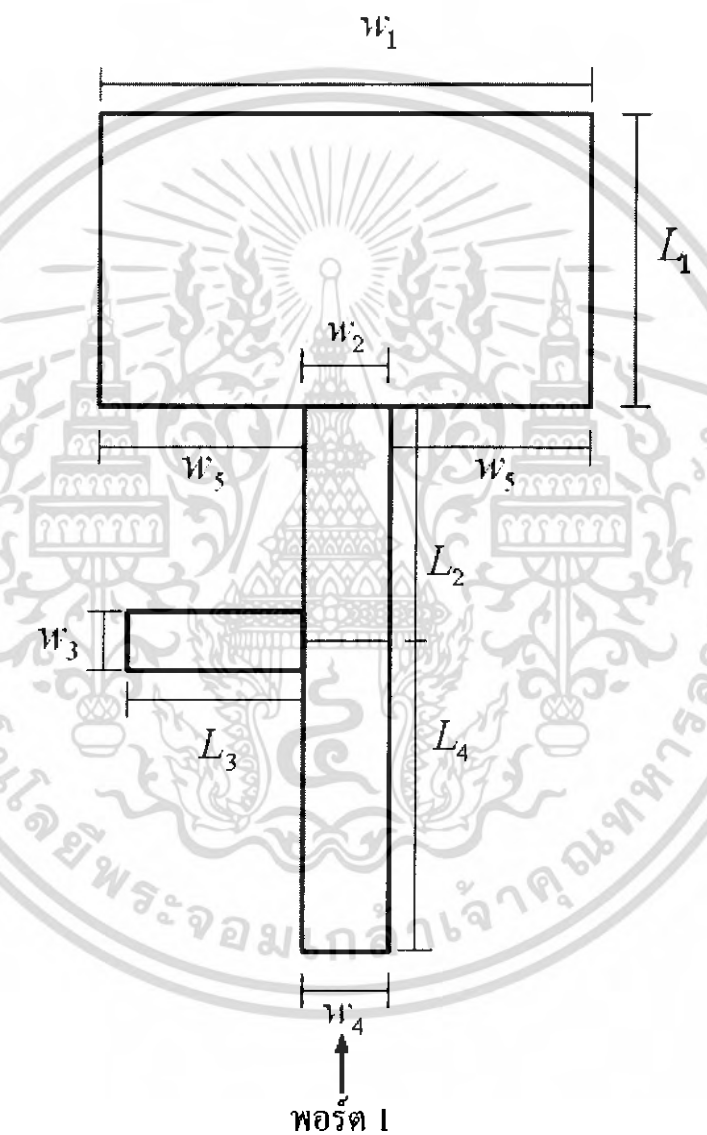
ขั้นตอนที่ 2 การออกแบบในส่วนของแมตซ์ชิ่ง (Matching Part) จากรูปที่ 4.14 โดยใช้โปรแกรม MDS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.ใส่ข้อมูลทั้งหมดที่จำเป็นให้กับโปรแกรม MDS

2. คำนวณความกว้าง W ที่ $Z = 50$ โอห์ม โดยแทนค่า $W = W_2 = W_3 = W_4$

3. ทำการคำนวณและทดลองปรับค่า L3 จนกว่า Real (Z_{in}) จะมีค่าเข้าใกล้ 50Ω และ Img (Z_{in}) มีค่า เข้าใกล้ 0 โดย $Z_{in} = \frac{1+S_{11}}{(1-S_{11})\times 50}$



รูปที่ 4.15 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศเมื่อนำสายอากาศแผ่นมารวมเข้ากับวงจรในส่วนของแมตซ์ชิ่งเรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

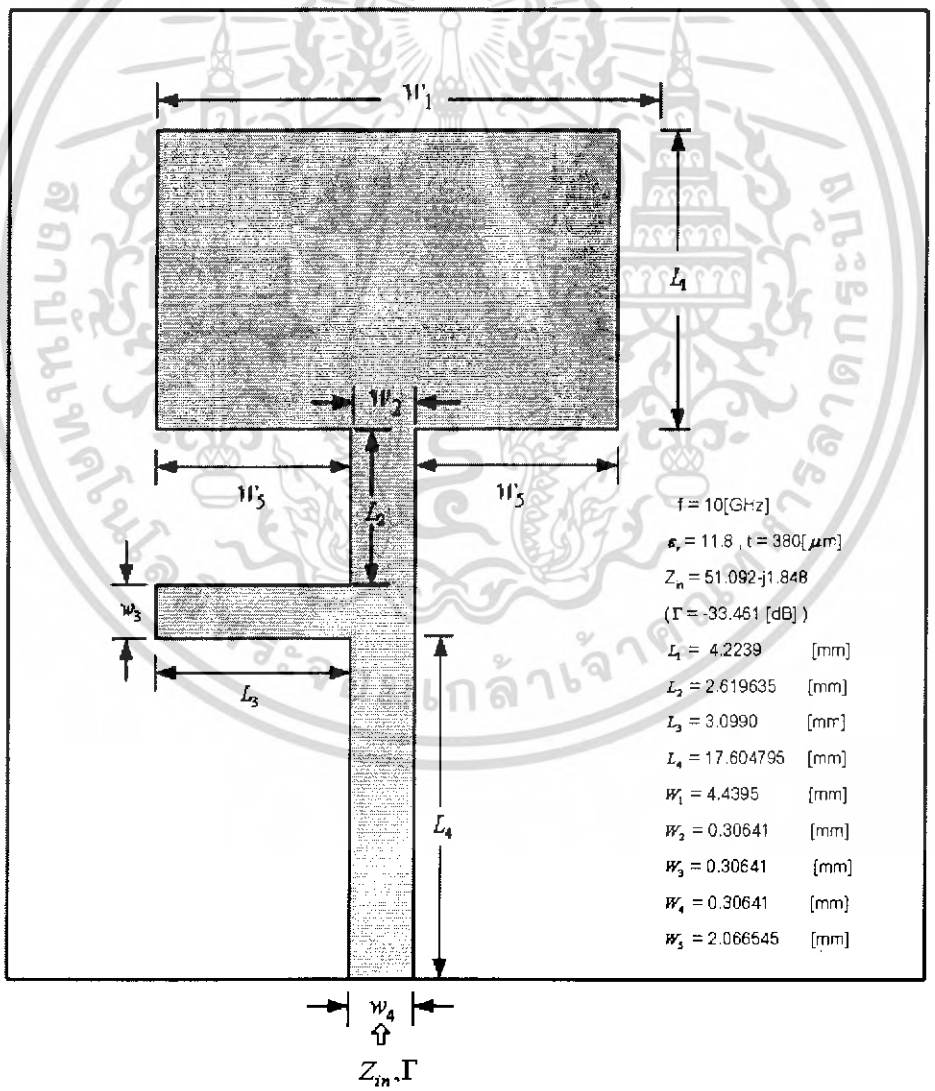
ขั้นตอนที่ 3 การออกแบบรวมส่วนของสายอากาศแผ่นเข้ากับส่วนของแมตซ์ชิ่ง แสดงดังรูปที่ 4.15 โดยใช้โปรแกรมโมเมนตัม

1. นำส่วนของวงจรแมตซ์ชิ่งที่ออกแบบโดยโปรแกรม MDS มาใส่รวมกับ Layout เดียวกันกับส่วนของสายอากาศแผ่นบนโปรแกรมโมเมนตัม

2. กำหนด Port 1 ที่จุดเริ่มต้นของสายป้อนสัญญาณ

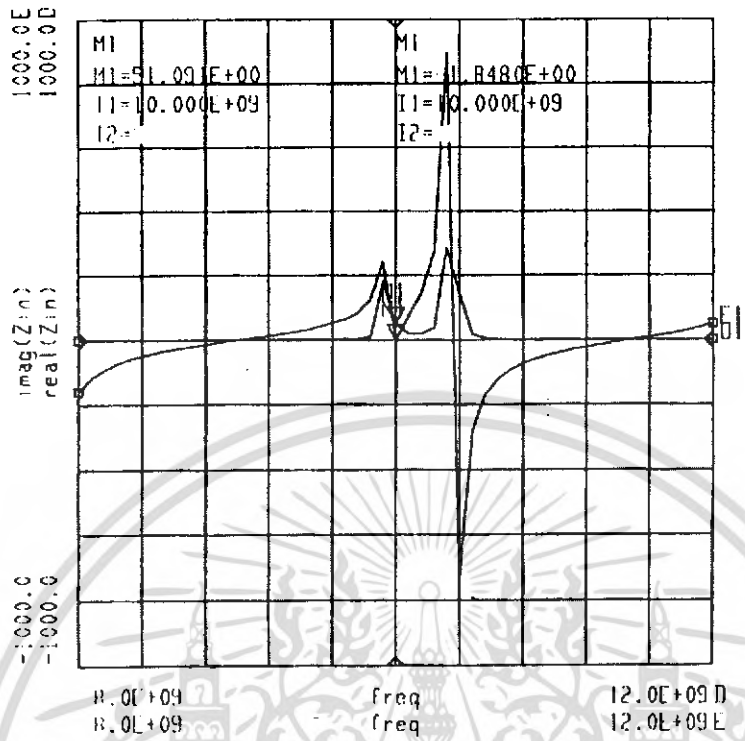
3. ทำการจำลองโดยใช้โปรแกรมโมเมนตัม

4. คำนวณค่าอินพุตพีแดนซ์จากค่า S_{11} และตรวจสอบส่วนจริง Real (Z_{in}) ว่ายังคงมีค่าใกล้เคียง 50 โอห์ม และส่วนจินตภาพI mg (Z_{in}) มีค่าเข้าใกล้ 0 อยู่หรือไม่ ถ้าไม่ให้ปรับค่า L_3 แล้วเริ่มต้นใหม่ โดยค่าขนาดของ S_{11}, $\Gamma(S_{11})$ ที่ใช้ได้คือ $\Gamma(S_{11})$ = –20dB

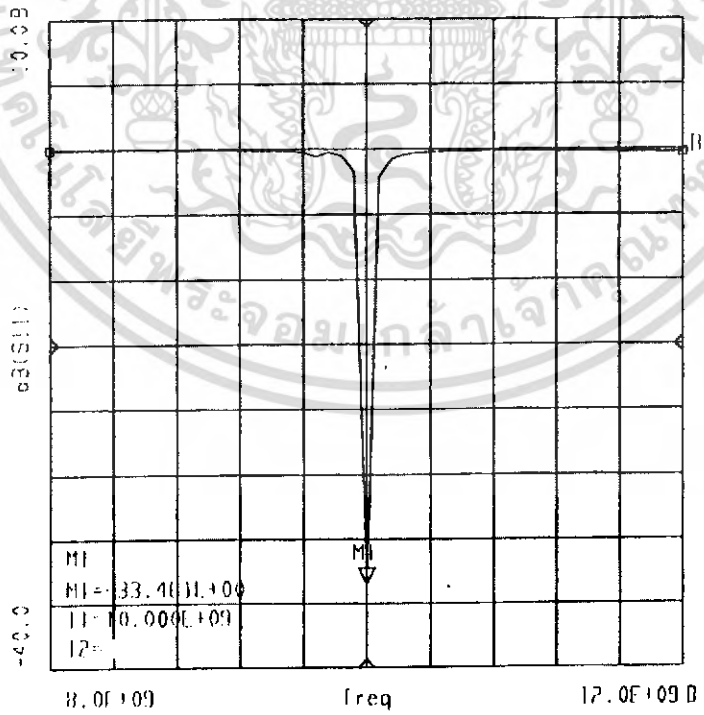


รูปที่ 4.16 ขนาดของสายอากาศและส่วนแมตซ์ชิ่งหลังการออกแบบเรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตอิมพีแดนซ์กับความถี่ (วัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ)



รูปที่ 4.18 S_{11} ที่ได้จากโปรแกรมโมเมนตัม (วัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตอิมพีแดนซ์ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับและความถี่

Frequency	**Real (Z_{in})**	**Img (Z_{in})**	**dB(S_{11})**
8.000 e+09	1.397	–158.450	–0.004
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
9600 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

Frequency	**Real (Z_{in})**	**Img (Z_{in})**	**dB(S_{11})**
10.16 e+09	19.761	144.252	–0.726
10.24 e+09	36.942	275.346	–0.403
10.22e+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	–91.214	–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	–43.497	–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	–0.192
11.92 e+09	0.954	39.577	–0.204
12.00 e+09	1.222	50.772	–0.209

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.2 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองกระจก

ในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองกระจก จะออกแบบโดยใช้โปรแกรมไมโครเวฟออฟฟิต โดยแบ่งการออกแบบเป็น 2 ส่วน คือการออกแบบตัวป้อนสัญญาณ (Feed) และแผ่นสายอากาศ (Patch) เหมือนกับสายอากาศไมโครนตริปบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโคปทองคำ

ซึ่งจะต้องระบุค่าดังต่อไปนี้

- ออกแบบที่ความถี่ $f_r = 10GHz$
- สภาพะยอมสัมพัทธ์ $\varepsilon_r = 7.5$
- ความหนาของวัสดุฐานรอง $h = 1.18mm.$
- ค่าความสูญเสีย (Loss tangent) $l = 0.0020$

เพื่อจะหาค่าความกว้าง (W) และความยาว (L) จากสมการดังต่อไปนี้

$$W = \frac{\lambda_0}{2}\sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r + 1}} \tag{4.47}$$

$$L = \frac{C}{2f_r\sqrt{\varepsilon_{reff}}} - 2\Delta L \tag{4.48}$$

โดยที่ λ_0 และ ε_{reff} หาได้จากสมการที่กล่าวมาข้างต้น

และ
$$\Delta L = h0.412\left[\frac{\left(\varepsilon_{reff}0.3 + \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)\right)}{\left(\varepsilon_{reff} - 0.258\right)\left(\frac{W}{h} + 0.8\right)}\right] \tag{4.49}$$

ขั้นตอน การออกแบบรวมส่วนของสายอากาศแผ่นเข้ากับส่วนของแมตซ์ชิ่งโดยใช้โปรแกรมไมโครเวฟออฟิต

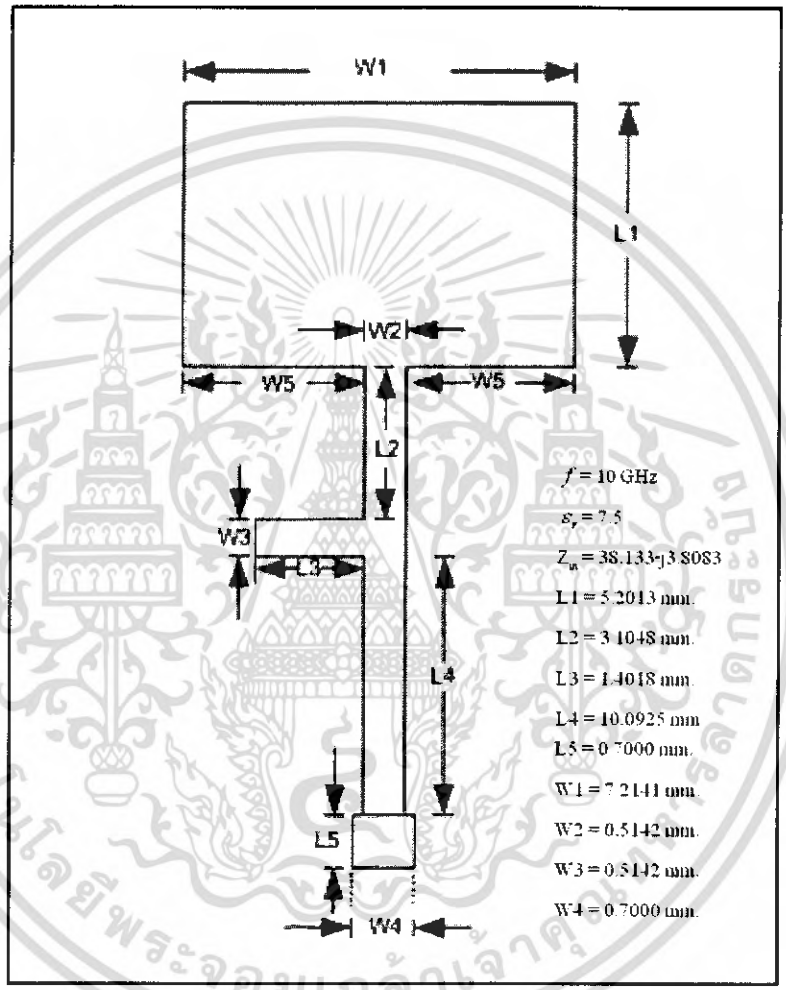
1. เปิดโปรแกรมไมโครเวฟออฟิตขึ้นมา ทำการสร้างชื่อไฟล์ และป้อนค่าจำเป็นให้กับโปรแกรม

2. ออกแบบโดยการวาดขนาดของแผ่นสายอากาศ ตามที่ได้คำนวณมา

3. ทำการจำลองการแพร่กระจายของคลื่นเพื่อทดสอบผลที่ได้

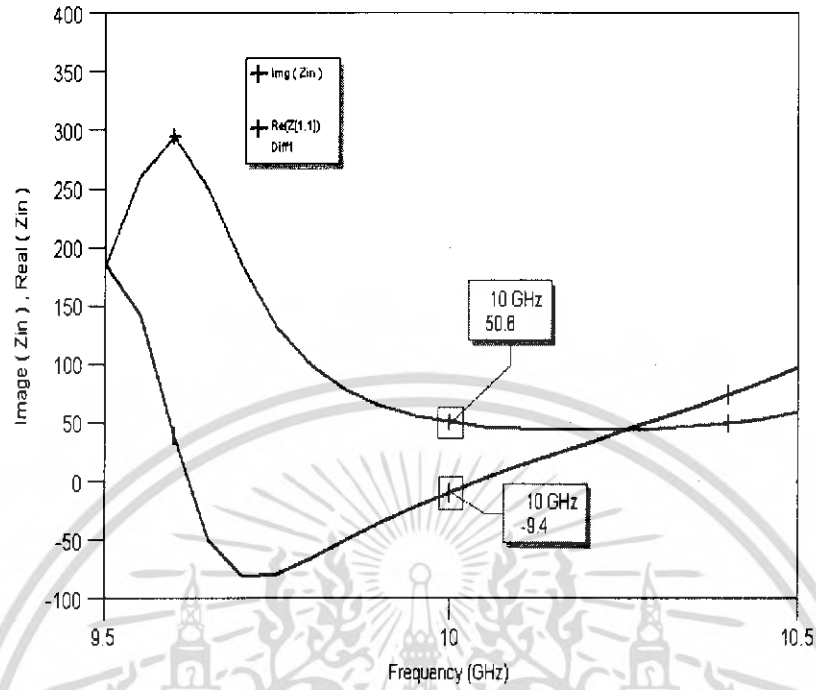
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ออกแบบตัวป้อนสัญญาณ แล้วทำการจำลองผลดูค่า อินพุตอิมพีแดนซ์จากค่า S_{11} ตรวจสอบส่วนจริง Img(Z_{in}) มีค่าเข้าใกล้ 0 อยู่หรือไม่ ถ้าไม่ให้ปรับค่า L_3 แล้วเริ่มต้นจำลองใหม่ ทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ โดยค่าขนาดของ S_{11} , $\Gamma(S_{11})$ = -28 dB

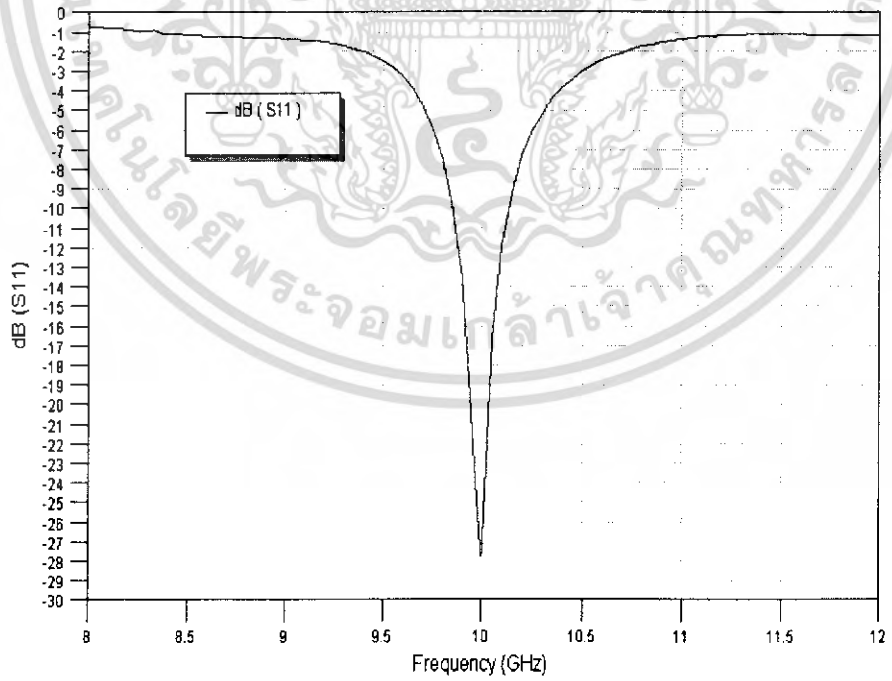


รูปที่ 4.19 ขนาดของสายอากาศและส่วนแมตช์ชิ่งหลังการออกแบบเรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตอิมพีแดนซ์กับความถี่ (วัสดุฐานรองกระจก)



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตอิมพีแดนซ์กับความถี่ (วัสดุฐานรองกระจก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตอิมพีแดนซ์ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับและความถี่

Frequency (GHz)	**Real (Z_{in})**	**Img (Z_{in})**	**dB (S_{11})**
8	2.7226	-27.903	-0.72133
8.05	2.7168	-24.124	-0.76581
8.1	2.7284	-20.401	-0.81293
8.15	2.7576	-16.718	-0.86223
8.2	2.8052	-13.057	-0.91306
8.25	2.872	-9.4037	-0.96462
8.3	2.9595	-5.7411	-1.016
8.35	3.0698	-2.0528	-1.0661
8.4	3.2054	1.6787	-1.1139
8.45	3.3696	5.4718	-1.1585
8.5	3.5666	9.3467	-1.199
8.55	3.8021	13.326	-1.235
8.6	4.0829	17.434	-1.2662
8.65	4.4182	21.7	-1.2928
8.7	4.8197	26.157	-1.3152
8.75	5.3029	30.845	-1.3341
8.8	5.8884	35.811	-1.3507
8.85	6.604	41.112	-1.366
8.9	7.488	46.819	-1.3813
8.95	8.5939	53.021	-1.3981
9	9.9982	59.83	-1.4178
9.05	11.813	67.39	-1.442
9.1	14.206	75.887	-1.4724
9.15	17.44	85.568	-1.511
9.2	21.933	96.75	-1.5602
9.25	28.382	109.83	-1.6226
9.3	37.996	125.28	-1.7019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

Frequency (GHz)	**Real (Z_{in})**	**Img (Z_{in})**	**dB (S_{11})**
9.4	77.183	163.85	-1.9301
9.45	117.53	182.77	-2.0928
9.5	181.94	186.2	-2.3011
9.55	260.94	141.99	-2.57
9.6	294.99	38.945	-2.9198
9.65	249.74	-50.156	-3.38
9.7	182.63	-81.459	-3.9928
9.75	131.92	-79.114	-4.8205
9.8	99.193	-65.747	-5.9575
9.85	78.451	-50.315	-7.5558
9.9	65.089	-35.513	-9.8871
9.95	56.332	-21.921	-13.549
10	50.568	-9.4803	-28.245
10.05	46.85	2.0327	-20.536
10.1	44.609	12.86	-16.71
10.15	43.5	23.223	-12.03
10.2	43.313	33.319	-9.2946
10.25	43.932	43.324	-7.4749
10.3	45.302	53.404	-6.1831
10.35	47.423	63.718	-5.2275
10.4	50.344	74.433	-4.4984
10.45	54.166	85.727	-3.928
10.5	59.058	97.797	-3.4723
10.55	65.274	110.87	-3.1012
10.6	73.193	125.19	-2.7944
10.65	83.374	141.06	-2.5373
10.7	96.651	158.76	-2.3196

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

Frequency (GHz)	**Real (Z_{in})**	**Img (Z_{in})**	**dB (S_{11})**
10.75	114.28	178.59	-2.1338
10.8	138.2	200.62	-1.9742
10.85	171.37	224.44	-1.8368
10.9	218.32	248.25	-1.7184
10.95	285.4	266.78	-1.6164
11	379.23	267.09	-1.529
11.05	497.79	223.04	-1.4545
11.1	607.99	102.92	-1.3915
11.15	639.4	-81.89	-1.339
11.2	562.2	-247.01	-1.296
11.25	436.08	-331.18	-1.2616
11.3	322.28	-349.03	-1.235
11.35	238.36	-334.85	-1.2155
11.4	180.16	-309.86	-1.2024
11.45	139.97	-283.35	-1.195
11.5	111.75	-258.69	-1.1925
11.55	91.433	-236.8	-1.1939
11.6	76.412	-217.69	-1.1985
11.65	65.007	-201.06	-1.2052
11.7	56.117	-186.55	-1.2128
11.75	49.007	-173.81	-1.2202
11.8	43.179	-162.53	-1.2265
11.85	38.293	-152.44	-1.2308
11.9	34.116	-143.32	-1.2325
11.95	30.489	-134.97	-1.2316
12	27.313	-127.24	-1.2287

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 สรุป

จากการวิเคราะห์โดยวิธีแบบจำลองคาวิตี้ และวิธีโมเมนต์ในหัวข้อที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติของวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ ซึ่งจากการวิเคราะห์ถ้ามีค่าสภาพความต้านทาน (ρ) ที่มากกว่า $10^4[\Omega \cdot cm]$ จะทำให้ลดการสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในวัสดุฐานรอง และนอกจากนี้ยังจะทำให้ได้แบบรูปของสายอากาศแบบไมโครสตริปที่สมมาตรถูกต้องตามทฤษฎี จากผลที่ได้จากการเลียนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำนี้ได้นำเสนอนี้สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุฐานรองสำหรับสายอากาศที่มีโครงสร้างแบบระนาบได้เป็นอย่างดี และเหมาะสมและในอนาคตอันใกล้นี้การที่จะรวมสายอากาศที่มีลักษณะโครงสร้างแบบระนาบเข้ากับอุปกรณ์แอกทีฟเป็นได้อย่างแน่นอน

อนึ่งสายอากาศไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองกระจก ถือว่าเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่มีการนำมาทำเป็นวัสดุฐานรอง จากโปรแกรมที่จำลอง จะเห็นว่าโอกาสในการทำสายอากาศไมโครสตริปขึ้นมาบนวัสดุฐานรองชนิด สามารถนำไปประยุกต์โดยใช้เทคโนโลยีทางด้านเซมิคอนดัคเตอร์เพื่อนำไปวิจัยและพัฒนาสร้างเป็นสายอากาศแอกทีฟ โดยการสร้างสายอากาศไมโครสตริปเข้ากับอุปกรณ์แอกทีฟ เพื่อใช้งานในด้านระบบเรดาร์ในอนาคตต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
กระบวนการสร้างสายอากาศ

จากที่ได้ศึกษาคุณสมบัติและโครงสร้างสายอากาศบนวัสดุฐานรองต่าง ๆ ตลอดจนศึกษาถึงการวิเคราะห์ และหลักกรออกแบบโดยใช้พารามิเตอร์ต่างๆ ที่สำคัญของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป ดังที่ได้กล่าวในบทที่ 2 ,3 และ 4 เพื่อที่สามารถสร้างสายอากาศให้มีประสิทธิภาพสูง จึงได้นำเสนอวัสดุฐานรองใหม่ ซึ่งฐานต้องที่ใช้เป็นวัสดุฐานรองใหม่นี้เป็นสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดเอ็น ที่ถูกเติมด้วยอะตอมทองคำและวัสดุฐานรองที่เป็นกระจก จะแสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ยังเป็นผลทำให้สภาพความต้านทานเปลี่ยนแปลงไปด้วย

กระบวนการสร้างของสายอากาศในปริญญานิพนธ์นี้เป็นกระบวนการสร้างที่ง่ายแบบทั่วไปทางด้านเซมิคอนดัคเตอร์โดยทำที่อุณหภูมิสูง ซึ่งขั้นตอนการสร้างได้แสดงในแผนภูมิรูปที่ 5.2

กระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำส่วนใหญ่จะเป็นกระบวนการสร้างในแนวระนาบ (Planar Process) ซึ่งรวมถึงสายอากาศระนาบด้วย กระบวนการสร้างในแนวระนาบได้เริ่มต้นสร้างตั้งแต่ปี ค.ศ. 1959 ด้วยจุดเด่นของกระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำแบบนี้เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการสร้างในยุคต้นๆ เช่น วิธีการอัลลอยด์เป็นต้น พบว่ากระบวนการสร้างในแนวระนาบมีข้อได้เปรียบสำหรับสร้างเป็นวงจรรวมคือ รอยต่อของสารกึ่งตัวนำจะถูกคลุมด้วยชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งป้องกันไม่ให้รอยต่อทำปฏิกิริยาโดยตรงกับสายอากาศหรือสิ่งเจือปนชนิดอื่นๆเป็นผลให้เกิดกระแสรั่วไหลต่ำมาก ดังนั้นอุปกรณ์จึงมีความเชื่อถือได้สูง (High Reliability) และการออกแบบต้นแบบ และเทคนิคการจำกัดซึ่งใช้ในการกำหนดโครงสร้างซึ่งจะทำให้สามารถลดขนาดให้เล็กลง และสะดวกในการสร้างอุปกรณ์จำนวนมาก ๆ ได้พร้อมกันบนแผ่นผลึกซิลิคอนเดียวกัน

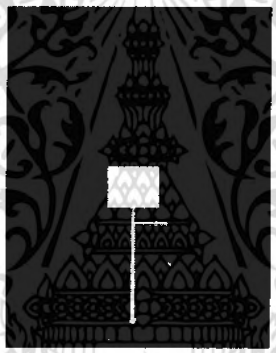
5.1 การบวนการสร้างสายอากาศ

5.1.1 ขั้นตอนทำกระจกต้นแบบ

หลังจากที่ได้ออกแบบวงจรเรียบร้อยบนกระดาษกราฟ จากนั้นก็จะนำมาเป็นต้นแบบในการตัดแผ่นพลาสติก ลามิเนต ประกอบด้วยไมลาร์ชีทเคลือบพลาสติกสีแดง เครื่องตัดนั้นเรียกว่าไมโครพล็อตเตอร์ เป็นไปมีดเลื่อนตัดได้ 2 แกน มีความละเอียด 0.1 μm ไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งที่ต้องการตัด แล้วทำการตัดตามข้อมูลที่เก็บไว้โดยจะตัดลอกเฉพาะพลาสติกสีแดงออกเหลือเป็นแผ่นไมลาร์ใส เมื่อได้ต้นแบบบนแผ่นไมลาร์แล้ว จากนั้นนำมาเข้าเครื่องถ่ายย่อส่วน หากต้องการย่อส่วนลงมาก ๆ เช่น 200 เท่า เราก็จะใช้วิธีย่อส่วน 2 ครั้ง ครั้งแรกย่อต้นฉบับลง 20 เท่าลงบนฟิล์มกระจก (Phosphosillicate glass) จากนั้นนำฟิล์มกระจกไปย่อซ้ำอีก 10 เท่า จะได้การถ่ายย่อส่วน 200 เท่านำไปพิมพ์ลวดลายลงแผ่นกระจกเรียบ เมื่อใช้เป็น Photomask กล้องถ่ายย่อส่วนเรียกว่า Step and Repeat Camera ใช้เวลาในการถ่าย 10-30 วินาที จากนั้นนำมาแช่น้ำยา Developer อีก $1\frac{1}{2}$ นาที ล้างน้ำแล้วแช่ Fixer อีก 3 นาที เอาไปเป่าให้แห้งด้วยไนโตรเจน (N_2) เป็นการจบขั้นตอนการออกแบบ และถ่ายมาส์คพร้อมที่จะนำไปใช้ในการถ่ายต้นแบบวงจรในกระบวนการโฟโต้ลิโทกราฟฟีได้



รูปที่ 5.1 กระจกมาส์ค

5.1.2 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นซิลิคอน

5.1.2.1 เซ็กคุณสมบัติ

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

5.1.3 กระบวนการเคลือบสารทองคำ (Au Evaporation)

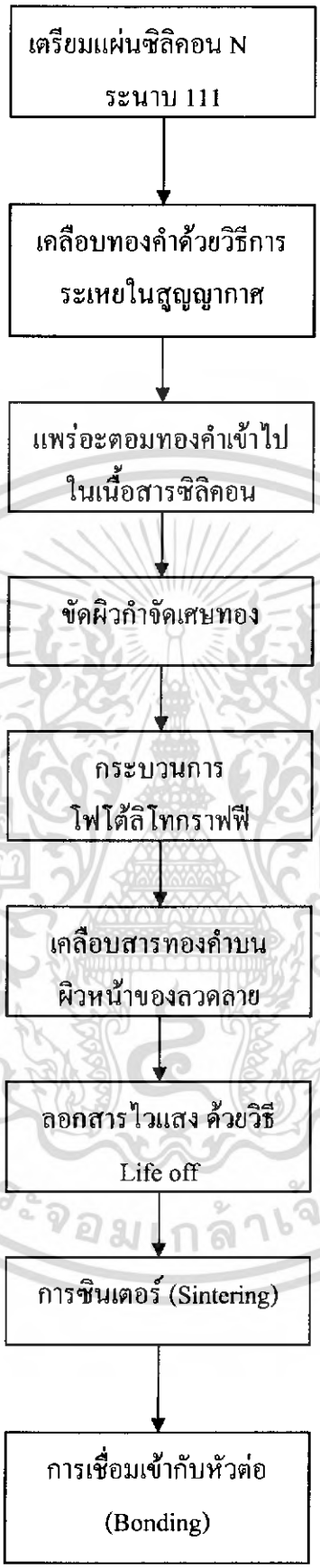
ในกระบวนการเคลือบชั้นทองทำในสูญญากาศ (Gold Evaporation) โดยการใช้อุปกรณ์ (Vaccum evaporator) ได้ทำการเคลือบแผ่นผลึกซิลิคอนด้วยชั้นทองคำหนาประมาณ 0.16 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับเทคนิคการเคลือบสารในระบบสูญญากาศที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตังนำมีหลายวิธีในปริญญานิพนธ์นี้ได้ใช้เทคนิค Filament Evaporation

กระบวนการเคลือบด้วยไส้ (Filament Evaporation)เป็นวิธีที่ง่ายที่สุด สิ้นเปลืองน้อยไม่มีผลต่อการแผ่กระจายไอออน แต่วิธีนี้จะมีข้อเสียที่อายุการใช้งานของไส้ (Filament) จะสั้นสำหรับการเคลือบทองสารทองคำทำได้โดยทำให้สารทองคำนั้นได้รับความร้อนสากไส้หรือโบ๊ต (Boat) ที่ทำจากสารทังสเตน (Tungstan) หรือมอลิดินัม (Molydenum)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 กระบวนการสร้างของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.3 ภาพตัดขวางแผ่นผลึกซิลิคอน

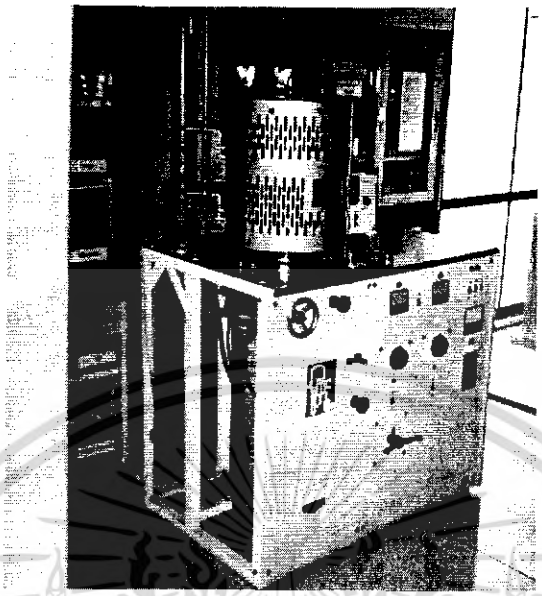
ไส้หรือโบ๊ตนี้ จะให้ความร้อนออกมาจากการที่มีกระแสไฟฟ้าจำนวนมากไหลผ่านโดย ในขณะทำการเคลือบสารทองคำ จะควบคุมให้กระแสไหนผ่านไส้หรือโบ๊ตเพิ่มขึ้นทีละน้อย ๆ จนกระทั่งสารเคลือบทองคำที่วางอยู่ที่ไส้หลอมตัวเป็นของเปลวติดอยู่กับไส้ก็จะระเหยเป็นไอฟุ้งกระจายเคลือบผลึกซิลิคอนที่วางใน chamber

ลำดับขั้นตอนของการเคลือบสารในสูญญากาศ

1) ทำความสะอาดและเตรียมผิวของแผ่นผลึกให้แห้ง
2) วางแผ่นผลึกลงใน chamber ในตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อให้ชั้นสารที่เคลือบมีความหนาสม่ำเสมอ
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 ไปเคลือบแผ่นซิลิคอน
6) ทำการเคลือบสารเจอทองคำลงบนแผ่นผลึกให้หนาตามต้องการ ขณะทำการเคลือบสารแผ่นผลึกซิลิคอน บางครั้งควรให้ความร้อนบนแผ่นผลึกที่เหมาะสมเพื่อให้ชั้นของสารที่เคลือบติดแน่นกับแผ่นผลึกซิลิคอน
7) หยุดทำการเคลือบสาร ปล่อยให้ทุกอย่างใน chamber เย็นตัวลง 30 นาที
8) ปล่อยอากาศเข้าไปใน chamber อย่างช้า ๆ จนความดันเป็นปกติแล้วยก chamber ขึ้น

รูปที่ 5.4 ภาพตัดขวางการเคลือบสารทองคำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 อุปกรณ์เคลือบในสูญญากาศ

5.1.4 กระบวนการแพร่อะตอมทองคำ (Au Diffusion)

ในกระบวนการแพร่อะตอมทองคำลงในซิลิคอนนี้ได้ทำที่อุณหภูมิ $1025^{\circ}C$ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

รูปที่ 5.6 ภาพตัดขวางการแพร่อะตอมทองคำลงในแผ่นผลึกซิลิคอน

รูปที่ 5.7 เตาแพร่อะตอมทองคำในแผ่นซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.5 การขัดผิวกำจัดเศษทอง (Au Lapping)

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

รูปที่ 5.8 ภาพตัดขวางหลังการ Lapping

รูปที่ 5.9 การขัดผิวหน้าแผ่นซิลิคอนโดปทอง

5.1.6 กระบวนการโฟโต้ลิโทกราฟฟี

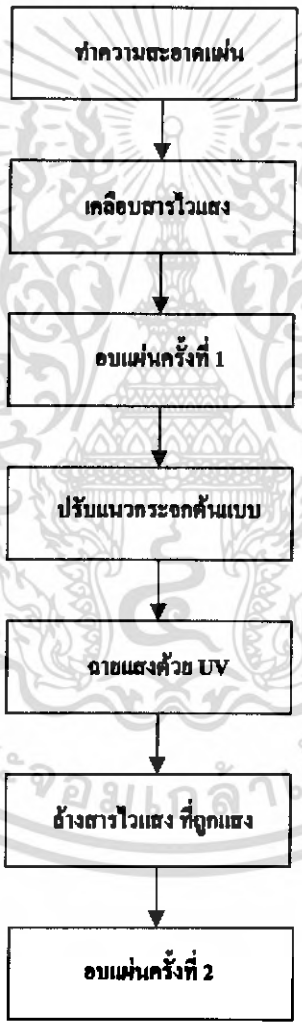
กระบวนการโฟโต้ลิโทกราฟฟีเป็นขั้นตอนการถ่ายจากมาส์ค (Mask) ไปยังผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน ซึ่งขั้นตอนพื้นฐานของกระบวนการนี้ แสดงดังในรูปที่ 5.10 สำหรับขั้นตอนโฟโต้ลิโทกราฟฟีต้องทำในห้องสะอาดสำหรับการปฏิบัติการเพื่อป้องกันฝุ่นละอองที่จะตกลงมาที่ฐานรองซิลิคอน ในขั้นตอนของน้ำยาไวแสงซึ่งจะทำให้เกิดจุดเสียขึ้นที่ลวดลายที่ถ่ายแบบลงไป จุดเสียที่เกิดขึ้นควรควบคุมไม่ให้เกิน10% ไม่เช่นนั้นเมื่อถ่ายแบบครบทั้งกระบวนการซึ่งจะใช้มาร์ค ไม่ต่ำกว่า 7-8 แผ่น ทำให้อุปกรณ์ที่สร้างเสร็จมีโอกาสเสียหายมากกว่า 50% ดังนั้นห้องสะอาดจึงมีความจำเป็นมากสำหรับกระบวนการโฟโต้ลิโทกราฟฟี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับขั้นตอนกระบวนการโฟโต้ลิโทกราฟฟี

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

หยดสารไวแสงบนแผ่นผลึกที่ติดบนแป้นหมุนของสปินเนอร์ โดยตั้งความเร็วรอบสูงๆเพื่อที่จะให้สารไวแสงเคลือบเป็นฟิล์มบาง ๆ บนแผ่นผลึกหนาประมาณ 3000 ° A – 4000 ° A โดยให้ความเร็วรอบ 3000 rpm เป็นเวลา 30 นาที ถ้าใช้ความเร็วรอบต่ำเกินไป ลักษณะของชั้น

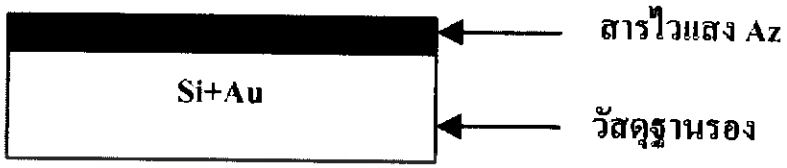


รูปที่ 5.10 ขั้นตอนขบวนการโฟโต้ลิโทกราฟฟี

ลักษณะของชั้นฟิล์มที่เคลือบแผ่นผลึกจะเกิดนูนตรงกลาง ถ้าความเร็วรอบสูงเกินไป ชั้นฟิล์มที่เคลือบก็จะกระจายไปนูนที่บริเวณขอบ ถ้าเคลือบหนาไป ผิวจะหยาบ ไม่เรียบ และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

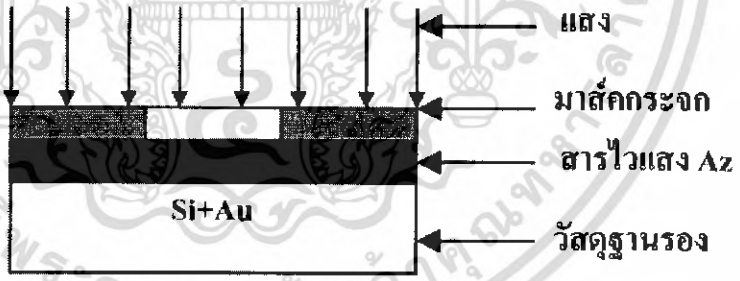
ที่สำคัญต้องระวังฝุ่นอย่างมาก



รูปที่ 5.11 ภาพตัดขวางหลังจากเคลือบสารไวแสง

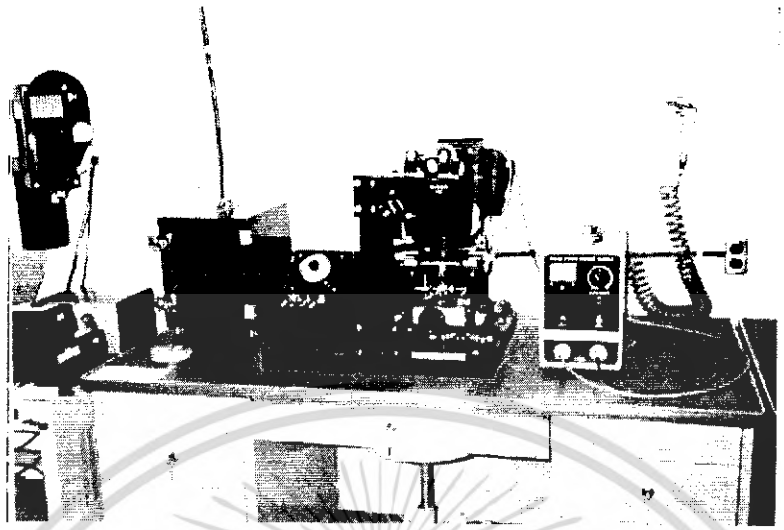
5.1.7 การฉายด้วยแสงอุลตร้าไวโอเลต (Exposed to UV)

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



รูปที่ 5.12 ภาพตัดขวางขั้นตอนฉายแสง

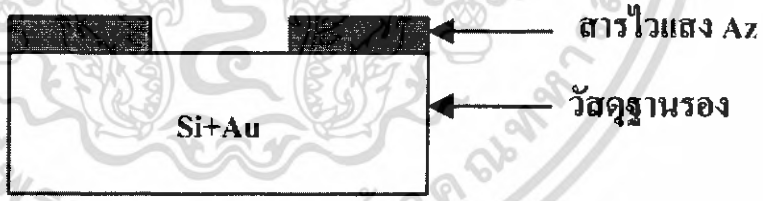
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.13 เครื่อง Alignment Expose

5.1.8 การล้างสารไวแสง (Development)

การ Development เป็นการสร้างลวดลายบนน้ำยาไวแสงที่ผ่านการฉายแสงแล้วด้วย developer ในน้ำยาไวแสง (AZ Developer) แบบบวก ส่วนที่ถูกแสงจะถูกละลายออกไปด้วยน้ำบริสุทธ์ โดยใช้เวลาประมาณ 1-2 นาที



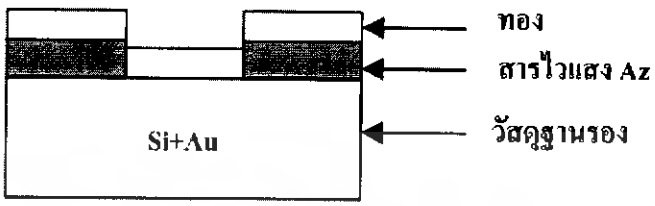
รูปที่ 5.14 ภาพตัดขวางหลังจาก developer

จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ (Prebake) 90 °C โดยใช้เวลาประมาณ 10 นาที อยู่ในเตาอบเพื่อให้ส่วนที่เป็นชั้นฟิล์มต้องทำให้ฟิล์มติดแน่นยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.9 กระบวนการเคลือบสารทองคำ (Au Evaporation)

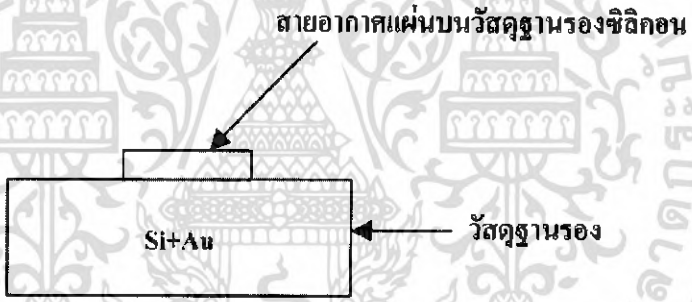
ขั้นตอนและกระบวนการนี้เหมือนกับกระบวนการในขั้นตอนที่ 3 ทุกประการ



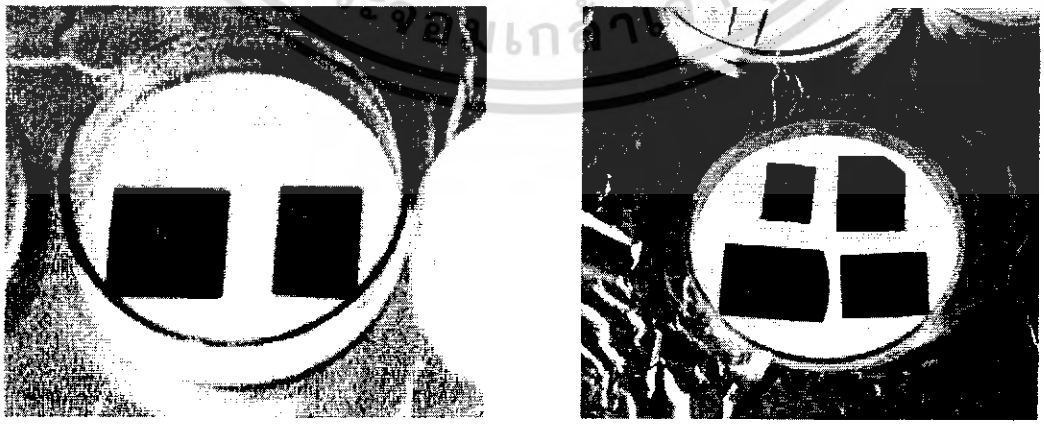
รูปที่ 5.15 ภาพตัดขวางกระบวนการเคลือบสารทองคำ

5.1.10 กระบวนการลอกฟิล์ม (Resist Removal Process หรือ Lift off Process)

ทำการลอกฟิล์มโดยใช้ (Acetone or AZ- remove)



รูปที่ 5.16 ภาพตัดขวางของชิ้นงานที่ได้หลังจากลอกฟิล์มแล้ว



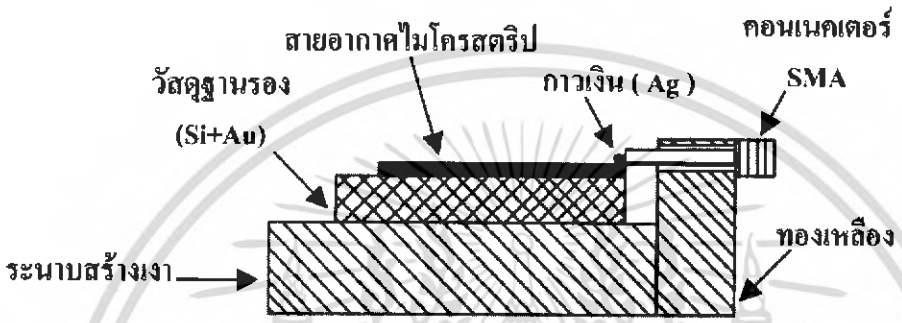
รูปที่ 5.17 ชิ้นงานเมื่อทำการลอกฟิล์มแล้ว (ซิลิคอนโดปทองคำ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.11 กระบวนการซินเตอร์ (sintering)

ทำการซินเตอร์ ที่อุณหภูมิประมาณ 250 ° C – 300 ° C เพื่อให้ส่วนสายอากาศกับเนื้อซิลิคอนยึดติดกันให้แน่นยิ่งขึ้น

5.1.12 กระบวนการเชื่อมต่อ (bonding)



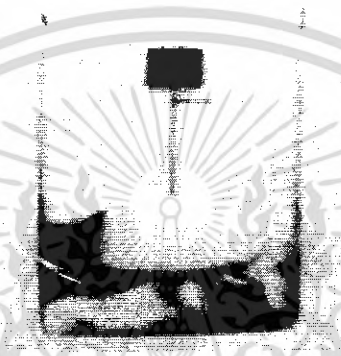
รูปที่ 5.18 โครงสร้างภาพตัดขวางของสายอากาศที่ได้หลังการเชื่อมต่อ (วัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ)

รูปที่ 5.19 สายอากาศแผ่นไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำที่เชื่อมต่อเสร็จแล้ว

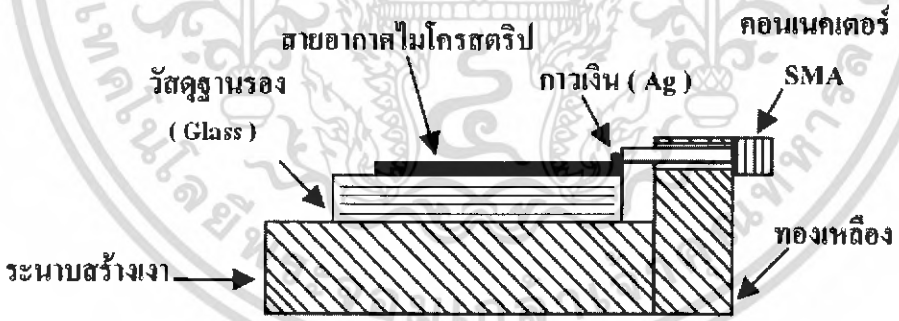
ในกรณีสายอากาศไมโครสตริปที่มีการสร้างบนวัสดุฐานรองกระจก จะมีขั้นตอนการสร้างคล้ายๆกับสายอากาศไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ หากเพียงแต่ว่า จะไม่มีการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดปสารทองคำลงบนผิวกระจก แต่จะใช้การแพร่อะตอมของทองแดงลงบนกระจกแทน ซึ่งขั้นตอนถัดมาก็มีลักษณะเหมือนกับสายอากาศไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองซิลิคอนที่โดปด้วยทองคำ ดังที่กล่าวมาข้างต้น

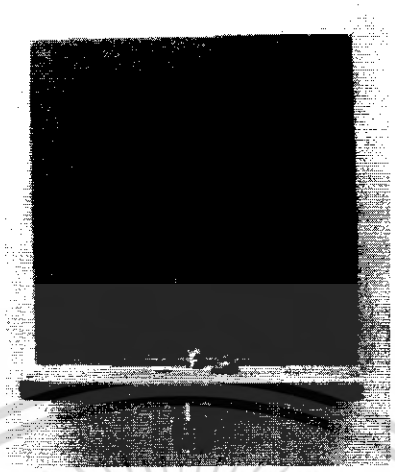


รูปที่ 5.20 ชิ้นงานเมื่อทำการลอกฟิล์มแล้ว (ทองแดงบนกระจก)



รูปที่ 5.21 โครงสร้างภาพตัดขวางของสายอากาศที่ได้หลังการเชื่อมต่อ (วัสดุฐานรองกระจก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.22 สายอากาศแผ่นไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองกระจกที่เชื่อมต่อเสร็จแล้ว

5.2 สรุป

ในบทนี้ได้แสดงถึงกระบวนการสร้างสายอากาศแผ่นแบบโมโนลิตริกบนฐานรองซิลิคอนที่ถูกโดปทองคำและสายอากาศแผ่นแบบโมโนลิตริกบนฐานรองกระจก โดยที่สายอากาศแผ่นแบบโมโนลิตริกบนฐานรองซิลิคอนที่ถูกโดปด้วยทองคำ แผ่นผลึกซิลิคอนที่นำมาสร้างเป็นชนิดเอ็น มีค่าสภาพความต้านทาน $10^2[\Omega \cdot cm]$ สภาพความยอมสัมพัทธ์ (ε_r) 11.8 และระนาบ (111) ได้ใช้สารเจือทองคำบริสุทธิ์โดปด้วยวิธีสร้างที่ง่ายแบบทั่วไปด้วยกระบวนการทางเซมิคอนดักเตอร์ (Semiconductor Process) โดยใช้ความร้อนในการระเหยในสุญญากาศ และแพร่สารเจออะตอมทองคำที่อุณหภูมิ $1025^{\circ}C$ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ส่วนกระบวนการโฟโต้ลิโทการฟฟีเป็นการสร้างรูปแบบ (Pattern) ของสายอากาศ ด้วยการเคลือบสารไวแสง AZ 4620A หรือ AZ 5200E โดยใช้สปินเนอร์ 300 rpm. แล้วทำการอบที่ อุณหภูมิ $90^{\circ}C$ โดยใช้เวลา 10 นาที จากนั้นก็นำไปฉายรังสีอุลตร้าไวโอเลต (UV) แล้วทำการ Developer ด้วย AZ(สำหรับ Developer) ก็จะได้ลวดลายสายอากาศ แล้วจึงนำไปเคลือบด้วยสารทองคำอีกครั้ง หลังจากนั้นนำไปลอกฟิล์มออก ก็จะได้สายอากาศบนซิลิคอนตามต้องการ และเพื่อให้การยึดติดของสายอากาศกับฐานรองแน่น ก็ทำการซินเตอร์ที่อุณหภูมิประมาณ $250^{\circ}C - 300^{\circ}C$ และสายอากาศแผ่นแบบโมโนลิตริกบนฐานรองกระจก จะมีการสร้างที่เหมือนกัน แต่ต่างกันตรงที่เราจะแพร่อะตอมของทองแดงลงบนกระจกแทน จากนั้นนำสายอากาศโมโนลิตริกที่มีวัสดุฐานรองทั้งสองแบบ ไปเชื่อมต่อเข้ากับคอนเนคเตอร์ SMA แล้วทำการทดสอบคุณสมบัติการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
การทดลองและผลการทดลอง

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

สำหรับซิลิคอนแล้ว โดยปกติจะเป็นวัสดุที่ให้ค่าสภาพความต้านทานที่ค่อนข้างต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่เป็นฉนวน ดังนั้นการที่จะทำให้ซิลิคอนมีสภาพความต้านทานสูงขึ้นได้นั้นจะต้องนำสารชนิดอื่นมาเจือปน สำหรับในปริญญานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาโดยเลือกใช้สารทองคำเป็นสารที่นำมาโดปให้กับสารซิลิคอน จากการศึกษาและสังเกตผลการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากสารทองคำที่โดปลงในซิลิคอน โดยผ่านกระบวนการต่างๆ ทางเซมิคอนดัคเตอร์ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 5 อีกทั้งวัสดุฐานรองกระจกที่นำมาใช้เป็นฐานรองชนิดใหม่ให้กับสายอากาศ ถึงแม้ว่าค่าสภาพยอม และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จะไม่เหมือนกับซิลิคอนโดปทองคำ แต่ได้มีการจำลองทางโปรแกรมเพื่อนำมาสร้างเป็นสายอากาศไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองกระจก ได้เหมือนกันซึ่งผลที่ได้จะแสดงให้ดูในเนื้อหาของบทนี้ ดังนั้นจะแบ่งการทดลองและผลการทดลองออกเป็น 2 แบบ ตามชนิดของวัสดุฐานรองดังนี้

6.1 การทดลองและผลการทดลอง ของสายอากาศไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ

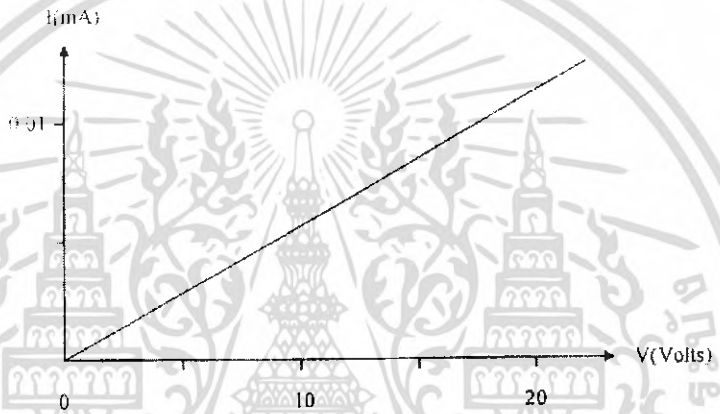
6.1.1 การทดลองวัดพารามิเตอร์ของชิ้นสาร

เพื่อเป็นการพิสูจน์ว่าแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นที่เติมอะตอมทองคำแล้วมีอะตอม ของทองคำเข้าไปอยู่ในเนื้อซิลิคอนจริง จึงทำการทดสอบค่าความต้านทานของเนื้อสารที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเติมอะตอมของทองคำเข้าไปแล้ว โดยทำการตัดชิ้นสารออกเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 2×5 mm. และจากการวัดค่าความหนาของชิ้นสาร ได้ค่าประมาณ 380 μm แล้วทำการทดสอบหาความต้านทานโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนำแผ่นซิลิคอนที่ถูกโดปด้วยทองคำ แล้วมาวัดด้วยอุปกรณ์โพร์พอยท์โพรบจะได้ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดัน ดังแสดงในรูปที่ 6.1 จากกราฟพบว่าค่าความต้านทานของชิ้นสารซิลิคอนเอ็นที่เติมอะตอมทองคำเข้าไปมีค่ามากกว่า $10^6[\Omega \cdot cm]$ โดยมีพารามิเตอร์ ดังนี้คือสภาพยอม $\varepsilon_r = 11.8$, ความหนา $h = 0.38$ mm., ความหนาของแผ่นตัวนำ $t = 0.2 \times 10^3$ mm. และค่าความนำของแผ่นตัวนำ $\sigma = 4.513 \times 10^7$ (S/m)

ดังนั้นซิลิคอนซึ่งถูกโดป ด้วยทองคำนี้จึงสามารถนำไปใช้งานเป็นวัสดุฐานรองของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นที่เติมอะตอมทองคำ (โดปทองคำ)

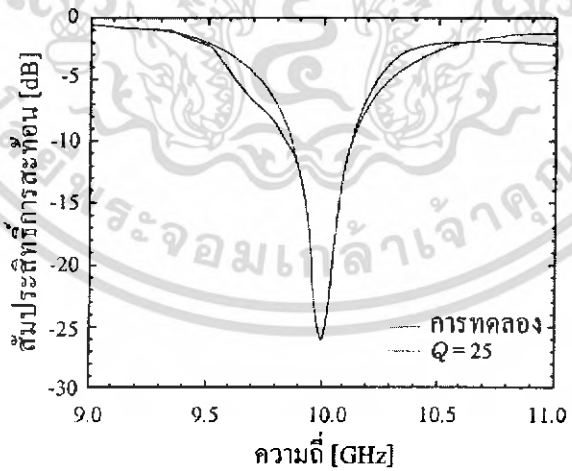
6.1.2 การทดสอบความถี่เรโซแนนท์ของสายอากาศ

เมื่อได้วัสดุฐานรองที่มีคุณสมบัติตรงตามความต้องการแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการสร้างสายอากาศแผ่นไมโครสตริปบนฐานรองดังกล่าว จากนั้นนำไปทำการทดสอบหาสัมประสิทธิ์ในการสะท้อนกลับของสายอากาศ ตลอดจนคุณสมบัติในการแผ่กระจายคลื่นสายอากาศแผ่นแบบโมโนลิตดริกบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำนั้น ได้ใช้ค่าที่ได้จากการออกแบบในบทที่ 4 โดยอาศัยขั้นตอนการสร้างดังอธิบายรายละเอียดในบทที่ 5 ซึ่งสายอากาศแผ่นแบบโมโนลิตริกบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำที่สร้างเสร็จสมบูรณ์แล้วนั้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 6.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.2 สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริกบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ

ก่อนการทดสอบหาคุณสมบัติการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ได้ทำการสร้างขึ้นมานั้น จำเป็นที่จะต้องทราบความถี่รีโซแนนท์ของสายอากาศเสียก่อน สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการระบุความถี่รีโซแนนท์ของสายอากาศ ถูกวัดโดยอาศัยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) รุ่น HP 8510C ผลการทดสอบวัดแสดงไว้ในรูปที่ 6.3



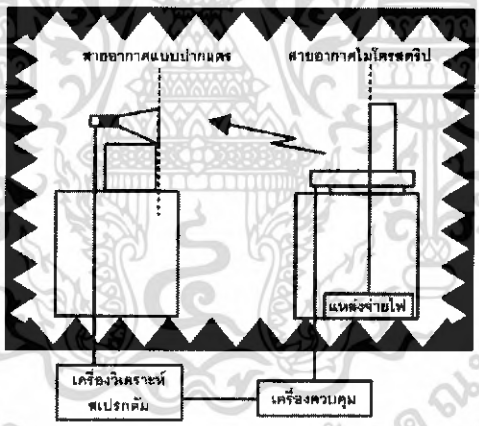
รูปที่ 6.3 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป
บนวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 6.3 สังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน ว่าสายอากาศที่ได้ทำการสร้างขึ้นนั้นมีความถี่รีโซแนนท์ใกล้เคียงกับทฤษฎี ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าค่าความถี่ได้ออกแบบไว้ สาเหตุของความผิดพลาดของความถี่เรโซแนนท์ นี้น่าจะเกิดจากการส่งผ่านกำลังงานจากสายโคแอ็กเชียลไปยังสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

6.1.3 การทดสอบแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น

ในการออกแบบ สายอากาศไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองสารกึ่งตัวนำที่โดปทองคำ เนื่องจาก สายอากาศไมโครสตริปเป็นสายอากาศที่มีอัตราการขยายต่ำ ดังนั้นการวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น (pattern) จึงทำการทดสอบโดยกำหนดให้สายอากาศไมโครสตริปที่สร้างบนวัสดุวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำเป็นสายอากาศทางด้านส่ง วางให้ห่างจากสายอากาศปากแตร ซึ่งเป็นสายอากาศทางด้านรับ โดยมีระยะห่างระหว่างสายอากาศตัวรับตัวส่ง 1.5 เมตร โดยมีอุปกรณ์ในการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 6.4

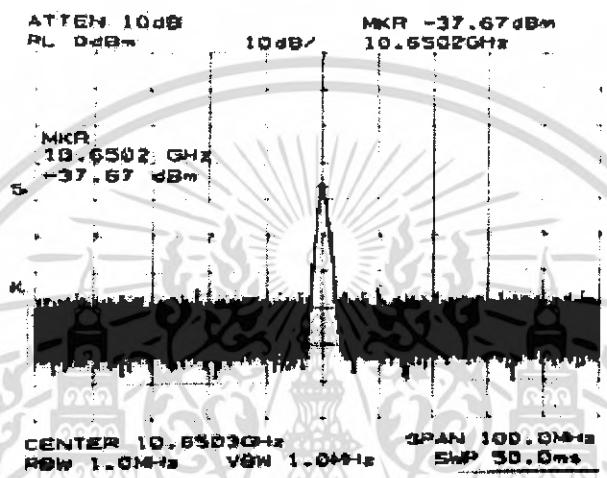


รูปที่ 6.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสายอากาศภาย

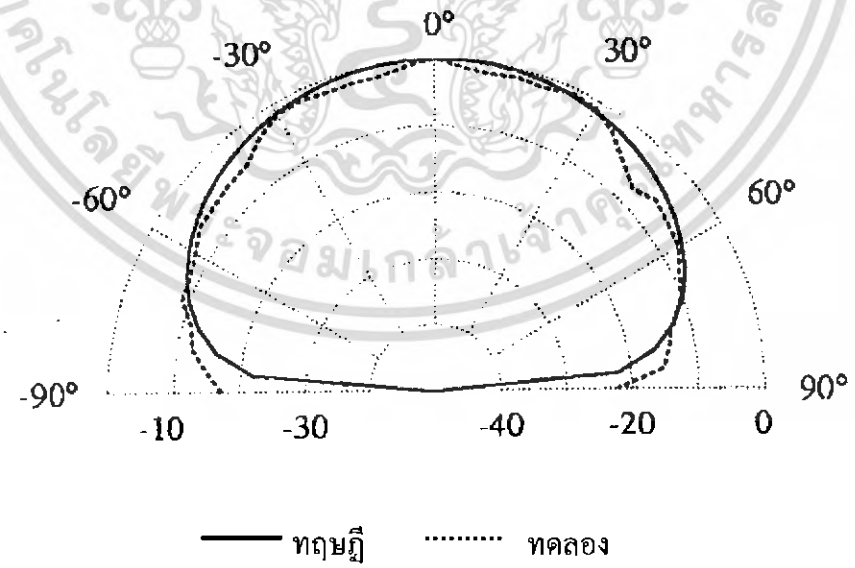
สายอากาศแผ่นบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำถูกใช้เป็นสายอากาศสำหรับแผ่กระจายคลื่น(โมดการส่ง) โดยมีสายอากาศปากแตร (Horn antenna) เป็นตัวรับ โดยมีระยะห่างระหว่างสายอากาศตัวรับและตัวส่ง 1.5 เมตร สัญญาณที่รับได้จากสายอากาศปากแตรจะถูกนำมาแสดงยังเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม รูปที่ 6.5 แสดงสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศปากแตรเมื่อสายอากาศตัวส่ง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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

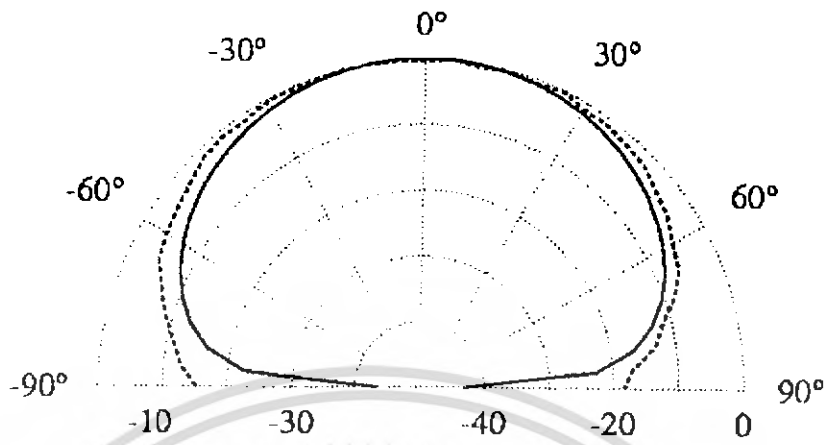


รูปที่ 6.5 สัญญาณที่รับได้จากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม



(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b)

รูปที่ 6.6 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำในระนาบ (a) สนามไฟฟ้า (b) สนามแม่เหล็ก

6.2 การทดลองและผลการทดลอง ของสายอากาศไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองกระจก

6.2.1 ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการปรับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) โดยใช้ตอนเน็คเตอร์ SMA

2. การวัดที่ความถี่ใช้งาน 10 GHz ต้องทำการปรับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย โดยในการทดลองมีการ ตั้งช่วงความถี่ระหว่าง 3 GHz – 12 GHz

3. ต่อสายอากาศเข้ากับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ที่พอร์ต S11 หรือ S22 ก็ได้ กรณีที่ใช้เพียงชุดเดียว

4. วัดค่า Log MAG

5. วัดค่า SWR

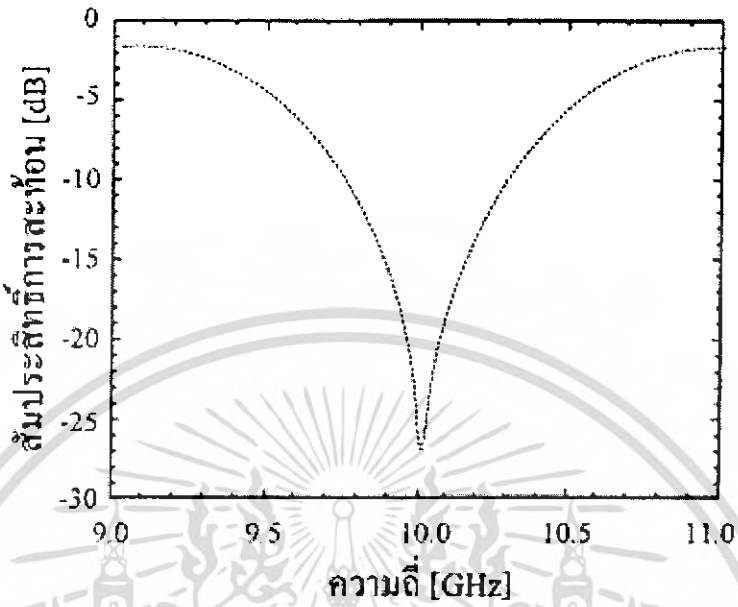
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.7 เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) ที่ใช้ในการทดลองรุ่น HP 8510C

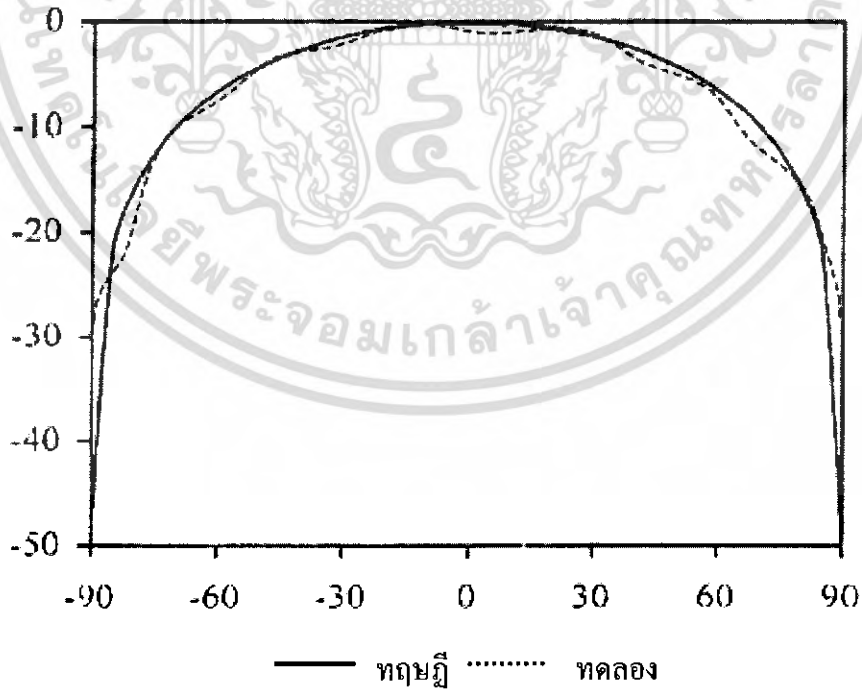
6.2.2 ผลการทดลอง

1. การวัด Log MAG เพื่อหาการสูญเสียจากการสะท้อนกลับ (S_{11}) ที่ต่ำสุด ความถี่ 10 GHz แสดงค่าการสูญเสียจากการย้อนกลับ -28.245 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

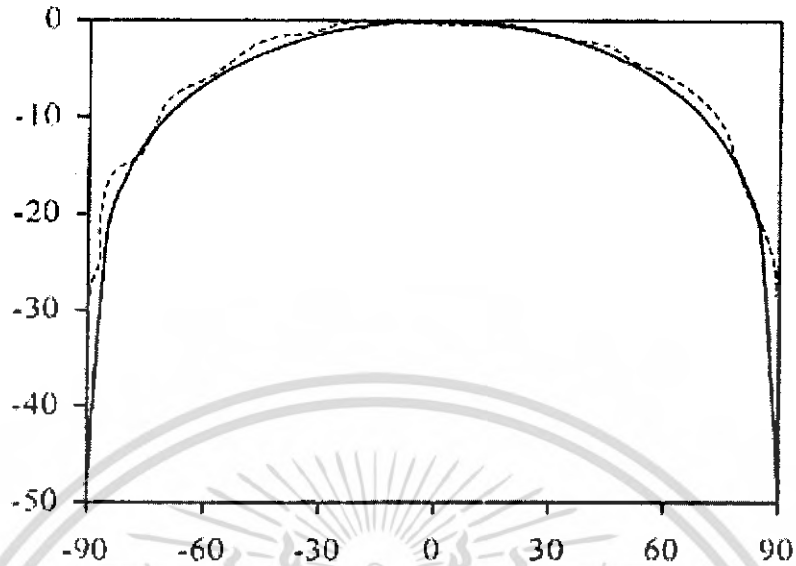


รูปที่ 6.8 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองกระจก



(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b)

รูปที่ 6.10 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองกระจกในระนาบ (a) สนามไฟฟ้า (b) สนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7
บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ปริญญานิพนธ์นี้ ได้นำเสนอสายอากาศแผ่นไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำและสายอากาศแผ่นไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองกระจก สำหรับสายอากาศรวมแบบแอกทีฟ กรณีสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ ที่มีวัสดุฐานรองซิลิคอนเป็นสารชนิดเอ็น สภาพความต้านทาน $10^2[\Omega \cdot cm]$ และมีสภาพยอมสัมพัทธ์ ε_r = 11.8 ได้ทำการระเหยในสุญญากาศด้วยทองคำบริสุทธิ์ที่ความร้อนสูง ด้วยกระบวนการสร้างในลักษณะเดียวกับกระบวนการทางเซมิคอนดัคเตอร์ จากการวัดและการทดสอบวัสดุฐานรองซิลิคอนที่เติมอะตอมทองคำ จะเห็นว่าสภาพความต้านทานเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ขณะที่ยังไม่ได้เติมอะตอมทองคำสภาพความต้านมีค่าเป็น $10^2[\Omega \cdot cm]$ และเมื่อเติมอะตอมทองคำในแผ่นผลึกซิลิคอนแล้วจะเห็นได้ว่า สภาพความต้านทานเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งมีค่ามากกว่า $10^6[\Omega \cdot cm]$ ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวจึงได้มีแนวคิดนำเอาวัสดุฐานรองซิลิคอนที่เติมด้วยอะตอมทองคำ มาใช้เป็นวัสดุฐานรองของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป ซึ่งเป็นวัสดุฐานรองใหม่สำหรับสายอากาศแบบระนาบ ด้วยคุณสมบัติของวัสดุฐานรองซิลิคอนที่เติมอะตอมทองคำนั้น นอกจากจะมีสภาพยอมสัมพัทธ์ (ε_r) ที่สูงแล้ว ยังสามารถใช้งานได้ที่ความถี่สูงอีกด้วย จึงเป็นเหตุผลหนึ่งที่สามารถทำให้ขนาดของสายอากาศลดลงได้ เพื่อแก้ปัญหาเรื่องขนาดของสายแบบแอกทีฟที่ถูกสร้างขึ้นมาในกรรมวิธีโมโนลิตริก (Monolithic) ซึ่งกำลังได้รับความนิยมกันอยู่ในเทคโนโลยี MMIC ดังนั้นคุณสมบัติของวัสดุฐานรองซิลิคอนที่เติมอะตอมทองคำนี้ จะเป็นวัสดุฐานรองของสายอากาศแบบระนาบที่ทำให้ขนาดของสายอากาศลดลงได้ เพื่อพัฒนาไปใช้งานด้านระบบแลนไร้สาย (Wireless LAN)

กรณีสายอากาศแผ่นไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองกระจก จะเป็นการทดลองโดยนำกระจกมาใช้เป็นวัสดุฐานรองแทนซิลิคอนโดปทองคำ ซึ่งมีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ ε_r = 7.5 เมื่อทำการออกแบบและสร้างสายอากาศที่ความถี่ 10 GHz เหมือนกันกับสายอากาศแผ่นไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองซิลิคอนโดปทองคำ ผลที่ได้คือสายอากาศจะมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่นั้นก็ไม่ใช่ปัญหาที่สำคัญ เพราะเมื่อเราดูค่าการสูญเสียจากการสะท้อนกลับ (S_{11}) และค่า SWR ที่ทำการออกแบบที่ความถี่ใช้งาน 10 GHz จะเห็นว่าสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองกระจก นั้นสามารถแพร่กระจายคลื่นออกไปได้และอยู่ในเกณฑ์ที่ดี ซึ่งสามารถที่จะนำไปพัฒนาด้วยเทคโนโลยีที่ทันสมัยเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นระบบเรดาห์ขนาดเล็ก สำหรับยานพาหนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.1 การศึกษาและวิเคราะห์

นอกจากผลที่ได้จากการทดลองแล้ว ยังได้ทำการพิสูจน์ผลเหล่านี้ด้วยการวิเคราะห์ในทางทฤษฎี Electromagnetics เช่น ค่าสภาพความต้านทาน ได้พิจารณาค่า Q ที่ได้รับผลกระทบจากค่าสภาพความต้านทานค่าต่างๆ กัน และพิจารณาคุณสมบัติการแผ่กระจายคลื่น ที่มีสภาพความต้านทานค่าต่างๆกัน และพิจารณาคุณสมบัติการแผ่กระจายคลื่น Q ที่มีสภาพความต้านทานค่าต่างๆ กันด้วย โดยอาศัยทฤษฎีการวิเคราะห์ด้วยวิธีแบบจำลองคาวิตี้ในกรณีค่าและในส่วนคุณสมบัติการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศนั้นได้วิเคราะห์ด้วยวิธีโมเมนต์ จึงยืนยันคุณสมบัติของวัสดุฐานรองได้ว่า สารกึ่งตัวนำแผ่นผลึกซิลิคอนที่ถูกเติมด้วยอะตอมทองคำนั้น จะทำให้มีสภาพความต้านทานสูงขึ้นจากเดิม ที่มีสภาพความต้านทานสูงขึ้นจากเดิมที่มีสภาพความต้านทาน $10^2[\Omega \cdot cm]$ ดังนั้นจึงเป็นวัสดุฐานรองที่มีคุณสมบัติดีสำหรับสายอากาศ ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 4.9 - 4.12 และผลการทดลองในรูปที่ 6.1,6.5 และ 6.6 ตามลำดับ

7.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

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

1. พัฒนาสร้างเป็นสายอากาศแผ่นแบบแถวลำดับ (Array) บนฐานรองซิลิคอน เพื่อทำให้บีมแคบลงและมีแบนด์วิดท์กว้างขึ้น คุณสมบัติการแผ่กระจายคลื่นและประสิทธิภาพทางด้านความถี่จึงจะมีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้นโดยต้องทำการวิเคราะห์และออกแบบอย่างถูกต้อง กระบวนการสร้างทุกขั้นตอนให้ความระมัดระวังเป็นอย่างมาก ซึ่งนอกจากมีราคาแพงแล้ว อาจเกิดอันตรายได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

3. ควรศึกษาวิจัยพัฒนาต่อ โดยทำการออกแบบที่ความถี่สูงขึ้น ซึ่งนะเป็นผลทำให้สายอากาศแผ่นแบบโมโนลิตริกบนฐานรองซิลิคอนนี้มีขนาดเล็กลงได้มาก แต่อาจจะสร้างยากขึ้นตามไปด้วยในการเริ่มต้น แต่อย่างไรก็ตามเป็นงานวิจัยที่น่าสนใจเพราะเป็นวัสดุฐานรองใหม่สำหรับสายอากาศไมโครสตริป ผู้เขียนคิดว่ายังมีสิ่งที่น่าสนใจมากบนวัสดุฐานรองซิลิคอนที่เติมอะตอมทองคำ

4. ในส่วนของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ได้พัฒนาสร้างเป็นไอซีได้แล้ว แต่ว่าไอซีสำหรับสายอากาศยังไม่มีใครสร้าง ซึ่งที่ผ่านมาจะเห็นว่าสายอากาศแผ่นไมโครสตริปจะถูกสร้างบนวัสดุฐานรองได้อิเล็กตริกจึงเป็นการยากที่จะทำเป็นไอซีได้ จึงต้องศึกษาวิจัยมาสร้างสายอากาศแผ่นไมโครสตริปแบบโมโนลิตริกบนวัสดุฐานรองซิลิคอนที่เติมอะตอมทองคำ จึงมีความเป็นไปได้ที่จะสร้างสายอากาศรวมกับวงจรรวมแอกทีฟบนระนาบเดียวกันแบบโมโนลิตริก ซึ่งจะเป็นการพัฒนาเทคโนโลยี MMIC ไปอีกระดับหนึ่ง

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนหวังว่าสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองซิลิคอนและสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปวัสดุฐานรองกระจก ซึ่งได้ทำเป็นต้นแบบนี้ คงจะเป็นประโยชน์ขั้นพื้นฐานแก่ผู้ที่ศึกษาค้นคว้าและนำไปใช้งานตามวัตถุประสงค์ที่ได้มุ่งหวังไว้ และถ้าหากมีผู้สนใจที่จะศึกษาวิจัยต่อไปจริง ก็คงจะได้แนวความคิดและความรู้ทางเทคนิคต่างๆ จากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งผู้เขียนมีความยินดีอย่างยิ่ง ในการเผยแพร่เอกสารฉบับนี้ เพื่อความเจริญก้าวหน้าของระบบเทคโนโลยีการสื่อสารในภายภาคหน้าต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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, "High Efficient Spatial Power Combining Utilizing Active Integrated Antenna Technique, "IEICE Trans. Electron., vol.e80-C, no. 6,pp. 800-805, June 1997.

[3] C.A. Balanis, *Antenna Theory:Analysis and Design*, 2nd Ed., John Wiley & Sons Inc., 1997.

[4] 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.

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

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

[7] โมไนย ไกรฤกษ์ , ทฤษฎีสายอากาศ, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2538.

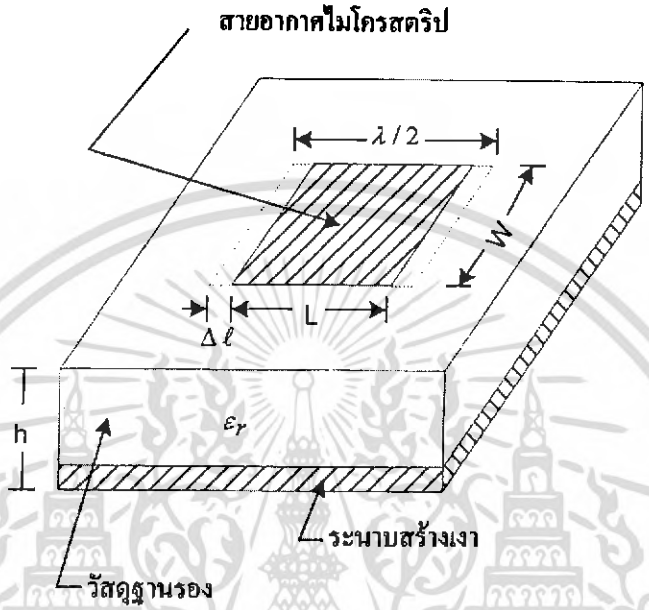
[8] http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida//multimedia_en/chapter-4/4_5A.html

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.
การคำนวณขนาดของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า



รูปที่ ก1 สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ความกว้าง (W) และความยาว (L) ของ MPA สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

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

$$L = \frac{c}{2fr\sqrt{\varepsilon_{re}}} - 2\Delta l \qquad \text{(ก.2)}$$

อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายอากาศ (Z_c) หาได้จาก

$$Z = \frac{\eta_o}{\sqrt{\varepsilon_{re}}}\frac{\mathrm{h}}{\mathrm{w_e}} \qquad \text{(ก.3)}$$

แอดมิตแตนซ์ของสายอากาศ (Y_s) สามารถคำนวณได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Y_s = G_s + jB_s$$

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
กระบวนการสร้างสายอากาศแผ่นไมโครสตริปแบบโมโนลิตริก บนวัสดุฐานรองซิลิคอน

1. กระบวนการเตรียมแผ่นและการทำความสะอาด

1.1 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นซิลิคอนและการตรวจสอบคุณสมบัติ

- แผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น ระนาบ (111)
- พิกัดความต้านทาน 100 $[\Omega \cdot cm]$
- ความหนา 380 μm

1.2 ทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิคอนครั้งแรก

- ทำความสะอาดผิวในน้ำบริสุทธิ์ด้วยเครื่องสั่นความถี่สูง 2 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในกรดไนตริก HNO_3 เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดเศษ โลหะที่ผิว
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 5 นาที
- จุ่มในในน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน(N_2)

1.3 การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นแบบมาตรฐาน

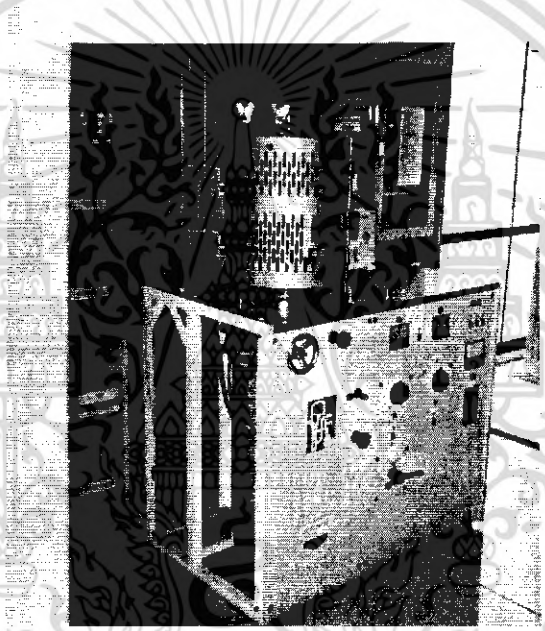
- ต้มในโตรโคลโลเอททีลีน (Tricholocthylenene) เป็นเวลา 5 นาทีเพื่อกำจัดไขมัน
- ทำความสะอาดในอะซิโตน (Acetone) ด้วยเครื่องสั่นความถี่สูง 3 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

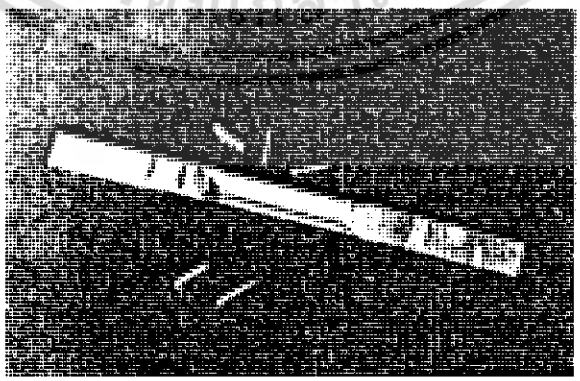
1.4 การ Slice Etching

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

2. กระบวนการระเหยสารทองคำในสุญญากาศ



รูปที่ ข1 อุปกรณ์เคลือบในสุญญากาศ



รูปที่ ข2 ฐานแบบโบ๊ดและชิ้นทองคำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทำความสะอาดและเตรียมผิวแผ่นผลึกให้แห้ง
- วางแผ่นผลึกลงใน chamber ที่ตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อให้ชั้นสารที่เคลือบมีความหนาสม่ำเสมอ
- ปิดวาล์วของ chamber ทำการดูดอากาศออกให้ความดันภายในต่ำลงมาเหลือประมาณ 10^3 Torr โดยใช้ Rotary pump
- เริ่มทำสารทองคำที่เคลือบให้เป็นไอ โดยมีกำบังเพื่อมิให้สารที่เจือปนอยู่ไปเคลือบแผ่นผลึกซิลิคอน
- ทำการเคลือบสารเจือสารทองคำบนแผ่นผลึกให้หนาตามต้องการ ขณะทำการเคลือบสารทองคำบนแผ่นผลึกซิลิคอน บางครั้งควรให้ความร้อนบนแผ่นผลึกที่เหมาะสมเพื่อให้ชั้นสารทองคำที่เคลือบติดแน่นกับแผ่นผลึกซิลิคอน
- หยุดทำการเคลือบสาร ปล่อยให้ทุกอย่างใน chamber เย็นตัวลง 30 นาที
- ปล่อยอากาศเข้าไปใน chamber อย่างช้าๆจนความดันเป็นปกติ แล้วยก chamber ขึ้น

3. กระบวนการแพระสารทองคำ (Au Diffusion)

รูปที่ ข3 เตาแพร่อะตอมทองคำในแผ่นผลึกซิลิคอน

- เตรียมแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการเคลือบสารด้วยทองคำวางบนโบ๊ตแก้ว
- ทำการเปลี่ยนท่อหลอดแก้วที่ใช้สำหรับการแพร่อะตอมทองคำ
- หาระยะที่อุณหภูมิ 1025° ก่อนที่จะนำเอาแผ่นซิลิคอนที่แพร่ด้วยสารทองคำเข้าเตา
- เมื่อตรวจสอบระยะอุณหภูมิเสร็จแล้วนำแผ่นซิลิคอนที่แพร่ด้วยสารทองคำแล้วเข้าตาต้องดันเข้าเตาอย่างช้ามากๆจนถึงจุดที่ตรวจสอบอุณหภูมิ ใช้เวลาอย่างน้อย 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ใช้เวลาในการแพร่อะตอมทองคำลงในแผ่นผลึกซิลิคอน 6 ชั่วโมง
- เมื่อครบ 6 ชั่วโมงตอนเอาแผ่นซิลิคอน ที่เติมอะตอมทองคำลงไปออกจากท่อหลอดแก้วย่างรวดเร็ว แล้วจุ่มในลงในลิควิดไนโตรเจน (Liquid Nitrogen) เพื่อหยุดปฏิกิริยาของทองคำ
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน N_2

4. กระบวนการขัดผิวหน้าแผ่นซิลิคอนโดปทอง (Au Lapping)

รูปที่ ข4 การขัดผิงหน้าแผ่นซิลิคอนโดปทอง

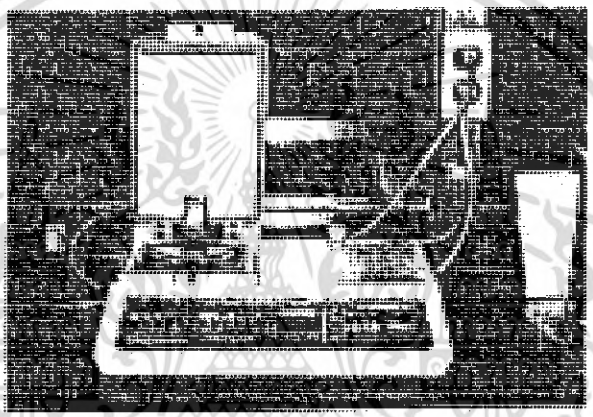
- นำแผ่นซิลิคอนโดปทองคำเคลือบด้วยอิเล็กทรอนิกส์แวก (electronic vax) ด้านที่ไม่ต้องการขัดผิว แล้วทำการขัดผิวหน้าที่ Evaporated ทอง ให้เรียบ
- ทำการแล็ปปิ้งด้วยผงขัดซิลิคาไบร์ # 1000
- ทำความสะอาด จุ่มในน้ำ
- ทำการแล็ปปิ้งด้วยผงขัดซิลิคาไบร์ #2000
- ทำความสะอาด จุ่มในน้ำ
- ทำการแล็ปปิ้งด้วยผงขัดซิลิคาไบร์ #4000
- ทำความสะอาด จุ่มในน้ำ
- ละลายแวกออกจากแผ่นซิลิคอน
- ทำความสะอาดผิวหน้า
    - ต้มใน Tricholocthylenene เป็นเวลา 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Ultrasonic ใน Acetone 3 นาที
- จุ่มในในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน N_2

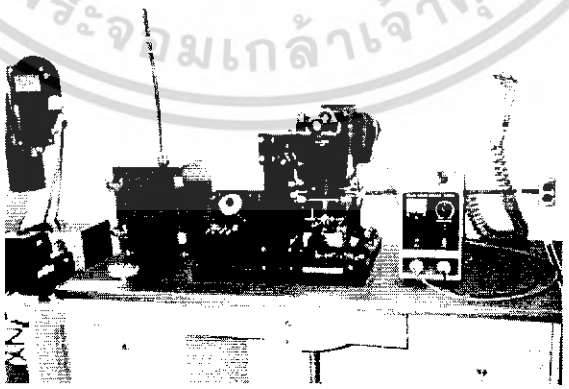
5. กระบวนการโฟโต้อิโทรกราฟฟี่

- เคลือบสารไวแสงชนิดบวก (AZ4620A) spin 3000 rpm.



รูปที่ ข5 เครื่องสปรินเนอร์

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



รูปที่ ข6 เครื่อง Alignment Expose

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Develop ฟิล์มโดย
    - AZ Developer แก้วที่หนึ่ง 30 วินาที
    - AZ Developer แก้วที่สอง 30 วินาที
    - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
    - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
    - เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
    - อบฟิล์มครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ $90^{\circ}C$ 10 นาที (postbake)

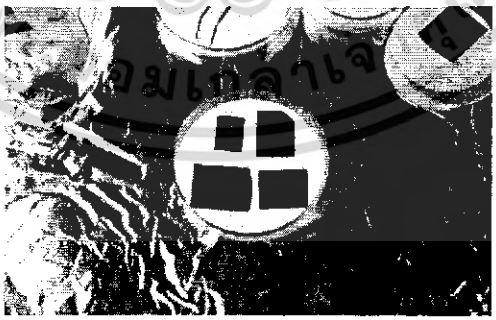
6. กระบวนการระเหยทองคำในสุญญากาศ (Au Evaporated) ครั้งที่ 2

- กระบวนการนี้เหมือนกับกระบวนการ Au Evaporated ในกระบวนการที่ 2 ทุกประการ

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

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

8. กระบวนการซินเตอริง



รูปที่ ข7 หลังจากที่ทำการซินเตอริง

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. กระบวนการเชื่อมต่อ

(a) (b)

รูปที่ ข8 การเชื่อมต่อสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป บนวัสดุฐานรองซิลิคอนโดป ทองคำ (a) และอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป บนวัสดุฐานรองกระจก (b)

- ใช้เงิน (Ag) อย่างเหมาะสมในการเชื่อมต่อกับคอนเนคเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค
การวัดหาค่าพิกัดความต้านทาน

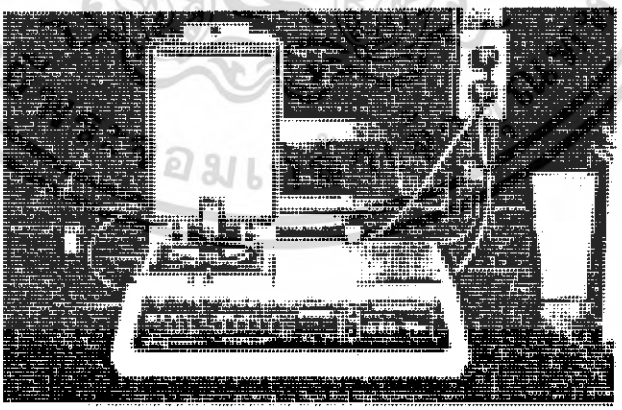
ในสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิคอน นิยมวัดหาค่าแผ่นความต้านทานด้วยวิธีโฟร์พอยท์โพรบ ดังแสดงในรูปที่ ค1

ในการวัดเข็มโลหะที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าทั้งสี่ จะถูกกดลงบนผิวของแผ่นซิลิคอน 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้