

เครื่องกำเนิดความถี่ย่าน 1 – 3GHz แบบปรับแรงดันและประยุกต์ใช้งาน

1-3 GHz Voltage Control Oscillator and Application



โดย

นาย นิติกรณ์ ศิลป์ศิริวานิชย์ รหัสประจำตัว 41013452

นาย ขจิตร จิตรสุภา รหัสประจำตัว 41013461

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 42256
วัน, เดือน, ปี 1.6 พ.ค. 2545

b.....
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาเทคนิคอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2543

หัวข้อปริญญานิพนธ์ เครื่องกำเนิดความถี่ย่าน 1 – 3 GHz แบบปรับแรงดันและประจุที่ใช้งาน

1-3 GHz Voltage Control Oscillator and Application

นักศึกษา

นายนิติกรณ์ ศิลป์ศิริวานิชย์

รหัสประจำตัว 41013452

นาย ขจิตร จิตรสุภา

รหัสประจำตัว 41013461

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อภัย ศรีธีระวีโรจน์

ภาควิชา

เทคนิคอุตสาหกรรม

ปีการศึกษา

2543

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติ ให้นำปริญญาบัตร
ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์

_____ (ประธานกรรมการ)
(_____)

_____ (กรรมการ)
(_____)

----- (กรรมการ)
(-----)

_____ (กรรมการ)
(_____)

_____ (กรรมการ)
(_____)

ลิขสิทธิ์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อปริญญานิพนธ์ เครื่องกำเนิดความถี่ย่าน 1 – 3 GHz แบบปรับแรงดันและประยุกต์ใช้งาน

1-3 GHz Voltage Control Oscillator and Application

นักศึกษา นายนิติกรณ์ ศิลป์ศิริวานิชย์ รหัสประจำตัว 41013452

นาย ขจิตร์ จิตรสุภา รหัสประจำตัว 41013461

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อุทัย ศรีธีระวิโรจน์

ปีการศึกษา 2543

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอเครื่องกำเนิดความถี่ Oscillator ย่าน 1 – 3GHz แบบปรับแรงดัน และประยุกต์การใช้งานด้วย Sweep Generator โดยทำการปรับ แรงดันเพื่อเปลี่ยนความถี่ เพื่อนำสัญญาณความถี่คลื่นพาห์ ในย่านที่ต้องการไปใช้งานในรูปแบบต่างๆตามความเหมาะสม โดยอาศัยหลักการออกแบบวงจรออสซิลเลเตอร์ ใช้ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับ พารามิเตอร์ 2 พอร์ต และแมตซ์ซิ่งอิมพีแดนซ์ และสายส่งสัญญาณแบบ ไมโครสตริป ซึ่งได้มีการอธิบายทฤษฎีและหลักการทำงานพร้อมสูตรต่างๆที่ใช้ ในการออกแบบวงจร ทั้งหมดไว้ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้แล้ว

จากการทดลองเมื่อใช้งานร่วมกับ Sweep Generator จะสามารถแสดงสัญญาณได้ตั้งแต่ 1-3 GHz ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่กำหนด

1-3 GHz VOLTAGE CONTROL OSCILLATOR AND APPLICATION

STUDENT	Mr. Nitikorn	Silsirivanich
	Mr. Kajit	Jitsupa
ADVISOR	Assist. Prof. Uthai	Sritheeravirojana

Academic year 2000

Abstract

This thesis Presents the design of 1-3 GHz Voltage control Oscillator with the application by combining it with the Sweep Generator. The frequency will be then adjusted by changing the input voltage of the Sweep Generator. The main purpose is to bring the carrier signal frequency to the designated frequency band which is appropriate for different applications.

The technique is based on the design of the Oscillator circuit, the basic of 2 port parameter, matching impedance together with microstrip transmission line. The theory and the concept of operation as well as the formula used to design all circuits are thoroughly described in the thesis.

From the experiment, The combining with Sweep Generator can Provide the signal form 1-3 GHz which satisfies required objective.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์เป็นรูปเล่มขึ้นมาได้ก็เพราะอาศัยความรู้จากบูรพาจารย์ทั้งหลาย ผู้เขียนเอกสารอ้างอิงต่างๆ ทุกท่าน คุณความดีของปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้จัดทำขอมอบเป็นเครื่องสักการะต่อท่านเหล่านั้น

อนึ่งแม้ว่าผู้จัดทำได้พยายามที่จะจัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างดี แต่ก็ยังมีสิ่งจำเป็นที่จะต้องแก้ไขอยู่เพื่อให้เกิดความความสมบูรณ์ของเนื้อหาต่างๆ ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ จะไม่เกิดความสมบูรณ์ได้ หากขาดความรู้จากอาจารย์หลายๆท่านที่ช่วยเหลือให้ความรู้ต่างๆ ในการจัดทำซึ่งผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณไว้ ณ.ที่นี้ อย่างจริงใจ คือท่านอาจารย์ที่ปรึกษา และอาจารย์ภาควิชาเทคนิคอุตสาหกรรม ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำ ด้านวิชาการ รวมทั้งสนับสนุนวัสดุอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ประกอบการทดลอง ถ้าขาดสิ่งเหล่านี้แล้วการทดลองจะไม่ประสบผลสำเร็จไปได้

ท้ายนี้ผู้จัดทำใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา - มารดา ซึ่งให้การสนับสนุนด้านต่างๆรวมทั้งคอยให้กำลังใจ และทุนทรัพย์แก่ผู้จัดทำด้วยใจจริงเสมอมา

นาย นิติกรณ์ ศิลป์ศิริวานิชย์

นาย ขจิตร จิตรสุภา

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญ (ต่อ)	V
สารบัญรูปภาพ	VI
สารบัญรูปภาพ(ต่อ)	VII
 บทที่ 1 บทนำ	 I
1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 วิธีดำเนินการ	2
1.4 ขอบเขตของโครงการ	2
1.5 ประโยชน์ของโครงการ	3
 บทที่ 2 การวิเคราะห์วงจรออสซิลเลเตอร์	 4
2.1 การวิเคราะห์วงจรออสซิลเลเตอร์	4
2.2 การวิเคราะห์วงจรออสซิลเลเตอร์แบบหนึ่งพอร์ท	4
2.2 การวิเคราะห์วงจรออสซิลเลเตอร์แบบสองพอร์ท	7
 บทที่ 3 ทฤษฎีและหลักการทำงานของวาเรกเตอร์ไดโอด	 13
3.1 ค่าความจุบริเวณอับพาหะนำประจุและหลักการทำงาน	13
3.2 โครงสร้างของวาเรกเตอร์ไดโอด	24
3.3 วงจรสมมูลย์ของวาเรกเตอร์ไดโอด	26
3.4 ค่าความจุบริเวณรอยต่อของวาเรกเตอร์ไดโอด	28
3.5 อัตราส่วนของการปรับจูน	30

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
3.6 ค่าตัวประกอบคุณภาพของวาเรกเตอร์ไดโอด	32
บทที่ 4 ไมโครสตริปและวงจรไมโครสตริป	36
4.1 โครงสร้างและคุณสมบัติของไมโครสตริป	36
4.2 โครงสร้างของไมโครสตริป	36
4.3 การส่งผ่านคลื่นในไมโครสตริป	38
บทที่ 5 ทฤษฎีและหลักการการทำงานของวงจรกำเนิดสัญญาณลาดเอียง	40
5.1 วงจรกำเนิดสัญญาณกวาดแบบบูสแตป	40
5.2 วงจรกำเนิดรูปคลื่นด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่	43
บทที่ 6 ผลการทดลอง	45
6.1 วงจรการทดลอง	45
6.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการต่อวงจรจริง	45
6.3 วงจร Osillator, วงจร Sweep Generator	46
6.4 การทดลองและผลการทดลอง	47
6.5 กราฟแสดงการทำงานของ Sweep Genertaor กับ Oscillator	51
บทสรุป	53
บรรณานุกรม	54
ภาคผนวก	55

สารบัญรูปภาพ

เรื่อง	หน้า
ภาพที่ 1.1 Block diagram ของวงจร Oscillator ชนิดควบคุมความถี่ด้วยแรงดัน	2
ภาพที่ 2-1 one- port negative-resistance oscillators.	5
ภาพที่ 2-2 Two – port oscillator model	7
ภาพที่ 2-3 Oscillation in port 1	8
ภาพที่ 3-1 โครงสร้างของรอยต่อพี – เอ็น และบริเวณประจุค้าง	14
ภาพที่ 3-2 แสดงการจัดไบแอสให้กับรอยต่อ พี – เอ็น	15
ภาพที่ 3-3 รอยต่อ พี – เอ็น	16
ภาพที่ 3-4 Doping profiles	20
ภาพที่ 3-5 คุณสมบัติของวาเรกเตอร์ไดโอด	23
ภาพที่ 3-6 โครงสร้างของวาเรกเตอร์ชนิด mesa	24
ภาพที่ 3-7 Doping profile ของรอยต่อ abrupt junction	25
ภาพที่ 3-8 Doping profile ของรอยต่อ hyperabrupt junction	25
ภาพที่ 3-9 วงจรสมมูลย์ของวาเรกเตอร์ไดโอดแบบชิพ	27
ภาพที่ 3-10 วงจรสมมูลย์ของวาเรกเตอร์ไดโอดแบบแพ็คเกจ	28
ภาพที่ 3-11 ผลของการจัดไบแอสกลับด้วยแรงดันไฟฟ้าจากภายนอกให้กับ รอยต่อพีเอ็น ของวาเรกเตอร์ไดโอด	29
ภาพที่ 3-12 Diode doping profiles	30
ภาพที่ 3-13 วงจรสมมูลย์ของวาเรกเตอร์ไดโอด	33
ภาพที่ 3-14 วงจรสมมูลย์อย่างง่ายของวาเรกเตอร์ไดโอด	33

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
ภาพที่ 3-15 กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบคุณภาพ ของวาเรกเตอร์ไดโอดกับความถี่	34
ภาพที่ 3-16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบคุณภาพของวาเรกเตอร์ไดโอด กับขนาดของแรงดันไบแอสกลับที่อุณหภูมิต่างกัน	35
ภาพที่ 4-1 โครงสร้างของไมโครสตริป	37
ภาพที่ 4-2 การหาค่า $\tan \delta$	38
ภาพที่ 4-3 เส้นแรงไฟฟ้าในระนาบตามขวางของไมโครสตริป	39
ภาพที่ 5-1 วงจรกำเนิดสัญญาณลาดแบบ Bootstrap sweep generator	40
ภาพที่ 5-2 single – sweep waveform	41
ภาพที่ 5-3 วงจรกำเนิดสัญญาณลาดเอียงซึ่งทำงานในโหมดอะสเตบิล	42
ภาพที่ 5-4 แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุเป็นเชิงเส้นเมื่อทำการอัดประจุด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับค่าประจุและค่าความจุ	43
ภาพที่ 5-5 หลักการพื้นฐานของวงจรกำเนิดรูปคลื่นอย่างง่าย	43
ภาพที่ 5-6 วงจรกำเนิดรูปคลื่นสัญญาณลาดเอียง	44
ภาพที่ 6-1 วงจรออสซิลเลตในการใช้งานจริง	45
ภาพที่ 6-2 วงจร Oscillator แบบปรับความถี่ด้วยแรงดัน ย่าน 1-3 GHz	46
ภาพที่ 6-3 รูปวงจร Sweep Generator	46
ภาพที่ 6-4 การต่อ แรงดัน 41 Vdc ให้แก่ Sweep Generation	47
ภาพที่ 6-5 วัดสัญญาณที่ได้ ด้วย Oscilloscope	48
ภาพที่ 6-6 ต่อแหล่งจ่าย และสัญญาณ Tuner จาก Sweep Generator แก่ Oscillator	48
ภาพที่ 6-7 การจับสัญญาณ Oscillator ด้วย Spectrum Analyzer	49
ภาพที่ 6-8 การจับสัญญาณ Oscillator ด้วย Spectrum Analyzer ในย่านความถี่ 2 GHz	49
ภาพที่ 6-9 การจับสัญญาณ Oscillator ด้วย Spectrum Analyzer ในย่านความถี่ 3 GHz	50
ภาพที่ 6-10 กราฟแสดงค่าความถี่ของ Sweep Generator	51
ภาพที่ 6-11 กราฟแสดงค่าความถี่ Oscillator เมื่อใช้งานร่วมกับ Sweep Generator	52
ภาพที่ 6-12 กราฟแสดงขนาดแรงดัน dBm จาก Oscillator เมื่อใช้งานร่วมกับ Sweep Generator	52

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันการติดต่อสื่อสาร มีคลื่นพาห่นำสัญญาณข่าวสารจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับ หรือผู้ส่งไปยังผู้รับ ดันทางไปยังปลายทาง โดยการนำพาสัญญาณจะต้องเกิดการมอดูเลทและการสังเคราะห์ความถี่โดยจะใช้วงจร Oscillator เป็นตัวกำหนดสัญญาณความถี่ให้

ในโครงงานนี้ เป็นการออกแบบ Oscillator ที่ปรับเปลี่ยนความถี่ได้ซึ่งจะมีประโยชน์ในการนำไปใช้ในการสื่อสารต่างๆอีกมากมาย

1.1 ความสำคัญของปัญหา

การออกแบบสร้างวงจร Oscillator ชนิดควบคุมความถี่ ด้วยแรงดันย่านในการปรับความถี่จะขึ้นอยู่กับ วาเรกเตอร์ไดโอด [Cmax/Cmin] ซึ่งเป็นอัตราส่วนในการปรับจูนจะถูกจำกัดซึ่งทำให้ย่านการปรับจูนแคบ

ขีดจำกัดของตัว Amplifier ที่จะสามารถสังเคราะห์ความถี่ด้านทานเชิงลบ

ระดับของสัญญาณเชิง Phase จะกำหนดโดยค่าตัวประกอบคุณภาพ Q ของวงจร Resonant จะถูก

กำหนดด้วยชนิดและคุณสมบัติของตัววาเรกเตอร์ไดโอด

การกัดแผ่นปริ้นให้ได้ตามที่คำนวณขนาดสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการทำงาน Oscillator ชนิดควบคุมความถี่ด้วยแรงดัน ในย่านความถี่ 1-3 GHz

ศึกษาตัววาเรกเตอร์ไดโอดและการนำไปประยุกต์การใช้งานกับวงจร Sweep Generator

วิเคราะห์และออกแบบสร้างวงจร Oscillator ในรูปของ s-parameter และสัมประสิทธิ์การสะท้อน

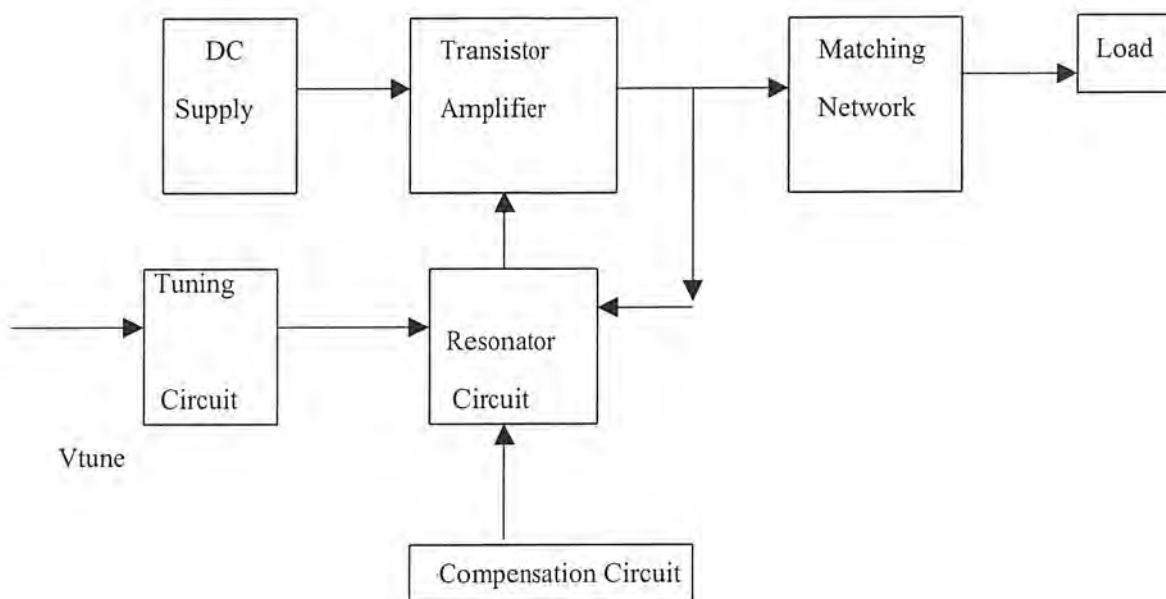
คลื่นที่เกิดขึ้นกับโครงข่ายวงจร Oscillator

การนำวงจร Oscillator ไปใช้งาน เช่น เครื่องกวาดความถี่ , การมอดูเลชันเชิงความถี่ทางตรง

1.3 วิธีดำเนินการ

การออกแบบวงจร Oscillator จาก block diagram ดังรูปวงจร Oscillator เป็นการกำเนิดสัญญาณที่มีการขยายและทำการป้อนกลับแบบบวกทางผ่านในการป้อนกลับคือ สายนำสัญญาณ หรือ มองได้จากรูป ของ Resonant circuit (เป็นได้ทั้งขานานและอนุกรม) แต่ที่นิยมเป็นอนุกรม โดยจะจำกัด noise

โดย Compensation circuit เป็นส่วนหนึ่งของวงจร Oscillator เพื่อช่วยควบคุมความถี่ด้วยแรงประมาณ 1-3 GHz



ภาพที่ 1.1 Block diagram ของวงจร Oscillator ชนิดควบคุมความถี่ด้วยแรงดัน

1.4 ขอบเขตของโครงการ

Phase noise ≤ 130 dBc/Hz

พลังงานทางด้าน Out put จะมีค่าประมาณ 8-10 mW หรือน้อยกว่านี้ก็ได้

วงจร Oscillator นี้จะออกแบบให้ใช้แรงดันควบคุมความถี่ให้อยู่ในช่วง 1-3 GHz

1.5 ประโยชน์ของโครงการ

ใช้ในการออกแบบสร้าง Oscillator ที่มีการปรับจูนความถี่ได้
นำเครื่องกำเนิดความถี่ไปใช้ในการ สักเคราะห์ความถี่ที่ต้องการ
ใช้ในการทดสอบสายอากาศแบบไมโครสตริปได้
สามารถประยุกต์ใช้งานกับ Sweep Generator ได้

บทที่ 2

การวิเคราะห์วงจรออสซิลเลเตอร์

2.1 การวิเคราะห์วงจรออสซิลเลเตอร์

ออสซิลเลเตอร์ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ หรือย่านความถี่ไมโครเวฟนั้น ประกอบด้วย วงจรขยายกำลัง วงจรเรโซเนเตอร์ซึ่งรวมกับวงจรป้อนกลับวงจรขยายกำลังนั้นอาจใช้ ตัวอุปกรณ์แอคทีฟ หลอดสุญญากาศ ทรานซิสเตอร์ ทำหน้าที่ซัดเซพลังงานที่สูญเสียให้กับวงจรเรโซเนเตอร์ ในส่วนของวงจรเรโซเนเตอร์นั้น ประกอบด้วยตัวอุปกรณ์เช่น ตัวเก็บประจุ ขดลวด อุปกรณ์ที่แปรค่ารีแอคแตนซ์ได้ เช่น ตัววาร์เรกเตอร์ไดโอด ทำหน้าที่ในการกำหนดความถี่เรโซแนนซ์ของวงจร

ในการวิเคราะห์และออกแบบวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ความถี่สูงนั้น มีทั้งการวิเคราะห์ภายใต้คุณสมบัติที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นของตัวอุปกรณ์ ซึ่งมีข้อจำกัดที่ต่างกัน เช่น การวิเคราะห์ที่เป็นเชิงเส้น โดยใช้เอสพารามิเตอร์ หรือวายพารามิเตอร์มีความซับซ้อนน้อย ให้ความถูกต้องเกี่ยวกับความถี่ของการออสซิลเลต ไม่สามารถคาดหมายระดับกำลังที่จ่ายให้กับภาวะสูงสุด และจำนวนฮาร์โมนิกส์อื่น ๆ ในส่วนของ การวิเคราะห์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น จะต้องทราบแบบจำลองที่สัญญาณขนาดใหญ่ของตัวอุปกรณ์ประกอบกับเอสพารามิเตอร์ ซึ่งให้ความถูกต้องเกี่ยวกับระดับกำลังที่จ่ายให้กับโหลดและจำนวนฮาร์โมนิกส์ หรือฮาร์โมนิกส์ย่อย วิธีการนี้มีความยุ่งยากมาก ใช้เวลาในการคำนวณมากนอกจากนี้ในการวิเคราะห์วงจรออสซิลเลเตอร์ ในรูปของพารามิเตอร์ซึ่งมีทั้งการวิเคราะห์โครงข่ายแบบหนึ่งพอร์ต หรือ สองพอร์ต ในการเลือกแบบพอร์ทนั้นขึ้นอยู่กับโครงสร้างของวงจร

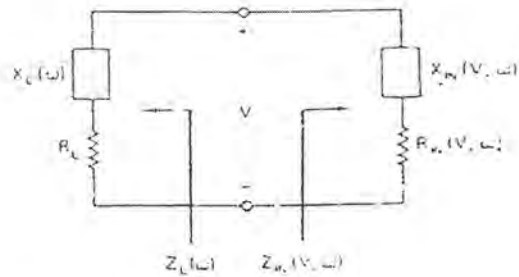
2.2 การวิเคราะห์วงจรออสซิลเลเตอร์แบบหนึ่งพอร์ต

การวิเคราะห์โครงข่ายวงจรแบบหนึ่งพอร์ตนั้นนิยามกัน คือ “one – port negative - resistance oscillator” ดังรูปที่ (2-1) แสดงให้เห็นว่าตัวอุปกรณ์ที่กำเนิดความต้านทานลบนั้นอิมพีแดนซ์ของตัวมันขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันและความถี่

$$Z_{IN}(V,\omega) = R_{IN}(V,\omega) + jX_{IN}(V,\omega) \quad (2.1)$$

โดยที่

$$R_{IN}(V,\omega) < 0$$



ภาพที่ 2-1 one-port negative-resistance oscillators.

โครงสร้างของวงจรออสซิลเลเตอร์ซึ่งแทนด้วยตัวอุปกรณ์ต่อกับโหลดพาสซีฟซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์ดังนี้

$$Z_L(\omega) = R_L + jX_L(\omega) \quad (2.2)$$

โครงข่ายหนึ่งพอร์ตดังรูปที่ (2-1) มีเสถียรภาพถ้า

$$\text{Re}[Z_{IN}(V, \omega) + Z_L(\omega)] > 0 \quad (2.3)$$

โครงข่ายหนึ่งพอร์ตจะเกิดการออสซิลเลตเมื่อ

$$\Gamma_{IN}(V, \omega)\Gamma_L(\omega) = 1 \quad (2.4)$$

เงื่อนไขการออสซิลเลชันซึ่งแสดงในรูป

$$R_{IN}(V, \omega) + R_L = 0 \quad (2.5)$$

และ

$$X_{IN}(V, \omega) + X_L(\omega) = 0 \quad (2.6)$$

ข้อกำหนดของตัวอุปกรณ์ซึ่งถูกนิยามถึงความไม่เสถียรบางช่วงความถี่ $W_1 < W < W_2$ ถ้า $R_{IN}(V, W) < 0$ โคร่งข่ายหนึ่งพอร์ทนั้นมีความไม่เสถียรบางความถี่ W_0 ในย่านหนึ่งถ้าผลรวมสุทธิของโคร่งข่ายเป็นลบก็ต่อเมื่อ

$$|R_{IN}(V, \omega_0)| > R_L \quad (2.7)$$

จากการกระตุ้นที่สภาวะชั่วครู่ของสัญญาณรบกวนให้กับวงจรที่ทำให้เริ่มต้นเกิดการออสซิลเลชันอย่างต่อเนื่องในขณะนี้จะมีการสร้างความต้านทานลบขึ้นในโคร่งข่ายขนาดแรงดันจะเข้าสู่สภาวะคงตัวซึ่งแทนด้วย V_0 เป็นสภาวะที่ผลรวมของความต้านทานในวงปิดเป็นศูนย์ ซึ่งตรงกับเงื่อนไขของสมการที่ (2.5) และ (2.7) นั่นคือ $Z_{IN}(V, W)$ จะขึ้นอยู่กับขนาดแรงดัน ดังนั้นที่ $V = V_0$ สามารถเขียนอยู่ในรูป

$$R_{IN}(V_0, \omega_0) + R_L = 0 \quad (2.8)$$

ความถี่ของการออสซิลเลชันนั้นถูกกำหนดด้วยสมการที่ 2.6 นั้นอาจไม่มีเสถียรภาพเนื่องจาก $X_{IN}(V_1, \omega_0)$ ขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดัน

$$X_{IN}(V_1, \omega_0) \neq X_{IN}(V_0, \omega_0) \quad (2.9)$$

โดยที่ V_1 เป็นแรงดันใด ๆ ดังนั้นสิ่งที่จำเป็นที่จะต้องหาเงื่อนไขอื่น ๆ เพื่อรับรองว่าวงจรนั้นมีการออสซิลเลชันอย่างมีเสถียรภาพ ถ้าการแปรค่าของ $Z_{IN}(V, W)$ กับความถี่มีค่าน้อยมากรอบ ๆ ความถี่ ω_0 ซึ่ง นาย “Kurokawa” แสดงให้เห็นถึงเงื่อนไขที่มีการออสซิลเลชันอย่างมีเสถียรภาพดังนี้

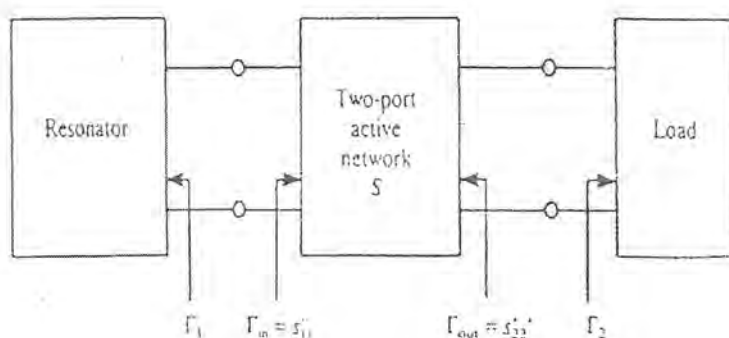
$$\frac{\partial R_{IN}(V, \omega)}{\partial V} \bigg|_{V=V_0} \frac{dX_L(\omega)}{d\omega} \bigg|_{\omega=\omega_0} - \frac{\partial X_{IN}}{\partial V} \bigg|_{V=V_0} \frac{dX_L(\omega)}{d\omega} \bigg|_{\omega=\omega_0} > 0 \quad (2.10)$$

ดังนั้นความถี่ของออสซิลเลเตอร์ถูกกำหนดด้วยสมการที่ (2.6) และ (2.8) และมีเสถียรภาพจะต้องอยู่ในข้อกำหนดของสมการที่ (2.10) เมื่อ

$$\frac{dR_L(\omega)}{d\omega} = 0 \quad (2.11)$$

2.2 การวิเคราะห์ห้วงจรออสซิลเลเตอร์แบบสองพอร์ต

เป็นวิธีการที่ง่ายและนิยมใช้ในการออกแบบซึ่งใช้เอสพารามิเตอร์ ดังรูปที่ (2-2) แสดงให้เห็นถึงตัวเรโซเนเตอร์ต่อที่ขั้วอินพุทของทรานซิสเตอร์หรือเป็นโครงข่ายแบบสองพอร์ต ส่วนที่ขั้วเอาต์พุทของโครงข่ายสองพอร์ตนั้นเชื่อมต่อกับโหลด



ภาพที่ 2-2 Two – port oscillator model

เงื่อนไขของการออสซิลเลชันเป็นดังนี้

$$K < 1 \quad (2.12)$$

$$\Gamma_1 S'_{11} = 1 \quad (2.13)$$

if and only if

$$\Gamma_2 S'_{22} = 1 \quad (2.14)$$

ตัวประกอบเสถียรภาพ K ของโครงข่ายตัวอุปกรณ์แอคทีฟควรมีค่าน้อยกว่าหนึ่งทำให้ตัวอุปกรณ์นั้นเกิดการออสซิลเลตได้ง่าย ถ้าไม่พอดีกับเงื่อนไขทั้งสองข้อซึ่งแก้ไข โดยเปลี่ยนขั้วต่อร่วม หรือเพิ่มการป้อนกลับแบบบวก ในการออกแบบซึ่งมี Passive termination Γ_1 และ Γ_2 ที่พอร์ทอินพุท และเอาต์พุทพอร์ทเกิดเรโซแนนซ์ขึ้นด้วยความถี่ที่เหมือนกัน

ทฤษฎีบทที่ 1

เงื่อนไขสำหรับพอร์ทอินพุทเมื่อเกิดสถานะเรโซแนนซ์

$$\Gamma_1 S'_{11} = 1 \quad (2.15)$$

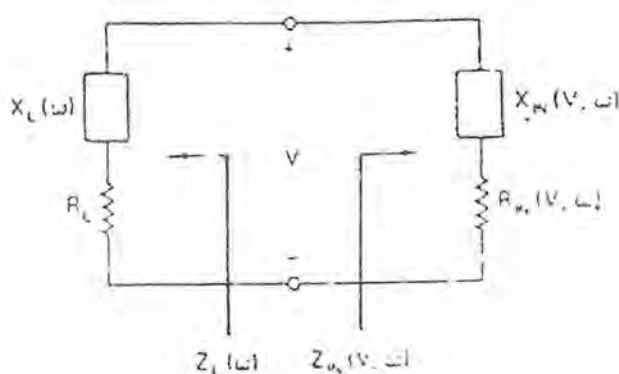
การพิสูจน์

สำหรับการออสซิลเลชันจะเกิดขึ้นเมื่อ จำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของอินพุทอิมพีแดนซ์ของโครงข่ายในวงรอบรวมกันเป็นศูนย์ ดังรูปที่ (2-3)

$$R_{in} + R_1 = 0 \text{ and } jX_{in} + jX_1 = 0 \quad (2.16)$$

$$R_{in} = -R_1 \text{ and } X_{in} = -X_1$$

ภาพที่ 2-3 Oscillation in port 1



สัมประสิทธิ์การสะท้อนคลื่น Γ_{in} เมื่อมองจากพอร์ทขาเข้าของโครงข่ายตัวอุปกรณ์แอคทีฟเป็นดังนี้

$$\Gamma_{in} = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0}$$

$$Z_{in} = R_{in} + jX_{in}$$

$$\Gamma_{in} = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0}$$

$$= \frac{R_{in} + jX_{in} - Z_0}{R_{in} + jX_{in} + Z_0}$$

The reflection coefficient Γ_1 , looking into the resonator, is given by

$$\begin{aligned} \Gamma_1 &= \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \\ &= \frac{R_1 + jX_1 - Z_0}{R_1 + jX_1 + Z_0} \end{aligned}$$

Now that $S'_{11} = \Gamma_{in}$, therefore

$$\begin{aligned} S'_{11} \Gamma_1 &= \Gamma_{in} \Gamma_1 \\ &= \left[\frac{R_{in} + jX_{in} - Z_0}{R_{in} + jX_{in} + Z_0} \right] \left[\frac{R_1 + jX_1 - Z_0}{R_1 + jX_1 + Z_0} \right] \end{aligned} \quad (2.17)$$

On substituting (2.16) into (2.17)

$$S'_{11} \Gamma_1 = \left[\frac{-R_1 + jX_1 - Z_0}{-R_1 + jX_1 + Z_0} \right] \left[\frac{R_1 + jX_1 - Z_0}{R_1 + jX_1 + Z_0} \right],$$

$$\text{i.e. } S'_{11} \Gamma_1 = -1.$$

ทฤษฎีบทที่ 2

เมื่อระบบเกิดการออสซิลเลตที่พอร์ทที่หนึ่ง ผลคือจะเกิดการออสซิลเลต พอร์ทที่สองเป็นดังนี้

$$\Gamma_1 s'_{11} = 1$$

if and only if

$$\Gamma_2 s'_{22} = 1$$

การพิสูจน์

จากทฤษฎีโครงข่ายสองพอร์ทนั้นอาจเขียนในรูป

$$s'_{11} = \frac{s_{11} + s_{12}s_{21}\Gamma_2}{1 - s_{22}\Gamma_2} \quad (2.18)$$

$$\text{หรือ } s'_{11} = \frac{s'_{11} - s_{12}s_{21}\Gamma_2}{1 - s_{22}\Gamma_2} \quad (2.19)$$

ในลักษณะที่คล้ายคลึงกันจะได้

$$\begin{aligned} s'_{22} &= \frac{s_{22} + s_{12}s_{21}\Gamma_1}{1 - s_{11}\Gamma_1} \\ &= \frac{s_{22}(1 - s_{11}\Gamma_1) + s_{12}s_{21}\Gamma_1}{1 - s_{11}\Gamma_1} \end{aligned}$$

$$s'_{22} = \frac{s_{22} - s_{22}s_{11}\Gamma_1 + s_{12}s_{21}\Gamma_1}{1 - s_{11}\Gamma_1}$$

$$s'_{22} = \frac{s_{22} - (s_{11}s_{22} - s_{12}s_{21})\Gamma_1}{1 - s_{11}\Gamma_1} \quad (2.20)$$

แทนสมการที่ (2.19) ลงใน (2.20)

$$s'_{22} = \frac{s_{22} - \{[s'_{11} - (s_{12}s_{21}\Gamma_2)/(1 - s_{22}\Gamma_2)]s_{22} - s_{12}s_{21}\}\Gamma_1}{1 - [s'_{11} - (s_{12}s_{21}\Gamma_2)/(1 - s_{22}\Gamma_2)]\Gamma_1} \quad (2.21)$$

$$s'_{22} = \frac{s_{22} - [1 - \Gamma_1 s'_{11}] + (s_{12}s_{21}\Gamma_2)/(1 - s_{22}\Gamma_2)}{[1 - s'_{11}\Gamma_1] + (s_{12}s_{21}\Gamma_1\Gamma_2)/(1 - s_{22}\Gamma_2)}$$

การออสมิลเลชั่นเริ่มต้นที่พอร์ทที่หนึ่ง

$$s'_{11} \Gamma_1 = 1$$

สมการที่ (2.21) ลดรูปเป็น

$$s'_{22} \Gamma_2 = 1$$

ส่วนกลับของ s'_{11} หรือ Γ_{in} แล้วแสดงในเทอมของ s'_{22} และ Γ_2 โคนแทน $s'_{22} \Gamma_2 = 1$ ซึ่งแสดง
ในรูปของ s'_{11} เราจะได้ $s'_{11} \Gamma'_1 = 1$ ผลที่ได้คือ

$$s'_{11} \Gamma_1 = 1$$

$$s'_{22} \Gamma_2 = 1$$

ทฤษฎีบทที่ 3

ภายใต้เงื่อนไขการออสมิลเลตอย่างมีเสถียรภาพจะต้องอยู่ในเงื่อนไขทั้งทฤษฎีบทที่ 1 และบทที่ 2 ดังนี้

$$s'_{11} \Gamma_1 = 1 \text{ if and only if } s'_{22} \Gamma_2 = 1. \quad (2.22)$$

อย่างไรก็ตามการออสซิลเลชันซึ่งเริ่มต้นด้วยเงื่อนไขดังนี้

$$\begin{aligned} |\Gamma_{1s'_{11}}| &> 1 \\ |\Gamma_1| &> \left| \frac{1}{s'_{11}} \right|. \end{aligned} \quad (2.23)$$

หรือการออสซิลเลชันนั้นเริ่มต้นสร้างขึ้นจนกระทั่งตัวอุปกรณ์มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น เนื่องจากการจำกัดแรงดันหรือกระแสผลลัพธ์การออสซิลเลตจะเข้าสู่สภาวะคงตัว ความถี่ของการออสซิลเลชันและมีเสถียรภาพเมื่ออยู่ในเงื่อนไข

บทที่ 3

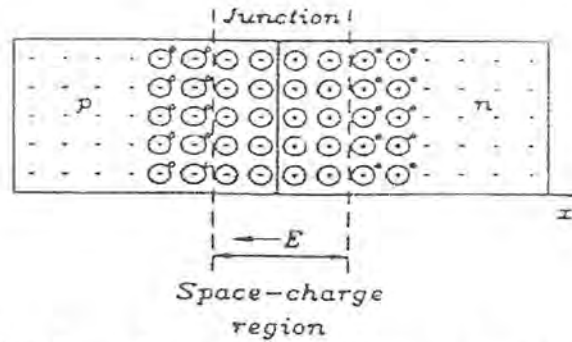
ทฤษฎีและหลักการทำงานของวาเรกเตอร์ไดโอด

วาเรกเตอร์ไดโอดเป็นตัวยูปรณ์สารกึ่งตัวนำที่ใช้กันแพร่หลายคือ โดยนำมาใช้เป็นตัวอุปกรณ์ที่แปรค่ารีแอคแตนซ์ได้ หลักการแปรค่ารีแอคแตนซ์จะอยู่ในรูปการแปรค่าความจุบริเวณรอยต่อด้วยแรงดันควบคุมที่จัดไบแอสย้อนกลับซึ่งป้อนให้กับวาเรกเตอร์ไดโอด วาเรกเตอร์ไดโอดทำจากสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิคอน (silicon) หรือ แกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) รอยต่อจากโครงสร้างของวาเรกเตอร์ไดโอดถูกจัดแบ่งในรูปของรอยต่อแบบพี-เอ็น (p - n junction) รอยต่อแบบ ชอตต์กีแบเรียร์ (Schottky - barrier junction) นอกจากนี้ยังพบว่าคุณสมบัติของรอยต่อ เช่น รอยต่อแบบขั้น (graded junction) และรอยต่อแบบลาด (abrupt junction) ซึ่งทำหน้าที่กำหนดความเป็นเชิงเส้นในการปรับจูนความถี่ ย่นในการปรับจูน ระดับของสัญญาณรบกวนเชิงเฟส จากคุณสมบัติ ดังกล่าวข้างต้นจึงได้นำวาเรกเตอร์ไดโอด มาประยุกต์ใช้งาน เช่น ออสซิลเลเตอร์ชนิดควบคุมความถี่ด้วยแรงดัน (Voltage - controlled oscillator) ตัวเลื่อนเฟส (phase shifter) การมอดูเลต (modulation) ตัวคูณความถี่ (frequency multiplier) ตัวขยายแบบพารามตริกซ์ (parametric amplifier) เป็นต้น

3.1 ค่าความจุบริเวณอับพาหะนำประจุและหลักการทำงาน

(SPACE - CHARGE CAPACITANCE AND PRINCIPLE OF OPERATION)

โครงสร้างพื้นฐานของวาเรกเตอร์ไดโอดในรูปรอยต่อพี-เอ็น แสดงดังภาพที่ 3.-1 เมื่อพิจารณาพี-เอ็นจังก์ชันซึ่งเป็นรอยต่อในสารกึ่งตัวนำชั้นเดียวซึ่งประกอบด้วยด้านเอ็น และด้านพี โดยสารกึ่งตัวนำด้านเอ็นนั้นคือ บริเวณที่ถูกโด๊ปด้วยสารเจือโคเนอร์ ส่วนสารกึ่งตัวนำด้านพี คือ บริเวณที่ถูกโด๊ปด้วยสารเจือแอกเซฟเตอร์ เมื่อนำชิ้นส่วนของสารกึ่งตัวนำทั้งสองมาเชื่อมต่อเข้าด้วยกัน ผลคือ บริเวณรอยต่อจะเกิดเกรเดียนต์ความหนาแน่นของพาหะอิสระทั้งสองชนิด และเกิดการแพร่ของอนุภาคขึ้นในทิศทางตรงข้ามกับเกรเดียนต์ อาจกล่าวได้อีกแบบหนึ่งว่าเมื่อสารกึ่งตัวนำสองส่วนถูกสร้างขึ้นในสารชั้นเดียวกันจะทำให้เกิดสภาวะไม่สมดุลย์ และทำให้เกิดการแพร่ของพาหะอิสระ เหล่านั้น เพื่อให้ระบบทั้งหมดเข้าสู่สภาวะสมดุลย์ ทิศทางของการแพร่จะตรงข้ามกับเกรเดียนต์ดังกล่าว



ภาพที่ 3-1 โครงสร้างของรอยต่อพี-เอ็น และบริเวณประจุค้าง

ดังนั้นอิเล็กตรอนอิสระจะแพร่จากสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเข้าไปในสารชนิดพี และ โฮลอิสระ จะแพร่จากสารกึ่งตัวนำชนิดพี เข้าไปในสารชนิดเอ็น การแพร่เช่นนี้จะเกิดตลอดไปอย่างไม่มีที่สิ้นสุด โดยพิจารณาตัวอย่างจากโฮล เมื่อโฮลแพร่จากสารกึ่งตัวนำชนิดพีเข้าสู่สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะทำให้สารกึ่งตัวนำชนิดพีเหลือไอออนในซ์แอคเซพเตอร์ซึ่งเป็นไอออนลบ ขณะเดียวกันการแพร่ของอิเล็กตรอนอิสระจากสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเข้าไปสู่สารกึ่งตัวนำชนิดพี ก็จะทำให้สารชนิดพีมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบมากขึ้นเมื่อเทียบกับสารชนิดเอ็น ความต่างศักย์นี้เรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวสัมผัสนั่นเอง หรือเรียกว่า built-in potential barrier จากศักย์ไฟฟ้านี้จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายในขึ้นบริเวณรอยต่อดังภาพที่ 3-1 สถานะสมดุลจะเกิดขึ้นเมื่อการแพร่ของพาหะอิสระข้ามรอยต่อกับการเคลื่อนย้ายของพาหะอิสระข้ามรอยต่อนี้เนื่องจากสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากัน หรืออาจกล่าวได้ว่า เมื่อสนามไฟฟ้าภายในมีค่ามากพอจนกระทั่งด้านการแพร่ให้น้อยลงจนเข้าสู่สมดุล ดังนั้นศักย์ไฟฟ้ามีคร่อมระหว่างรอยต่อจึงถูกเรียกว่า built-in potential []

$$V_{bi} = -\int E dx \quad (3.1)$$

โดยที่ V_{bi} เป็น built-in potential

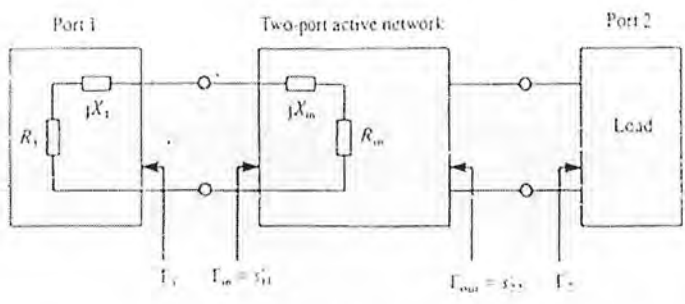
สำหรับแกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าประมาณ 1.3 โวลต์

ถ้าเราป้อนแรงดันย้อนกลับดังภาพที่ แรงดันไฟฟ้าที่ไบแอสย้อนกลับจะทำให้เสีย สมดุลย์อิเล็กตรอนจำนวนมากจะเคลื่อนที่ไปทางขวามือ และโฮลเคลื่อนที่ไปทางซ้ายมือ ผลคือ จะทำให้ความกว้างของบริเวณ (space - charge region) เพิ่มขึ้น ดังนั้นค่าความจุบริเวณรอยตอดังกล่าวจึงแสดงในรูป

$$\frac{C_j}{dV} = \frac{dQ}{dV}$$

(3.2)

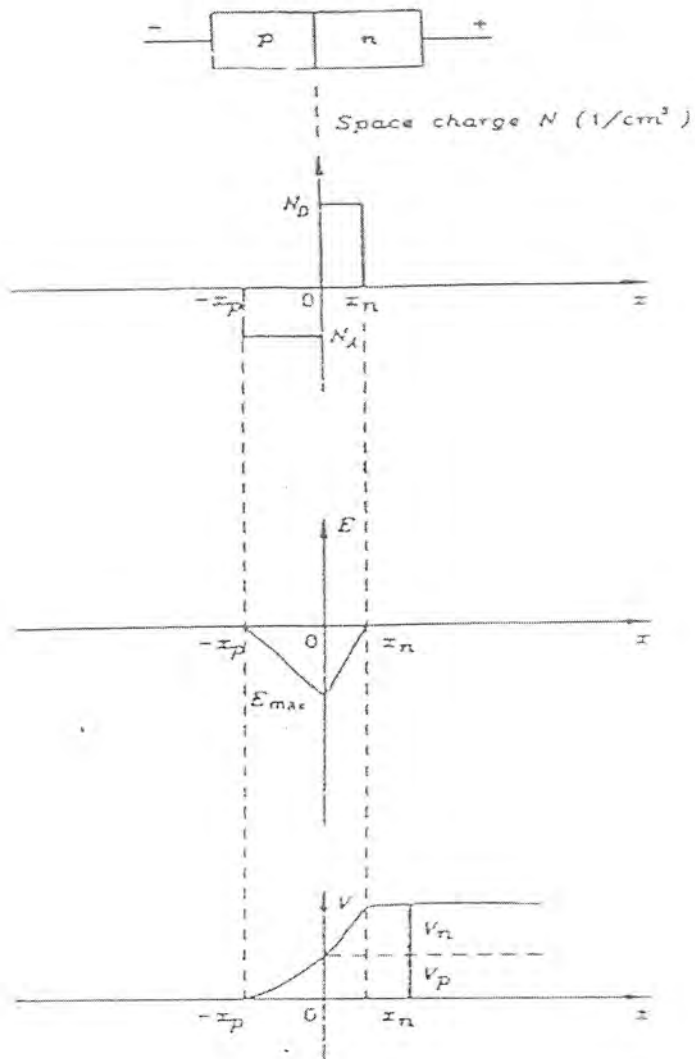
โดยที่ Q เป็นจำนวนประจุ space charge
V เป็นแรงดันไฟฟ้าที่ไบแอสย้อนกลับ
C_j ค่าความจุบริเวณรอยต่อ



ภาพที่ 3-2 แสดงการจัดไบแอสให้กับรอยต่อ พี – เอ็น

- ก. การจัดไบแอสกลับจะทำให้ความกว้างของ space - charge region เพิ่มขึ้น
- ข. การจัดไบแอสตรงจะทำให้ความกว้างของ space - charge region ลดลง

ถ้าพิจารณารอยต่อพี – เอ็นที่แสดงดังภาพที่ สมมติให้ ความเข้มข้นของโดเนอร์ (N_D) มีค่าสูงกว่าความเข้มข้นของแอกเซพเตอร์ (N_A) ความเข้มข้นของประจุค้าง (space - charge) ซึ่งแสดงดังภาพที่ ในส่วนของสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าถูกแสดงดังภาพที่ และภาพที่ ตามลำดับ ดังนั้นจำนวนประจุทั้งหมดในบริเวณ space - charge region ที่มีความกว้างเท่ากับ X_p + X_n



ภาพที่ 3-3 รอยต่อพี - เอ็น

ก. space - charge concentration

ข. electric field

ค. potential across the junction

เนื่องจากจำนวนประจุด้านซ้ายมือ และขวามือมีค่าเท่ากันซึ่งจะได้

$$Q_A = Q_D \quad (3.3)$$

ดังนั้น

$$A_q N_A X_p = A_q N_D X_n \quad (3.4)$$

โดยที่

q เป็นประจุของอิเล็กตรอนหรือ โฮล

A เป็นพื้นที่หน้าตัด

จากสมการที่ (3.4) จึงเขียนในรูป

$$N_A X_p = N_D X_n \quad (3.5)$$

เมื่อพิจารณาในรูปของสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าโดยใช้สมการปัวซอง (Poisson's equation) หนึ่งมิติ

$$\frac{d^2V}{dx^2} = \frac{-dE}{dx} = \frac{-\rho}{\epsilon_s} = \begin{cases} \frac{-q N_D}{\epsilon_s} \text{ สำหรับ } 0 < X < X_n \\ \frac{q N_D}{\epsilon_s} \text{ สำหรับ } -X_p \leq X < 0 \end{cases} \quad (3.6)$$

โดยที่

ϵ_s เป็นค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของสารกึ่งตัวนำ

เป็นความหนาแน่นของประจุ

จากสมการที่ (3.6) เขียนในรูป

$$E(x) = \begin{cases} \frac{q N_D \int_{x_n}^x dx}{\epsilon_s} = \frac{q N_D (X - X_n)}{\epsilon_s} & \text{สำหรับ } 0 < X < X_n \\ \frac{-q N_D \int_{-x_p}^x dx}{\epsilon_s} = \frac{-q N_A (X - X_p)}{\epsilon_s} & \text{สำหรับ } -X_p \leq X < 0 \end{cases} \quad (3.7)$$

(3.8)

สนามไฟฟ้ามีค่าสูงสุดที่ $X = 0$ จะทำให้สมการที่ (3.7) และสมการที่ (3.8) จัดอยู่ในรูป

$$E_m = E(x) \Big|_{X=0} = \frac{-q N_D X_n}{\epsilon_s} = \frac{-q N_A X_p}{\epsilon_s} \quad (3.9)$$

ศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากสารกึ่งตัวนำด้านเอ็น

$$V_n = \frac{-q N_D \int_0^{x_n} (x - x_n) dx}{\epsilon_s} = \frac{q N_D X_n^2}{2\epsilon_s} \quad (3.10)$$

ในลักษณะที่คล้ายกัน ศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากสารกึ่งตัวนำด้านพี

$$V_p = \frac{q N_A \int_{-x_p}^0 (x - x_p) dx}{\epsilon_s} = \frac{q N_A X_p^2}{2\epsilon_s} \quad (3.11)$$

ผลรวมของแรงดันไฟฟ้าที่เป็นแรงดันไบเอสดกับแรงดัน built-in voltage มีค่าเท่ากับ $V_n + V_p$

$V_{bi} + V = V_{bi} - V = V_n + V_p \tag{3.12}$

$= \frac{q N_D X_n^2}{2\epsilon_s} + \frac{q N_A X_p^2}{2\epsilon_s}$

$= X_n^2 \left[\frac{q N_D (N_A + N_D)}{2\epsilon_s N_A} \right] \tag{3.13}$

โดยที่

$X_p = (N_D + N_A) X_n$
 V เป็นแรงดันไฟฟ้าที่มีศักย์เป็นลบเนื่องจากทำการไบแอสย้อนกลับ

ความสัมพันธ์ระหว่าง space – charge width กับแรงดันไฟฟ้าที่ด้านอื่น

$X_n = \left[\frac{2\epsilon_s (V_{bi} + V) N_A}{q N_D (N_A + N_D)} \right]^{1/2} \tag{3.14}$

ในลักษณะที่คล้ายคลึงกันที่ด้านพี

$X_p = \left[\frac{2\epsilon_s (V_{bi} - V) N_D}{q N_D (N_A + N_D)} \right]^{1/2} \tag{3.15}$

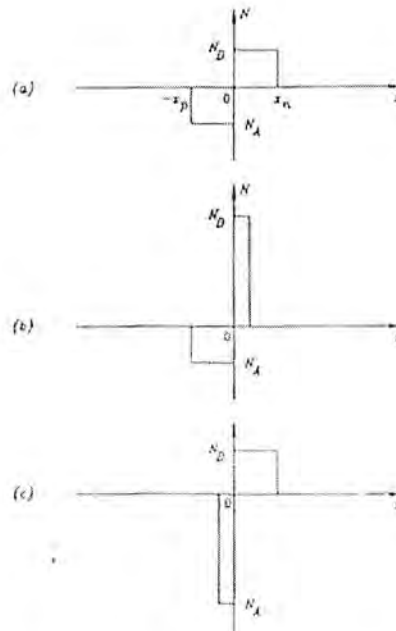
ดังนั้นจำนวน space - charge width ทั้งหมด คือ

$$W = X_n + X_p \quad (3.16)$$

แทนสมการที่ (3.14) และสมการที่ (3.15) ลงในสมการที่ (3.16) จะได้

$$W = \left[\frac{2\epsilon_s (V_{bi} - V) (N_A + N_D)}{q N_A N_D} \right]^{1/2} \quad (3.17)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (3.17) ในรูปของ doping concentration แบ่งออกเป็น 3 กรณี แสดงดังภาพที่ 3-4



ภาพที่ 3-4 Doping profiles ก. Symmetrical double – side junction

ข. single – sided $n^+ - p$ junction

ค. single – sided $p^+ - n$ junction

กรณีที่ 1. ถ้า $N_A = N_D = N$ ซึ่งใช้กับ symmetrical double - sided junction

$$W = \left[\frac{4\mathcal{E}_s(V_{bi} - V)}{qN} \right]^{1/2} \quad (3.18)$$

กรณีที่ 2. ถ้า $N_D \gg N_A$ ซึ่งใช้กับ a single - sided $n^+ - p$ junction

$$W \approx X_p = \left[\frac{2\mathcal{E}_s(V_{bi} - V)}{q N_A} \right]^{1/2} \quad X_p \gg X_n \quad (3.19)$$

กรณีที่ 3. ถ้า $N_A \gg N_D$ ซึ่งใช้กับ a single - sided $p^+ - n$ junction
(or a Schottky - barrier junction)

$$W \approx X_n = \left[\frac{2\mathcal{E}_s(V_{bi} - V)}{q N_D} \right]^{1/2} \quad X_n \gg X_p \quad (3.20)$$

ค่าความจุบริเวณรอยต่อถูกนิยามด้วย

$$C_j(V) = \left| \frac{dQ}{dV} \right| \quad (3.21)$$

เนื่องจากจำนวนประจุทั้งหมดที่ด้านหนึ่ง

$$Q = qA N_A X_p \quad (3.22)$$

$$Q = qA N_A \left[\frac{2\mathcal{E}_s(V_{bi} - V) N_D}{q N_A (N_A + N_D)} \right]^{1/2} \quad (3.23)$$

ค่าความจุบริเวณรอยต่อที่พิสูจน์ได้โดยใช้สมการที่ (3.22) และสมการที่ (3.23)

$$C_j(V) = \left| \frac{dQ}{dV} \right|$$

$$C_j(V) = \frac{A}{2} \left[\frac{2q\epsilon_s N_A N_D}{N_A + N_D} \right]^{1/2} (V_{bi} - V)^{-1/2} \quad (3.24)$$

จากสมการที่ (3.24) พบว่า

$$C_j(V) = \frac{\epsilon_s A}{W(V)} \quad (3.25)$$

โดยที่ C_{j0} นั้นแทน C_j ที่ $V = 0$ ซึ่งเขียนในรูป

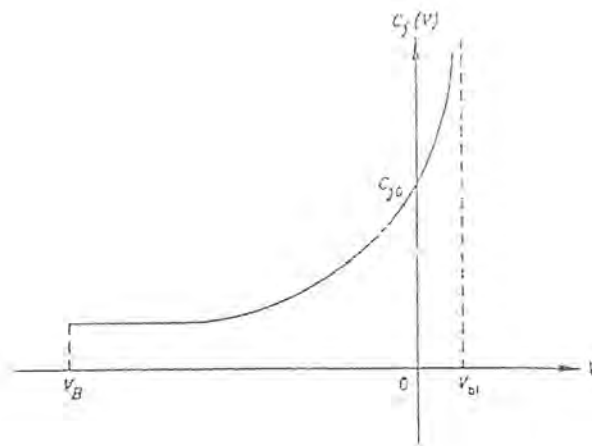
$$C_{j0} = C_{j(0)} = \frac{A}{2} \left[\frac{2q\epsilon_s N_A N_D}{(N_A + N_D) V_{bi}} \right]^{1/2} \quad (2.26)$$

จากสมการที่ (3.26) เขียนในรูป

$$C_j(V) = C_{j0} (1 - \frac{V}{V_{bi}})^{-1/2} = C'_{j0} (V_{bi} - V)^{-1/2} \quad (2.27)$$

โดยที่ $C'_{j0} = C_{j0} \sqrt{V_{bi}}$

จากสมการที่ (2.27) ซึ่งเป็นสมการที่มีความสำคัญและเกี่ยวข้องกับการทำงานของ วาเรกเตอร์ไดโอด โดยบรรยายถึงค่าความจุบริเวณรอยต่อนั้นเป็นฟังก์ชันกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อน ไบแอสกลับสำหรับรอยต่อลาด (abrupt p - n junction) เมื่อนำไปพล็อตจะได้ดังภาพที่ (3-5)



ภาพที่ 3-5 คุณสมบัติของวาเรกเตอร์ไดโอด

สมการแสดงคุณสมบัติของวาเรกเตอร์ไดโอด ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุบริเวณรอยต่อ กับแรงดันไบแอสกลับ เมื่อเขียนอยู่ในรูปทั่วไป

$$C_j(V) = C_{j0} \left(1 - \frac{V}{V_{bi}}\right)^{-Y} = C'_{j0} (V_{bi} - V)^{-Y} \quad (3.28)$$

โดยที่ Y เป็นพารามิเตอร์ที่เรียกว่า doping profile

$$C_{j0} = C_{j0} V_{bi}$$

สำหรับสมการในรูปทั่วไปของ $p^+ - n$ ค่า doping ที่ด้านเอ็น

$$N_D = B_x^m \quad (3.29)$$

เมื่อ $m = 0$ จะอยู่ในรูปของ abrupt junction ซึ่ง $N_D = B =$ ค่าคงที่ ผลที่ได้จากการพิสูจน์เป็นดังนี้

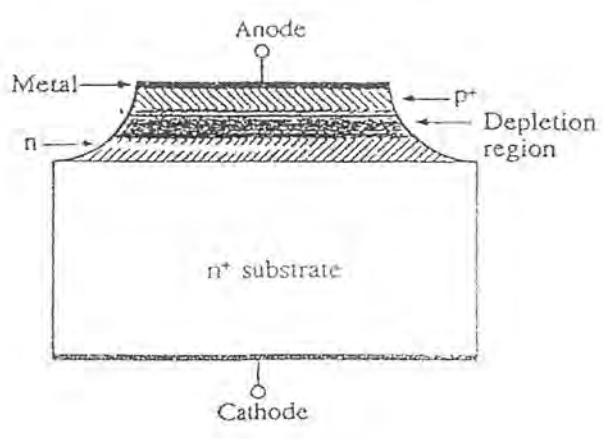
$$\Upsilon = \frac{1}{m+2}$$

(3.30)

- ถ้า $m = 0$ ดังนั้น $\Upsilon = \frac{1}{2}$ ใช้สำหรับ abrupt junction
- ถ้า $m = 1$ ดังนั้น $\Upsilon = \frac{1}{3}$ ใช้สำหรับ a linear junction
- ถ้า $m = -1$ ดังนั้น $\Upsilon = 1$ ใช้สำหรับ a hyper - abrupt junction
- ถ้า $m = -\frac{3}{2}$ ดังนั้น $\Upsilon = 2$

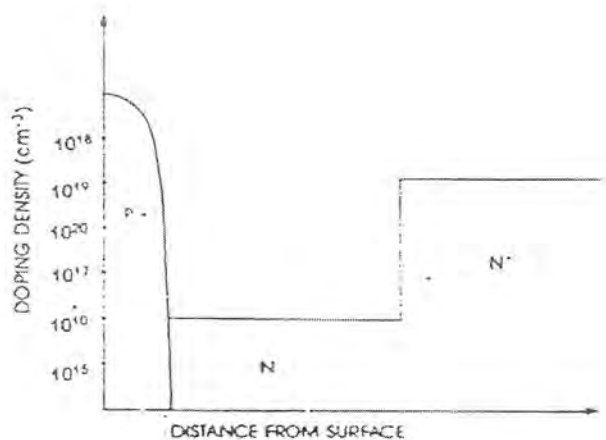
3.2 โครงสร้างของวาเรกเตอร์ไดโอด

วาเรกเตอร์ไดโอดซึ่งสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิคอน (Si) หรือแกเลียมอาเซไนด์ (GaAs) เมื่อพิจารณาจากพื้นที่หน้าตัดจากโครงสร้างของวาเรกเตอร์ชนิด (mesa type varactor) ดังภาพที่ ซึ่งประกอบด้วยชั้นสาร n^+ เป็นวัสดุฐานรอง (substrate) ชั้นสาร n เป็นชั้นสารแอคทีฟ และชั้นสารบนสุดคือ ชั้นสาร p^+ ตามลำดับ ชั้นสารด้านบนสุด และ ด้านล่างสุดนั้นใช้ (ohmic contacts) เชื่อมต่อตัวอุปกรณ์กับวงจรภายนอก

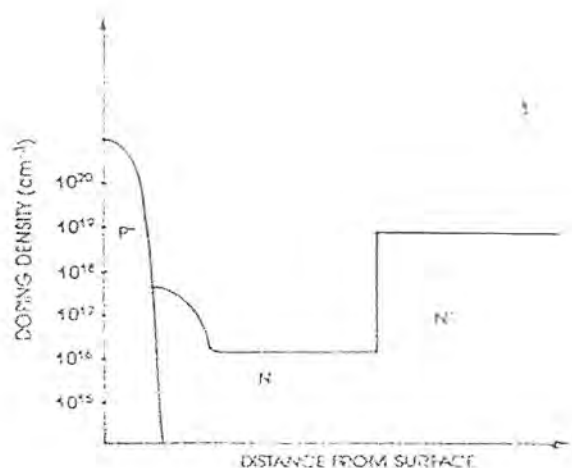


ภาพที่ 3-6 โครงสร้างของวาเรกเตอร์ชนิด mesa

วาเรกเตอร์ไดโอดทำงานภายใต้การป้อนแรงดันไฟฟ้าไบแอสย้อนกลับ ความสัมพันธ์ในการแปรค่าความจุที่บริเวณปลอดประจุ (depletion region) กับแรงดันไฟฟ้าไบแอสย้อนกลับจะเป็นเชิงเส้นหรือไม่นั้นโดยจะขึ้นอยู่กับค่า doping profile แสดงดังภาพที่ สำหรับรอยต่อแบบ abrupt junction และภาพที่ สำหรับรอยต่อแบบ hyperabrupt junction



ภาพที่ 3-7 Doping profile ของรอยต่อ abrupt junction



ภาพที่ 3-8 Doping profile ของรอยต่อ hyperabrupt junction

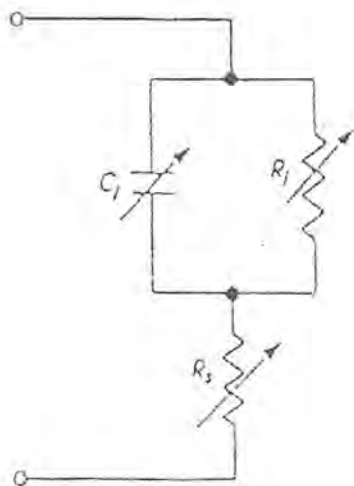
รอยต่อแบบ abrupt junction เป็นรอยต่อที่ทำการโดปอย่างเข้มข้นบริเวณใกล้ ๆ กับขั้วต่อ ด้านบนของชั้นสาร p^+ ระดับของการโดปซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงทันทีที่ชั้นโดที่รอยต่อ p^+n ไปยังชั้น สาร n ซึ่งมีระดับของการโดปแบบราบเรียบ และมีการเปลี่ยนแปลงของระดับการโดปอย่างทันทีที่ ชั้นโดที่รอยต่อระหว่างชั้นสาร nn^+ ส่วนรอยต่อแบบ hyperabrupt junction เป็นรอยต่อที่มีการ เปลี่ยนแปลงระดับของการโดปให้มีความลาดชันลดลงที่บริเวณรอยต่อของชั้นสาร p^+n

3.3 วงจรสมมูลของวาแรกเตอร์ไดโอด

วาแรกเตอร์ไดโอดจัดเป็นอุปกรณ์แอคทีฟ โดยโครงสร้างประกอบด้วยชั้นของสารกึ่งตัวนำ รอยต่อของแต่ละชั้นสารนั้นเกิดจากการ diffusion วาแรกเตอร์ไดโอดโดยทั่วไปจะมีโครงสร้างชนิด mesa ถูกนำมาใช้ประกอบการพิจารณาเพื่อหาวงจรสมมูลของวาแรกเตอร์ไดโอด แบบชิพ การนำ วาแรกเตอร์ไดโอดมาใช้งานภายใต้เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้าที่ไบแอสย้อนกลับ ดังนั้นองค์ประกอบของ วงจรสมมูลจึงประกอบด้วย ตัวเก็บประจุบริเวณรอยต่อ (C_j : Junction capacitance) ต่อขนาน กับตัวต้านทานบริเวณรอยต่อ (R_j : Junction resistance) แล้วต่ออันดับกับตัวต้านทานอนุกรม (R_s : Series resistance) ค่าความจุบริเวณรอยต่อ (C_j) ขึ้นอยู่กับแรงดัน ไฟฟ้าไบแอสย้อนกลับ ความต้านทานบริเวณรอยต่อ (R_j) เป็นฟังก์ชันของแรงดันไบแอส ในขณะที่วาแรกเตอร์ไดโอดได้รับแรงดันไบแอสย้อนกลับจะทำให้ค่าความต้านทานนี้มีค่ามากอาจ ตัดทิ้งได้ ตัวต้านทานอนุกรม (R_s) เป็นค่าความต้านทานซึ่งเป็นฟังก์ชันของการไบแอส โดยประกอบด้วยความต้านทานทั้งสองข้างของ สารกึ่งตัวนำ และความต้านทานของขั้วต่อทางไฟฟ้าที่ต่อกับชั้นสาร จากโครงสร้างของวาแรกเตอร์ ที่กล่าวมาข้างต้นอาจไม่สะดวกต่อการนำไปใช้งาน ดังนั้นผู้ผลิตจึงนำวาแรกเตอร์ไดโอดแบบชิพมา บรรจุในรูปของแพ็คเกจ (package) ซึ่งจะทำให้ วงจรสมมูลของวาแรกเตอร์ไดโอดแบบแพ็คเกจมีความซับซ้อนมากขึ้นเนื่องจากตัวถังของแพ็คเกจ และค่าความเหนี่ยวนำเนื่องจากขั้วต่อ ซึ่งจะขอก้าวในหัวข้อต่อไป

วงจรสมมูลของวาแรกเตอร์ไดโอดแบบชิพ

วงจรสมมูลของวาแรกเตอร์ไดโอดแบบชิพ แสดงดังภาพที่ 26 เนื่องจาก วาแรกเตอร์ไดโอดทำงานภายใต้การไบแอสย้อนกลับ ดังนั้น วงจรสมมูลจึงประกอบด้วยตัวเก็บประจุบริเวณรอยต่อ (C_j) ต่อขนานกับตัวต้านทานบริเวณรอยต่อ (R_j) ในสถานะที่รอยต่อของวาแรกเตอร์ไดโอดได้รับแรงดันไฟฟ้าไบแอสย้อนกลับจะทำให้ค่าความต้านทานบริเวณรอยต่อ (R_j) มีค่าสูงมากอาจตัดทิ้งได้ ส่วนตัวต้านทานอนุกรม (R_s) เป็นค่าความต้านทานซึ่งเป็นฟังก์ชันของการไบแอส ประกอบด้วย ความต้านทานทั้งสองข้างสารกึ่งตัวนำ และความต้านทานของขั้วต่อทางไฟฟ้าที่ต่อกับชั้นสาร



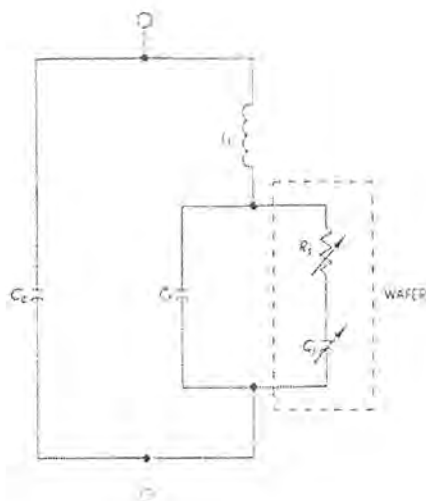
ภาพที่ 3-9 วงจรสมมูลของวาทเรเตอร์ไดโอดแบบชิฟ

โดยที่

- C_j เป็นค่าความจุบริเวณรอยต่อ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของแรงดันไบแอสย้อนกลับ
- R_j เป็นค่าความต้านทานบริเวณรอยต่อที่ต่อขนานกับ C_j ซึ่งเป็นฟังก์ชันของแรงดันไบแอส
- R_s เป็นค่าความต้านทานอนุกรม ซึ่งเป็นฟังก์ชันของแรงดันไฟฟ้าที่ไบแอสหรือเป็นค่าความต้านทานของสารกึ่งตัวนำทั้งสองข้างของรอยต่อและความต้านทานของขั้วต่อทางไฟฟ้าที่ต่อกับชั้นสาร

วงจรสมมูลของวาทเรเตอร์ไดโอดแบบแพ็กเกจ

วาทเรเตอร์ไดโอดแบบชิฟ ซึ่งมีวงจรสมมูลไม่ซับซ้อนเพราะไม่มีพารามิเตอร์แอบแฝงเนื่องจากโครงสร้างหรือตัวถัง จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานกับวงจรที่ใช้งานในย่าน ความถี่สูง ใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อยหรือเป็นอุปกรณ์ที่ติดบนผิวหน้าของวงจรรื้อจำกัดของการนำวาทเรเตอร์ไดโอดแบบชิฟมาใช้งานคือ การติดตั้งตัววาทเรเตอร์ไดโอดบนวงจร และ อาจเสียหายเนื่องจากแรงกระแทกหรือสะท้อนจากภายนอก ดังนั้นผู้ผลิตจึงแก้ปัญหาโดยสร้าง วาทเรเตอร์ไดโอดแบบแพ็กเกจ ซึ่งมีความสะดวกต่อการนำมาใช้งาน และติดตั้งง่ายวงจรสมมูลของวาทเรเตอร์ไดโอดแบบแพ็กเกจ จะมีความซับซ้อนมากเนื่องจากค่าพารามิเตอร์แอบแฝงที่เกิดขึ้นจากโครงสร้างและตัวถังดังภาพที่ 3-10



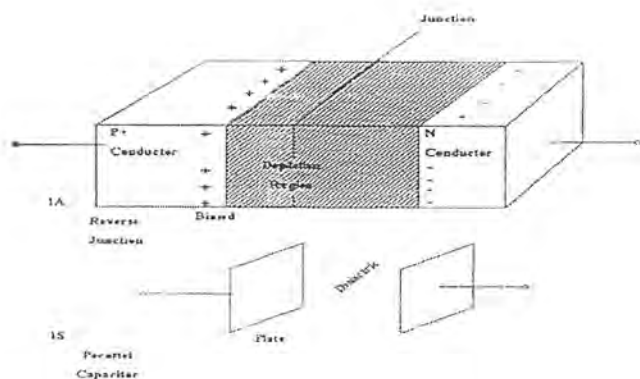
ภาพที่ 3-10 วงจรสมมูลของวาแรกเตอร์ไดโอดแบบแพ็กเกจ

โดยที่

- C_c เป็นค่าความจุไฟฟ้าเนื่องจากตัวถัง (case capacitance)
- C_f เป็นค่าความจุไฟฟ้าที่ขอบ (fringing capacitance)
- C_j เป็นค่าความจุบริเวณรอยต่อ
- R_s เป็นค่าความต้านทานอนุกรม
- L_s เป็นค่าความเหนี่ยวนำจากขั้วต่อ

3.4 ค่าความจุบริเวณรอยต่อของวาแรกเตอร์ไดโอด

ในการนำวาแรกเตอร์ไดโอดมาประยุกต์ใช้งานเพื่อให้มีคุณสมบัติตามต้องการนั้นจะต้องทำการจัดไบแอสด้วยแรงดันไฟฟ้าจากภายนอก ซึ่งมีทั้งการจัดไบแอสตรงและการจัดไบแอสกลับ หากนำวาแรกเตอร์มาประยุกต์ใช้งานในรูปของตัวเก็บประจุที่ปรับค่าได้โดยใช้ของการจัดไบแอสตรงหรือเรียกว่า ประจุไฟฟ้าการแพร่ซึม (Diffusion capacitance) และค่าความจุเนื่องจากผลของการจัดไบแอสกลับหรือที่เรียกว่า ประจุไฟฟ้าบริเวณรอยต่อ (junction capacitance) ในที่นี้จะขอกล่าวเฉพาะค่าความจุบริเวณรอยต่อของวาแรกเตอร์ไดโอดเนื่องจาก การจัดไบแอสกลับด้วยแรงดันไฟฟ้าจากภายนอกซึ่งแสดงในภาพที่ 3.11 ขณะที่รอยต่อพีเอ็นของวาแรกเตอร์ไดโอดได้รับแรงดันไฟฟ้าไบแอสกลับจะทำให้เกิดบริเวณปลอดประจุ (depletion region) ขึ้นรอบ ๆ รอยต่อพีเอ็นความกว้างของบริเวณปลอดประจุนั้นขึ้นอยู่กับ doping parameter และขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ไบแอสกลับ ในขณะที่มีการปรับเปลี่ยนขนาดแรงดันที่ไบแอสกลับจากภายนอกจะทำให้ความกว้างของบริเวณปลอดประจุเปลี่ยนแปลง ซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับตัวเก็บประจุที่ปรับเปลี่ยนค่าความจุโดยใช้หลักการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างแผ่นเพลททั้งสองที่วางขนานกันและคั่นด้วยสารไดอิเล็กตริก



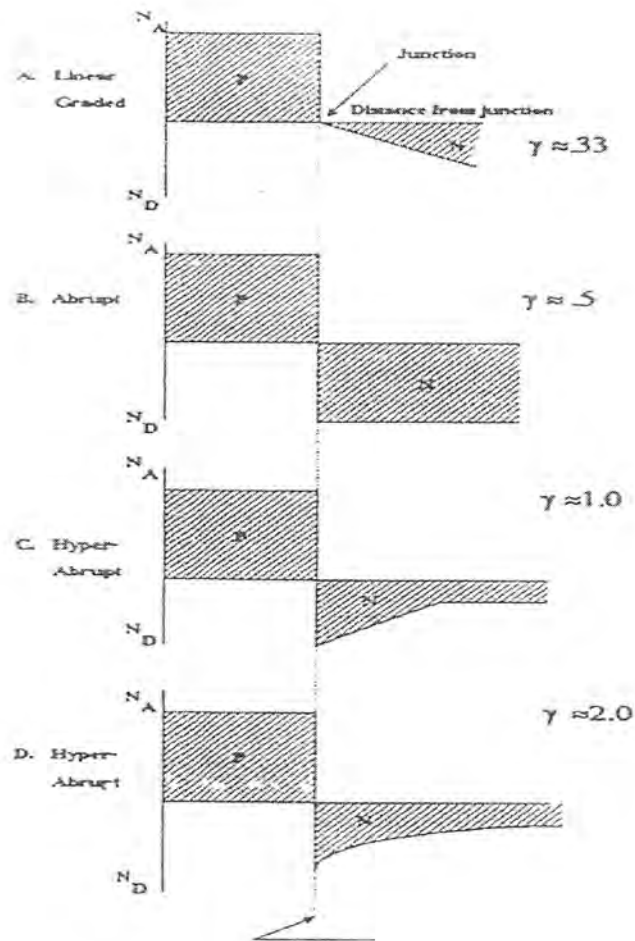
ภาพที่ 3-11 ผลของการจัดไบแอสกลับด้วยแรงดันไฟฟ้าจากภายนอกให้กับรอยต่อพีเอ็นของวาเรกเตอร์ไดโอด

โดยที่

$$\gamma = 1/(b+2) \tag{3.31}$$

C_0 เป็นค่าความจุบริเวณรอยต่อขณะที่ไม่มีการจัดไบแอส (zero - bias)

จากสมการที่ (3.31) แสดงถึงค่าความจุบริเวณรอยต่อของวาเรกเตอร์ไดโอดซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่จัดไบแอสกลับ และระดับของการโด๊ป (doping levels) ทั้งสองข้างของรอยต่อ โดยที่ความหนาแน่นการโด๊ปหรือ doping profiles ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงตามระยะทางจากรอยต่อพีเอ็น ดังภาพที่ 3-12



ภาพที่ 3-12 Diode doping profiles

ก. linearly-graded junction

ข. abrupt junction

ค. hyperabrupt junction

3.5 อัตราส่วนของการปรับจูน

เมื่อนำวาระกเตอร์ไดโอดมาใช้แทนตัวเก็บประจุที่ปรับค่าได้ด้วยแรงดันควบคุมหรือแรงดันไบแอสกลับภายนอก ผลคือค่าความจุบริเวณรอยต่อของวาระกเตอร์ไดโอดมีความจุบริเวณรอยต่อมีค่าสูงสุดที่แรงดันไบแอสกลับ 0 โวลต์ และค่าความจุบริเวณรอยต่อมีค่าต่ำสุดที่แรงดันพินช์ออฟ

(pinch-off voltage) ดังนั้นอัตราส่วนของการปรับจูนแสดงอัตราส่วนของความจุที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อของวาเรกเตอร์ไดโอด ขณะที่ทำการป้อนแรงดันไบแอสกลับสองค่าซึ่งแสดงได้ดังสมการ 3.32

$$TR = \frac{C_j(V_2)}{C_j(V_1)} \left[\frac{V_1 + \phi}{V_2 + \phi} \right]^r \tag{3.32}$$

โดยที่

ขนาดของแรงดัน $V_1 > V_2$

$C_j(V_1)$ เป็นค่าความจุบริเวณรอยต่อ ขณะที่ไบแอสกลับด้วยแรงดันไฟฟ้า V_1

$C_j(V_2)$ เป็นค่าความจุบริเวณรอยต่อ ขณะที่ไบแอสกลับด้วยแรงดันไฟฟ้า V_2

เป็นศักย์ไฟฟ้าสัมผัสที่รอยต่อ (The junction contact potential)

ซึ่งค่าประมาณ 0.7 โวลต์

เนื่องจากผลของ ϕ และค่าความจุเนื่องจากตัวถัง มีผลน้อยมาก จึงทำให้สมการที่ (3.33) เขียนอยู่ในรูปที่ง่าย และเป็นที่ยินยมนำมาใช้ในการออกแบบ

$$TR = \frac{C_j(V_{min})}{C_j(V_{max})} \left[\frac{V_{max}}{V_{min}} \right] \tag{3.33}$$

โดยที่

V_{min} เป็นแรงดันไฟฟ้าที่ไบแอสกลับซึ่งมีขนาดต่ำสุด

V_{max} เป็นแรงดันไฟฟ้าที่ไบแอสกลับซึ่งมีขนาดสูงสุด

ในการนำวาเรกเตอร์มาใช้งาน โดยทำหน้าที่ในการปรับจูนความถี่เรโซแนนซ์ ของวงจรออสซิลเลเตอร์โดยที่อัตราส่วนในการปรับจูนความถี่นั้นจะสัมพันธ์กับอัตราส่วนของการปรับจูนค่าความจุด้วยแรงดันไฟฟ้าที่ไบแอสกลับ ซึ่งแสดงได้สมการ

$$\frac{\omega_{max}}{\omega_{min}} = \sqrt{\frac{C_{max}}{C_{min}}} \tag{3.34}$$

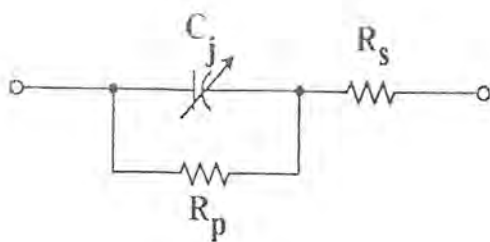
โดยที่

$\omega_{\max}$ เป็นค่าความถี่เชิงมุมของวงจรออสซิลเลเตอร์ต่ำที่สุดที่สภาวะเรโซแนนซ์
 $\omega_{\min}$ เป็นค่าความถี่เชิงมุมของวงจรออสซิลเลเตอร์สูงสุดที่สภาวะเรโซแนนซ์

คุณสมบัติของการปรับความถี่ที่เกิดขึ้นจากวงจรออสซิลเลเตอร์ พบว่าย่านในการปรับความถี่ที่แคบหรือกว้างจะขึ้นอยู่กับการเลือกใช้วาร์กเตอร์ไดโอดชนิดใด เช่น วาร์กเตอร์ไดโอดชนิด Silicon – Abrupt มีย่านในการปรับความถี่กว้างมีความไม่เป็นเชิงเส้นของการปรับระหว่างแรงดันควบคุมกับความถี่ของวงจรออสซิลเลเตอร์ และเส้นโค้งของแรงดันควบคุมกับความถี่ของวงจรออสซิลเลเตอร์มีคุณสมบัติเป็น monotonic tuning ส่วนวาร์กเตอร์ไดโอดชนิด Silicon Hyperabrupt มีย่านในการปรับความถี่แคบ มีความเป็นเชิงเส้นของการปรับระหว่างแรงดันควบคุมกับความถี่ของวงจรออสซิลเลเตอร์

3.6 ค่าตัวประกอบคุณภาพของวาร์กเตอร์ไดโอด

วงจรปรับความถี่ที่ใช้อุปกรณ์ปรับทางแมคคานิกที่นั้นมีค่าตัวประกอบคุณภาพที่สูงมาก แต่อาจจำกัดด้วยความยุ่งยากในการออกแบบ พื้นที่ในการติดตั้ง การบำรุงรักษา จากข้อจำกัดข้างต้น จึงมีการนำอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำมาใช้แทนตัวอุปกรณ์ปรับทางแมคคานิก เช่น วาร์กเตอร์ไดโอด ข้อจำกัดบางประการที่เกิดขึ้นเมื่อนำวาร์กเตอร์ไดโอดมาใช้เป็นอุปกรณ์ปรับความถี่ คือ ตัวประกอบคุณภาพของวาร์กเตอร์ไดโอดนั้นไม่คงที่โดยขึ้นอยู่กับการขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ไบแอสกลับ และความถี่ขณะที่ทำการปรับเพราะค่าพารามิเตอร์บางค่าของสมมูลย์ดังภาพที่ 3-13 นั้นเป็นตัวแปรในการกำหนดค่าตัวประกอบคุณภาพของวาร์กเตอร์ไดโอดลดลง เนื่องจาก Series bulk resistance ของซิลิกอนซึ่งเป็นสารที่ใช้ทำวาร์กเตอร์ไดโอด เมื่อความถี่ลดลงจะทำให้ค่าตัวประกอบคุณภาพของวาร์กเตอร์ไดโอดลดลงเนื่องจาก back resistance ขณะที่วาร์กเตอร์ไดโอดได้รับแรงดันไฟฟ้า ไบแอสกลับ



ภาพที่ 3-13 วงจรสมมูลย์ของวาแรกเตอร์ไดโอด

โดยที่

R_p = Parallel resistance or back resistance of the diode

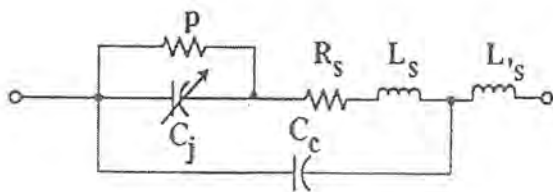
R_s = Bulk resistance of the Silicon in the diode

L'_s = External lead inductance

L_s = Internal lead inductance

C_c = Case capacitance

จากวงจรสมมูลย์ดังภาพที่ 3-14 ถ้าเราตัดค่าอินดักเตนซ์เนื่องจากขาของวาแรกเตอร์ไดโอด และค่าความจุเนื่องจากตัวถังทิ้ง ทำให้วงจรสมมูลย์อยู่ในรูปที่ง่ายดังภาพที่ 3.14

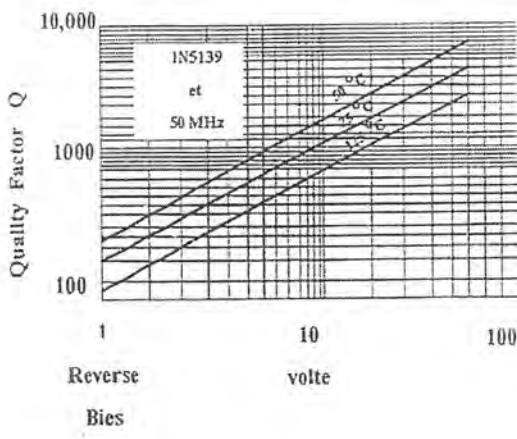


ภาพที่ 3-14 วงจรสมมูลย์อย่างง่ายของวาแรกเตอร์ไดโอด

ค่าตัวประกอบคุณภาพของวาเรกเตอร์ไดโอด จากวงจรสมมูลย้ดงภาพที่ 3-14 ซึ่งแสดงได้ดงสมการ

$$Q = \frac{2 \pi f c R_p^2}{R_s + R_p + (2 \pi f c)^2 R_s R_p^2} \tag{3.35}$$

จากสมการที่ (3.35) นั้นค่อนข้างมีความซับซ้อนเมื่อนำมาพล็อตดงภาพที่ 3-14 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบคุณภาพของวาเรกเตอร์ไดโอดกับความถี่



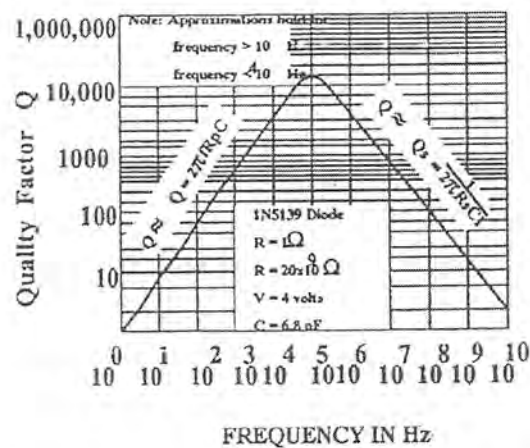
ภาพที่ 3-15 กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบคุณภาพของวาเรกเตอร์ไดโอดกับความถี่

$$Q \approx Q_s = \frac{1}{2 \pi f c R_s^2} \quad (\text{High Frequency } Q) \tag{3.36}$$

จากสมการที่ (3.35) เมื่อความถี่ขณะปรับจูนเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าตัวประกอบคุณภาพของวาเรกเตอร์ไดโอดลดลงเนื่องจากค่าความต้านทาน Series bulk resistance ซึ่งแสดงได้ดงสมการ

$$Q \approx Q_s = 2 \pi f c R_p \quad (\text{Low Frequency } Q) \tag{3.37}$$

นอกจากนี้ยังพบว่าตัวประกอบคุณภาพของวาแรกเตอร์ไดโอดนั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันที่ไบแอสกลับ และอุณหภูมิขณะใช้งาน การไบแอสกลับด้วยแรงดันขนาดใหญ่ให้กับวาแรกเตอร์ไดโอดเป็นผลทำให้ค่าความจุบริเวณรอยต่อและค่าความต้านทาน R_s ลดลงในลักษณะที่คล้ายคลึงกันเมื่อทำการไบแอสกลับด้วยแรงดันที่ขนาดเล็กให้กับวาแรกเตอร์ไดโอดเป็นผลทำให้ค่าความจุบริเวณรอยต่อเพิ่มขึ้น โดยแสดงความสัมพันธ์ดังภาพที่ 3-16



ภาพที่ 3-16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบคุณภาพของวาแรกเตอร์ไดโอด กับขนาดของแรงดันไบแอสกลับที่อุณหภูมิต่างกัน

บทที่ 4

ไมโครสตริปและวงจรไมโครสตริป

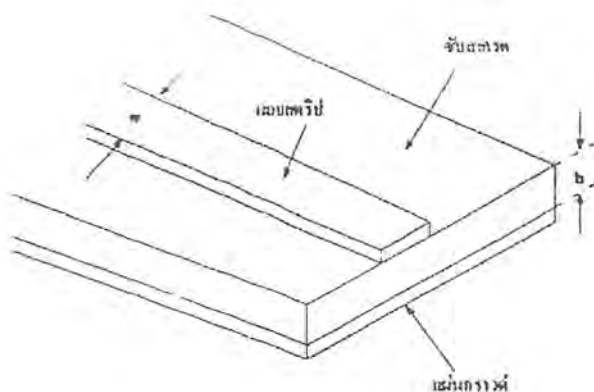
ไมโครสตริปเป็นสายนำสัญญาณที่สร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ และใช้ในการเชื่อมโยงชิ้นส่วนวงจรส่วนต่าง ๆ ของวงจรไมโครเวฟ เนื่องจากไมโครสตริปมีขนาดเล็กจึงเหมาะสำหรับทำวงจรรวมของไมโครเวฟ (Microwave Integrated Circuit ย่อว่า MIC) แต่มีข้อจำกัดที่สามารถรับกำลังได้ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับท่อนำคลื่น นอกจากนั้นยังมีค่าการลดทอนสัญญาณค่อนข้างสูงด้วย ดังนั้นจึงใช้ในการส่งผ่านและการจัดการกับสัญญาณที่มีระดับต่ำและในบริเวณจำกัด เช่น ภายในแผ่นวงจรพิมพ์ อันเดียวกันเป็นต้น ในบทนี้จะกล่าวถึงแนวคิดในการวิเคราะห์คุณสมบัติของไมโครสตริป การออกแบบไมโครสตริป ชิ้นส่วนวงจรไมโครสตริปแบบต่าง ๆ และตัววงจรไมโครสตริปที่มีที่ใช้กว้างขวางในทางปฏิบัติ

4.1 โครงสร้างและคุณสมบัติของไมโครสตริป

โครงสร้างและวิธีวิเคราะห์คุณสมบัติของไมโครสตริป และตัวอย่างการออกแบบไมโครสตริปให้มีอิมพีแดนซ์ลักษณะสมบัติตามที่ต้องการ

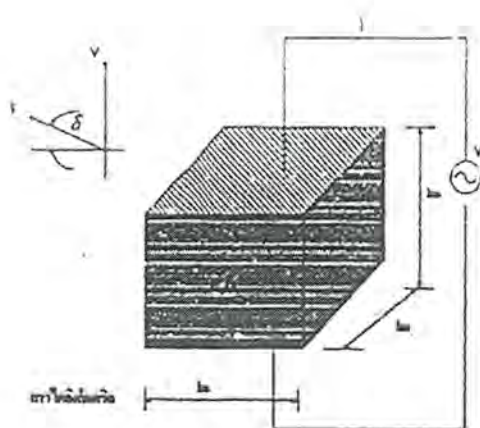
4.2 โครงสร้างของไมโครสตริป

ไมโครสตริปที่ใช้งานอยู่โดยทั่วไปนั้นจะมีโครงสร้างดังที่แสดงไว้ในภาพที่ 4-1 กล่าวคือ จะมีรูปร่างเป็นสตริปหรือแถบโลหะแคบ ๆ อยู่บนฉนวน (substrate) ซึ่งเป็นสารไดอิเล็กตริก และด้านล่างของฉนวนเป็นผิวโลหะ พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่งผ่านอยู่ในฉนวนบริเวณที่อยู่ระหว่างแถบโลหะแคบ ๆ กับผิวโลหะด้านล่าง ความหนาของฉนวนนั้นประมาณ 2 mm หรือต่ำกว่าลงมา ความกว้างของสตริปนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ลักษณะสมบัติที่ต้องการซึ่งกล่าวถึงในข้อการส่งของคลื่นในไมโครสตริปต่อไป



ภาพที่ 4-1 โครงสร้างของไมโครสตริป

สำหรับความหนาของตัวสตรอปเองนั้นจะมีค่าประมาณ 5 mm หรือ 10 mm ขึ้นอยู่กับการเทคโนโลยีแบบฟิล์มบาง หรือแบบฟิล์มหนาในการสร้างสตริปนั้น สำหรับข้อเสียดังที่ได้แก่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพันธ์ ค่า $\tan \delta$ ที่ความถี่ 10 GHz ค่าคงตัวของการนำความร้อน (thermal conductivity) ความขรุขระของผิว และความสามารถในการทนต่อแรงดันไฟฟ้า (direction strength) ความหมายของคุณสมบัติที่กล่าวมาจะเป็นดังนี้คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพันธ์จะแบ่งบอกคุณสมบัติของการเป็นสารไดอิเล็กตริกโดยเทียบกับอวกาศว่าง ค่านี้จะส่งผลทำให้มีพีแดนซ์ลักษณะสมบัติของการไมโครสตริปเปลี่ยนแปลงค่า $\tan \delta$ นั่นคือค่าที่แสดงอัตราส่วนระหว่างกระแสการนำกับกระแสดิสเพลซเมนต์ เมื่อนำสารไดอิเล็กตริกนั้นไปคั่นระหว่างแผ่นโลหะคู่หนึ่งซึ่งทำหน้าที่เป็นคาปาซิเตอร์ดังแสดงในภาพที่ 4.2 เมื่อเขียน $\epsilon = \epsilon' - j\sigma/\omega$ ค่า $\tan \delta$ ก็จะเท่ากับ $\sigma/\omega\epsilon'$ ซึ่งค่าก็แสดงให้รู้ว่าสารไดอิเล็กตริกนั้นมีการสูญเสียเนื่องจากการนำกระแสเล็กน้อยเพียงใดโดยที่ค่าก็ยังคงดี



ภาพที่ 4-2 การคิดค่า $\tan \delta$

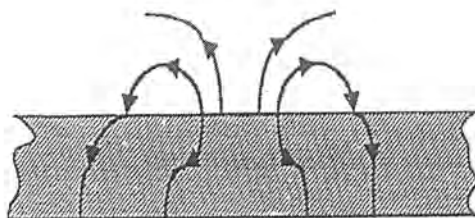
ค่าคงตัวของการนำความร้อนนั้นแสดงให้เห็นว่าสาร ไดอิเล็กทริกนั้นจะมีความสามารถในการระบบความร้อนได้ดีมากน้อยเพียงใด ค่ายิ่งสูงยิ่งดี ความขรุขระของผิวนั้นจัดว่ามีความสำคัญมาก เช่นเดียวกัน เพราะถ้าผิวขรุขระเกิดไปก็จะทำให้การใช้เทคโนโลยีแบบฟิล์มบางทำได้ลำบาก นอกจากนั้นก็จะมผลกระทบต่อ การส่งผ่านของคลื่นไปตามไมโครสตริปด้วย เพราะฉะนั้นความขรุขระน้อยจะดีกว่า สำหรับความสามารถในการทนต่อแรงดันไฟฟ้านั้นจะบ่งถึงความสามารถในการรับกำลังคลื่นด้วย ดังนั้นค่าสูงจะดีกว่าค่าต่ำ

เมื่อพิจารณาคูณสมบัติของชั้นสเตรตแบบต่าง ๆ จะเห็นได้ว่า ชั้นสเตรตแบบอลูมินามีคุณสมบัติในหลาย ๆ ข้อถึงแม้จะมีความขรุขระไม่ต่ำมากนัก ดังนั้นอลูมินาจึงเป็นชั้นสเตรตที่นิยมใช้กันมาก สำหรับ GaAs นั้นจะใช้ในกรณีที่ทำวงจรรวมไมโครเวฟเป็นหลักเนื่องจาก GaAs เป็นชั้น สเตรตที่ใช้ทำชิ้นส่วนแอคทีฟสารกึ่งตัวนำแบบต่างๆ ในย่านไมโครเวฟได้ดี

4.3 การส่งผ่านคลื่นในไมโครสตริป

ไมโครสตริปถึงแม้จะมีโครงสร้างง่าย ๆ ดังกล่าวข้างต้น แต่การวิเคราะห์คุณสมบัติของไมโครสตริปโดยละเอียดทางทฤษฎีนั้นเป็นสิ่งที่ยุ่งยากมาก ทั้งนี้เป็นเพราะระบบแกนประสานที่ใช้และเงื่อนไขขอบเขตของระบบค่อนข้างยุ่งยากเมื่อเทียบกับท่อนำคลื่นหรือสายนำสัญญาณชนิดอื่น ๆ อย่างไรก็ตาม ได้มีผู้ทำการศึกษาทางทฤษฎีและพบว่าคลื่นที่ส่งผ่านไปตาไมโครสตริปนั้นใกล้เคียงกับโหมด TEM มากแต่จะไม่ใช่โหมด TEM เสียหรือเดียว เพราะมีสนามในแนวแกนอยู่ด้วยจึงนิยมเรียก

โหมดดังกล่าวนี้ว่าโหมดกึ่ง TEM (quasi-TEM mode) ภาพที่ 4-3 แสดงเส้นแรงไฟฟ้าในระนาบตามขวางของไมโครสตริปการที่มีสนามในแนวแกนอยู่บ้างนั้นเป็นเพราะโครงสร้างที่มีสร้างไดอิเล็กตริกและอากาศอยู่ในระนาบเดียวกัน และในสภาพที่มีสนามในแนวแกนอยู่ในโหมดที่ส่งผ่านอยู่นั้นจะ



เป็นไฮบริดโหมด

ภาพที่ 4-3 เส้นแรงไฟฟ้าในระนาบตามขวางของไมโครสตริป

ทฤษฎีและหลักการการทำงานของวงจรกำเนิดสัญญาณลาดเอียง

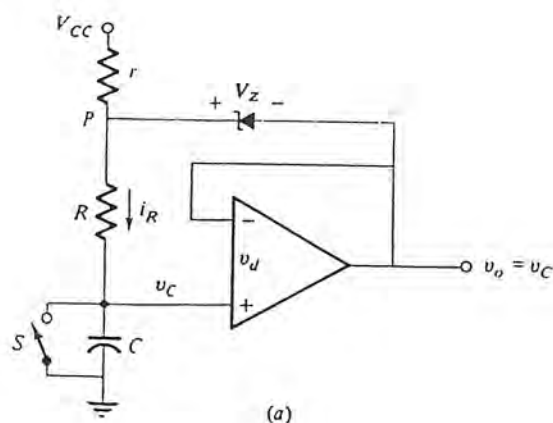
หลักการขั้นพื้นฐานของวงจรกำเนิดรูปคลื่นสัญญาณ โดยทั่วไปนั้นใช้วงจรขยายที่มีการป้อนกลับแบบบวก องค์ประกอบหลักคือวงจรขยายทำหน้าที่ขยายกำลังและโครงข่ายของวงจรป้อนกลับนั้นประกอบด้วย ตัวอุปกรณ์พาสซีฟ เช่นตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำทำหน้าที่ในการกำเนิดความถี่เรโซแนนซ์ นอกจากนี้ในการออกแบบจะต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขของการออสซิลเลต รูปคลื่นที่เกิดขึ้นอาจเป็นรูปคลื่น ไซน์ รูปคลื่นสี่เหลี่ยม รูปคลื่นสามเหลี่ยม รูปคลื่นสัญญาณลาดเอียง โดยหลักการที่ใช้ในการออกแบบมีทั้งเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น ในที่นี้จะขอกล่าวเฉพาะพื้นฐานและหลักการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณลาดเอียง

ชนิดของวงจรกำเนิดสัญญาณลาดเอียง

1. วงจร Bootstrap sweep generator
2. วงจรประจุด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่

5.1 วงจรกำเนิดสัญญาณกวาดแบบบูตสเตรป

วงจรกำเนิดรูปคลื่นสัญญาณลาดแบบ bootstrap sweep generator ถูกแสดงดังภาพที่ 5-1 เป็นวงจรกำเนิดรูปคลื่นแรงดันที่มีความชันเป็นเชิงเส้น โดยที่เอาท์พุทของออปแอมป์ต่อโดยตรงกับขั้วอินพุทแบบกลับขั้วของออปแอมป์ การป้อนกลับเป็นเหตุให้กราวด์เสมือน(virtual ground)ถัดวงจรระหว่างขั้วอินพุททั้งสองของออปแอมป์



ภาพที่ 5-1 วงจรกำเนิดสัญญาณลาดแบบ Bootstrap sweep generator

จาก $v_d \cong 0$ เราจะได้ $v_o = v_c$ ดังนั้นแรงดันที่ตกคร่อมจุด P เทียบกราวดีคือ

$$V_p = V_z + v_o = V_z + v_c \quad (1.1)$$

$$\text{แรงดันที่ตกคร่อมซีเนอร์ไดโอด } V_z = v_p + v_c \quad (1.2)$$

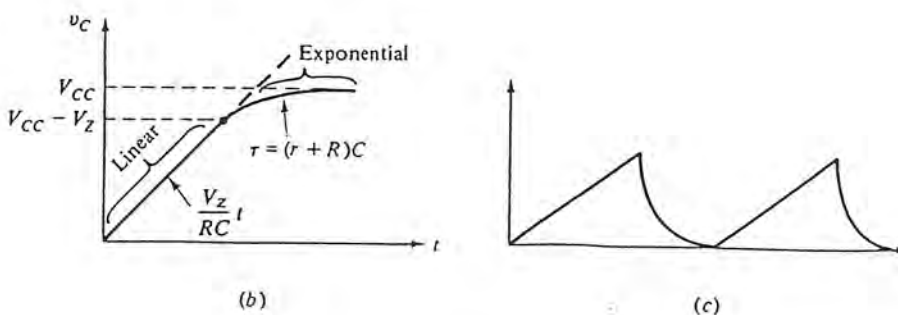
ถ้า ซีเนอร์ไดโอดทำงานภายใต้ในย่านการทำงานที่คงค่าแรงดัน V_z ผลคือ

$$iR = (v_p - v_c)/R = \text{constant} \quad (1.3)$$

กระแสที่คงที่นั้นไหลผ่านสวิทช์เมื่อสวิทช์เปิด และเมื่อ สวิทช์ถูกเปิดออก กระแสจะไหลผ่านตัวเก็บประจุ เป็นเหตุให้ตัวเก็บประจุ เก็บประจุในรูปกระแสที่คงที่ ผลคือ แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุจะเป็นเชิงเส้นดังสมการ

$$v_c = 1/c \int V_z/R \, dt = V_z t / R c \quad (1.4)$$

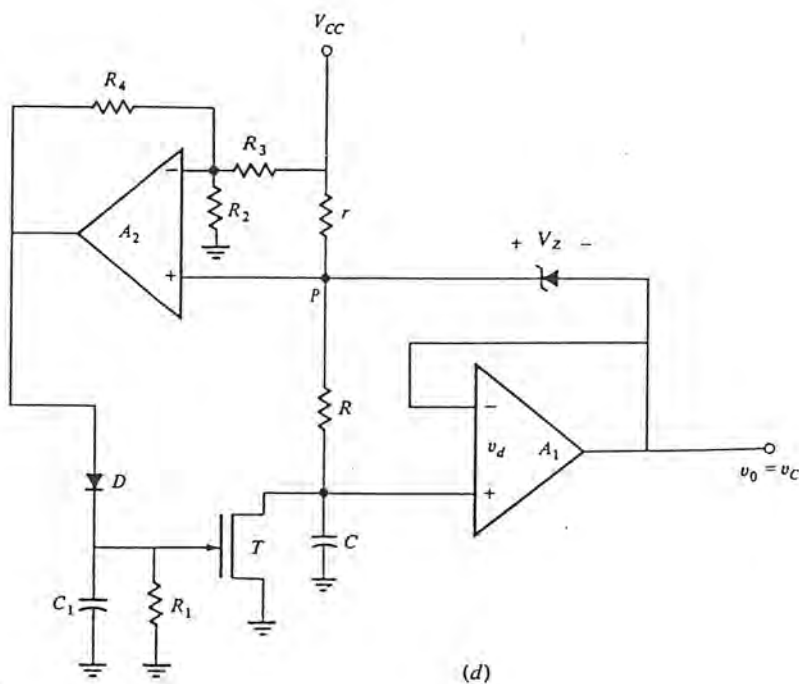
ตัวเก็บประจุจะเก็บประจุในรูปของกระแสอย่างต่อเนื่อง เป็นเชิงเส้นจนกระทั่ง $v_c = V_{cc} - V_z$ ถ้าแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้นเกินค่า V_z จะทำให้ ซีเนอร์ไดโอด ๔กเปิดวงจร ดังนั้น ออฟแอมป์ จึงมีคุณสมบัติเป็นวงจรตามแรงดัน (voltage follower) ในช่วงเวลานี้ตัวเก็บประจุทำการอัดประจุอย่างต่อเนื่องจนถึงค่า V_{cc} แต่รูปคลื่นจะเป็นอีกโบนีเซียลซึ่งค่าเวลากงตัว (time constant) $\tau = (r+R)c$ ดังภาพที่ 5-2



ภาพที่ 5-2 single – sweep waveform

การอัดประจุขอตัวเก็บจะได้แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุที่เป็นเชิงเส้นโดยใช้หลักการทำงานในโหมดของอะสเตเบิล (astable mode) เมื่อแรงดันเอาท์พุทเพิ่มขึ้นจนถึงค่าแรงดัน V_p โดยที่ออฟแอมป์ A_2 นั้นจัดไปแอสวงจรเปรียบเทียบกับแรงดันโดยมีแรงดันอ้างอิงที่ตั้งค่าไว้แล้วคือ V^*p

จะทำให้แรงดันที่เอาต์พุตเป็นบวกทำให้ ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า เมื่อตัวเก็บประจุคายประจุจะทำให้แรงดันตกคร่อมตัวมันลดลง น้อยกว่าแรงดัน V_{tp} จะทำให้แรงดันเอาต์พุต A_2 เป็นลบ เป็นผลทำให้ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าถูกเปิดวงจรออก ตัวเก็บประจุ C ก็จะอัดประจุเพิ่มขึ้นซึ่งแสดงดังภาพที่ 5-3



ภาพที่ 5-3 วงจรกำเนิดสัญญาณลาดเอียงซึ่งทำงานในโหมดอะสเตบิล

จากวงจรในรูปที่ 1.3 นั้นเป็นหลักการพื้นฐานของวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นลาดเอียงในโหมดอะสเตบิล โดยใช้ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าเป็นสวิทช์ควบคุมการอัดประจุ และคายประจุ และความถี่ในการกวาดของรูปคลื่นจะขึ้นอยู่กับตัวอุปกรณ์ เช่น ตัวต้านทาน R ตัวเก็บประจุ C จากหลักการพื้นฐานที่กล่าวมาข้างต้น โดยใช้ออฟแอมป์เป็นวงจรเปรียบเทียบแรงดันตรวจจับระดับแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุว่ามีระดับแรงดันมากหรือน้อยกว่าแรงดันอ้างอิง แรงดันเอาต์พุตที่มีสองสถานะคือ แรงดันบวกกับแรงดันลบใช้ควบคุมการปิดหรือเปิดวงจรให้กับทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า ผลที่ตามมาคือการปิดหรือการเปิดทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าใช้ควบคุมการคายประจุหรืออัดประจุของตัวเก็บประจุ จากหลักการพื้นฐานนี้เองจึงทำให้มีแนวทางการออกแบบอย่างอื่นอีกหลายวิธีเกิดขึ้น ข้อจำกัดของวงจรที่กล่าวมาข้างต้นคือจะต้องให้แหล่งจ่ายไฟบวก ลบ ให้กับออฟแอมป์ ซึ่งมีค่อนข้างยุ่งยากและมีความซับซ้อน

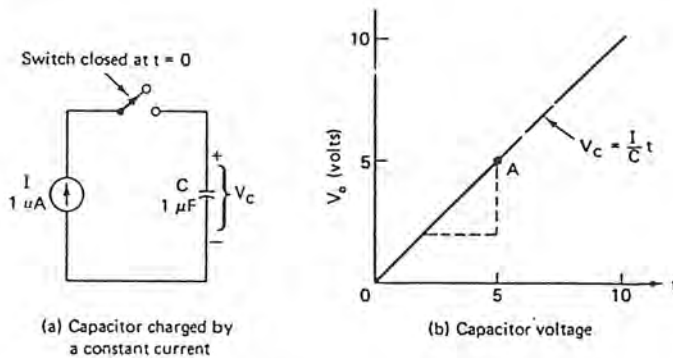
ดังนั้นในการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณลาด เราจะต้องพิจารณาว่าทำใช้กับงานชนิดใด โดยที่วงจรที่ออกแบบนั้นมีผลต่อการใช้งานน้อยที่สุด ใช้ตัวอุปกรณ์น้อยที่สุด แนวคิดในการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณลาดคือ ใช้หลักการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่ที่จะ

ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุเป็นเชิงเส้น พร้อมตัวอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ควบคุมการอัดหรือการคายประจุในโหมดของอะสแตเบิล

5.2 วงจรกำเนิดรูปคลื่นด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่

จากทฤษฎีขั้นพื้นฐาน เมื่อทำการประจุให้กับตัวเก็บประจุด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ ดัง ภาพที่ 5-4 จะได้แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุเป็นเชิงเส้นกับเวลา ซึ่งมีความสัมพันธ์ ดังสมการ

$$dQ = Idt \quad (1.5)$$



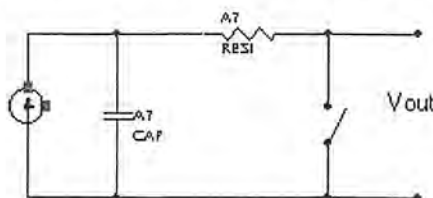
ภาพที่ 5-4 แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุเป็นเชิงเส้นเมื่อทำการอัดประจุด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับค่าประจุและค่าความจุ

$$Q = CVc \quad (1.6)$$

แทนสมการที่ (1.6) ลงในสมการที่ (1.5) จัดสมการใหม่จะได้

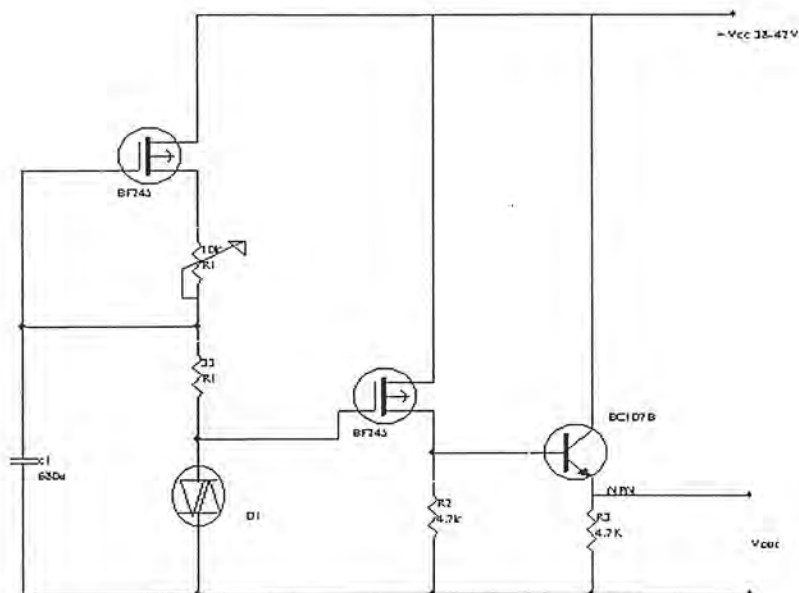
$$Vc = I/C \int_0^t dt \quad (1.7)$$

การออกแบบวงจรกำเนิดรูปคลื่นสัญญาณลดในที่นี่จะใช้หลักการพื้นฐาน ดังภาพที่ 5-5



ภาพที่ 5-5 หลักการพื้นฐานของวงจรกำเนิดรูปคลื่นอย่างง่าย

จากภาพที่ 5-5 ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดกระแสคงที่ I อัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ C เป็นเชิงเส้น ส่วนสวิทช์ SW นั้นควบคุมการอัดประจุและคายประจุ ขณะที่ SW เปิดตัวเก็บประจุด้วยแหล่งจ่ายกระแส เมื่อ SW ตัวเก็บประจุ C จะจ่ายประจุผ่านตัวต้านทาน R จากหลักการพื้นฐานข้างต้นใช้เป็นแนวทางในการออกแบบวงจร ดังภาพที่ 5-6 นั้นประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแสโดยใช้ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า T_1 อัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ C_1 จะทำให้แรงดันเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้น จนถึงจุดหนึ่งไดโอด D_1 จะนำกระแส ตัวไดโอด เทียบกับสวิทช์ปิดวงจรเป็นผลทำให้ ตัวเก็บประจุ C_1 คายประจุผ่าน ตัวต้านทาน R_1 กับไดโอด D_1



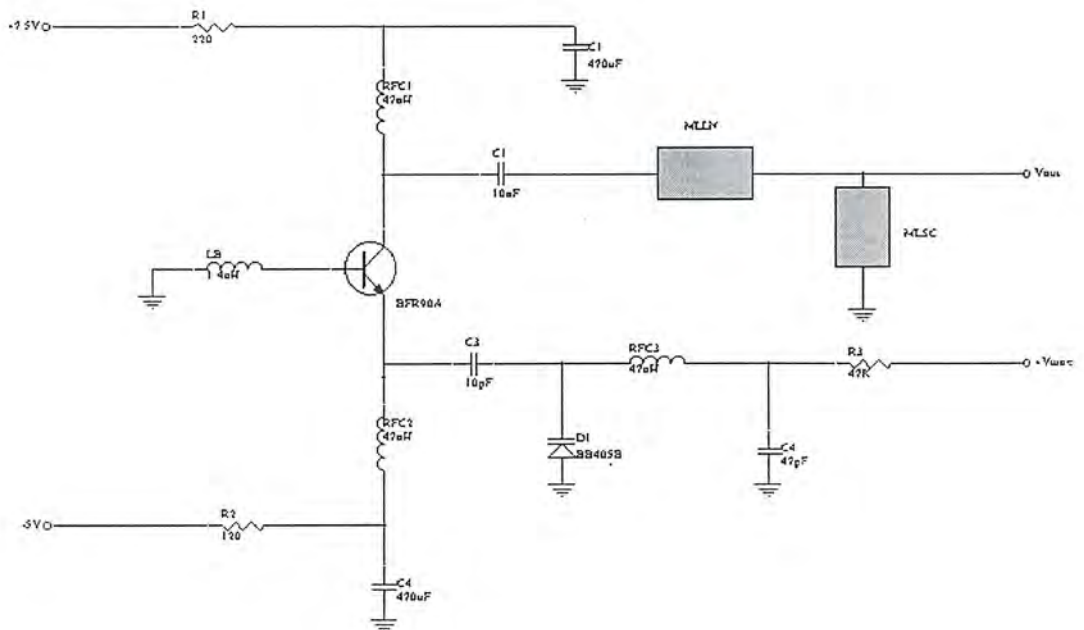
ภาพที่ 5-6 วงจรกำเนิดรูปคลื่นสัญญาณลาดเอียง

จากวงจรดังรูปที่ 1.6 ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า T_1 ถูกอัดไบแอสแบบคอมมอนเดรนทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสคงที่ ตัวต้านทานปรับค่าได้ P_1 ทำหน้าที่ในการควบคุมปริมาณกระแสที่จะประจุให้กับตัวเก็บประจุ C_1 และทำหน้าที่ในการกำหนดความถี่ของการกวาดรูปคลื่นส่วนไดโอด D_1 ทำหน้าที่เป็นสวิทช์ปิดเปิดควบคุมการอัดประจุและคายประจุให้กับตัวเก็บประจุ C_1 ตัวต้านทาน R_1 เป็นโหลดให้กับตัวเก็บประจุ C_1 ในขณะที่ตัวเก็บประจุ C_1 คายประจุผ่าน R_1 และ D_1 ภาคต่อไปคือวงจรบัฟเฟอร์ มีเกรนขยายแรงดันหนึ่งเท่าวงจรบัฟเฟอร์มีเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ต่ำมาก เหมาะที่จะนำไปใช้งาน รูปคลื่นมีเสถียรภาพ

บทที่ 6

ผลการทดลอง

6.1 วงจรการทดลอง



ภาพที่ 6-1 วงจรออสซิลเลตในการใช้งานจริง

6.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการต่อวงจรจริง

Q2 = MRF2369

$$L_b = 1.4 \text{ nH}$$

D1 = BB105

RFC1 = 47 nH

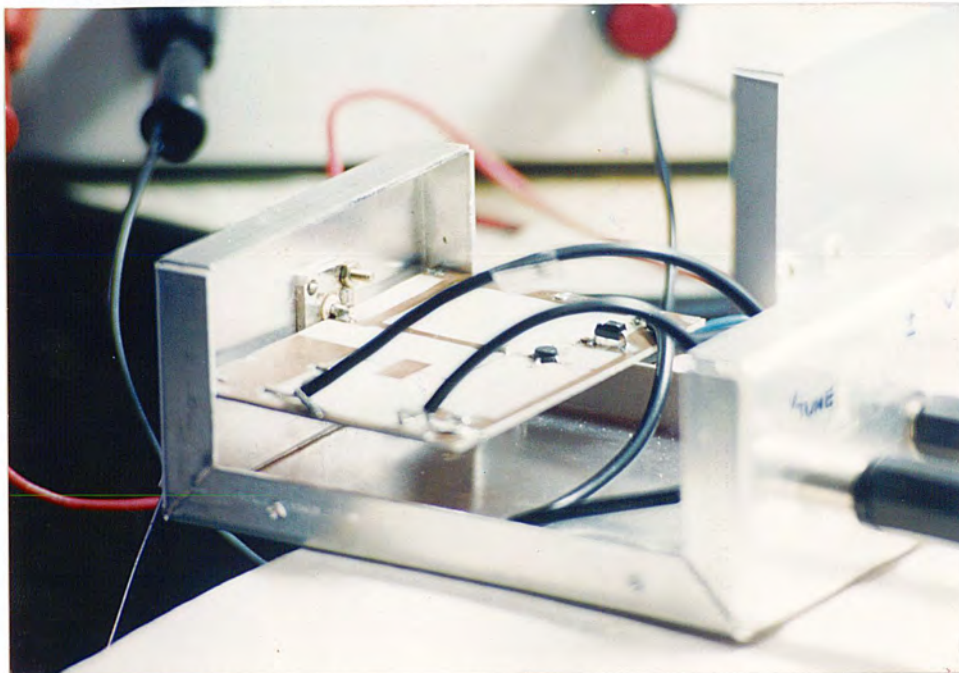
 $R_1, R_2 = 120 \text{ K}$

RFC2 = 47 nH

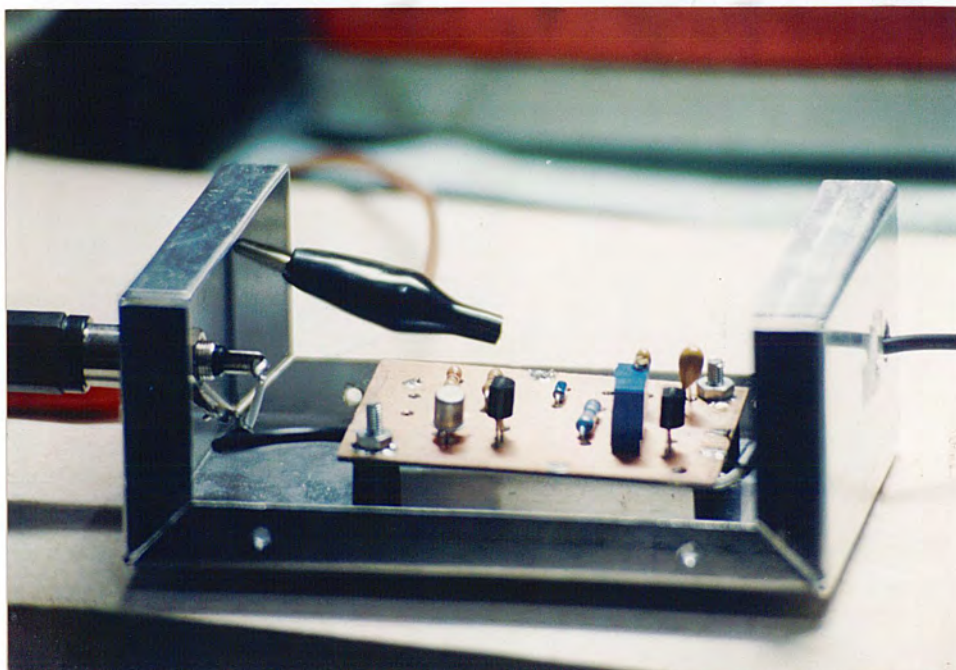
$$C1, C2, C3, C4 = 470 \text{ pF}$$

RFC3 = 47 nH

6.3 วงจร Oscillator และวงจร Sweep Generator



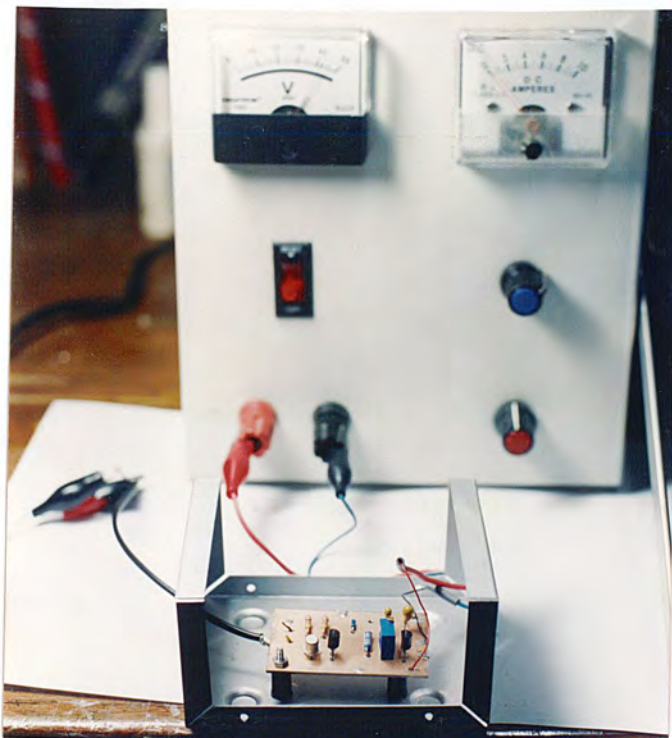
ภาพที่ 6-2 วงจร Oscillator แบบปรับความถี่ด้วยแรงดัน ย่าน 1-3 GHz



ภาพที่ 6-3 รูปวงจร Sweep Generator

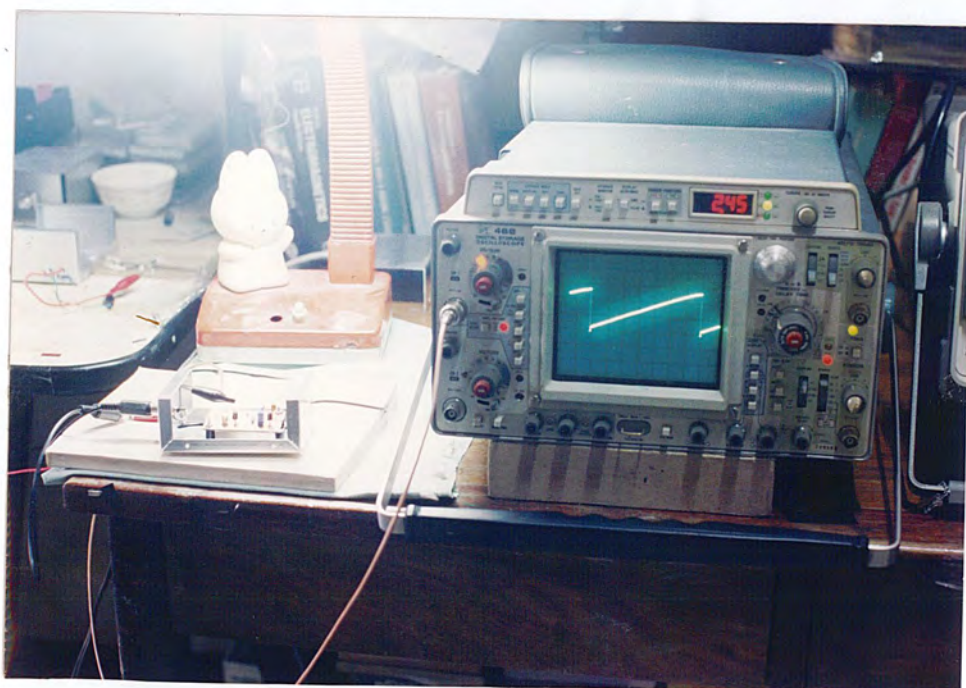
6.4 การทดลอง และผลการทดลองที่ได้

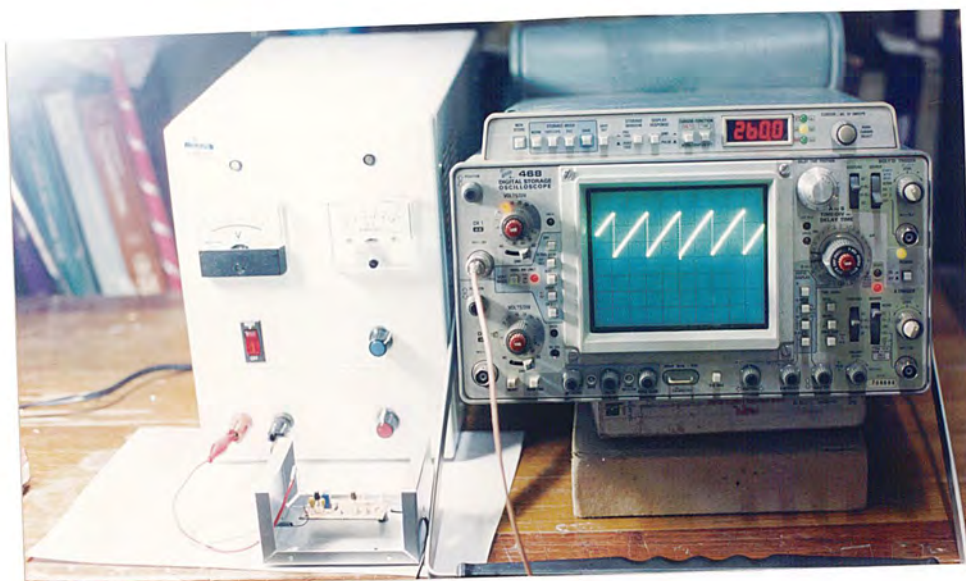
1. ต่อแหล่งจ่ายไฟ 41 Vdc ให้แก่ Sweep Generation ดังภาพที่ 6-4



ภาพที่ 6-4 การต่อ แรงดัน 41 Vdc ให้แก่ Sweep Generation

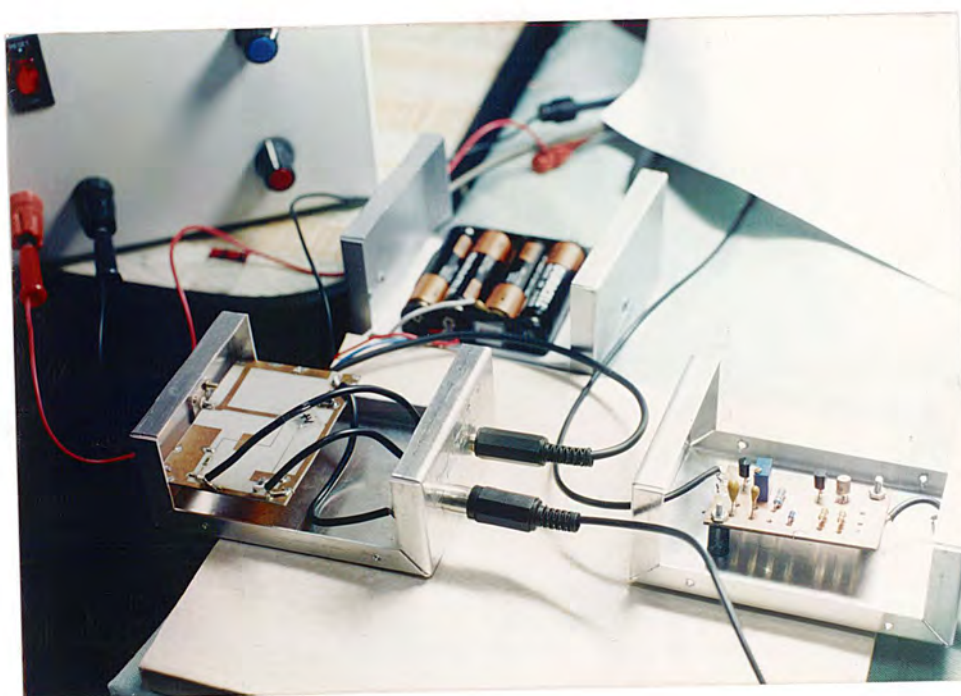
2. วัดสัญญาณ output ที่ได้จากวงจร ด้วย Oscilloscope





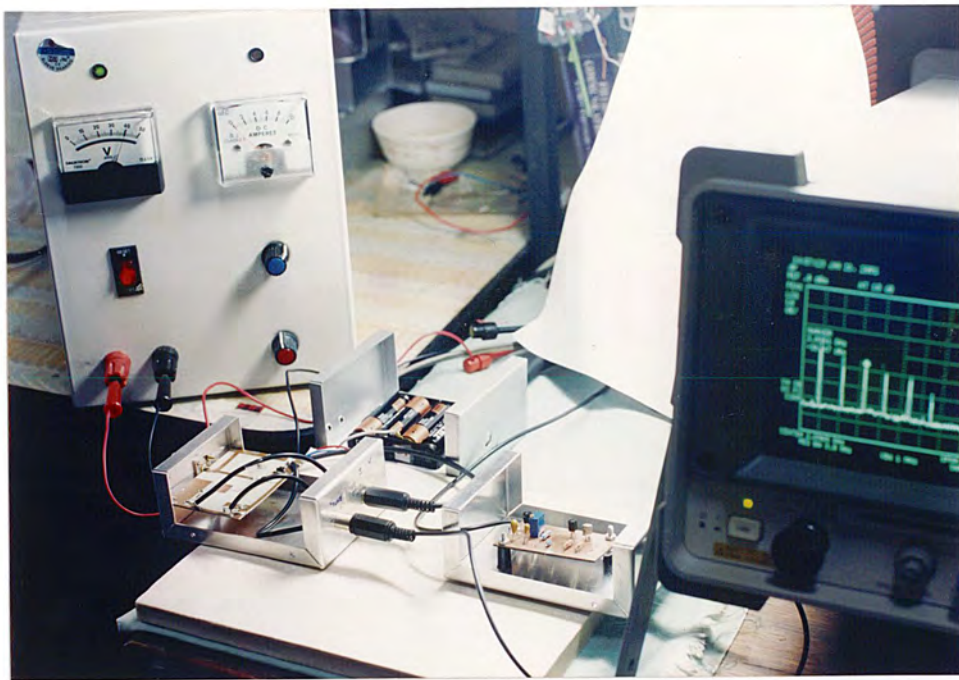
ภาพที่ 6-5 วัดสัญญาณที่ได้ ด้วย Oscilloscope

2. จ่ายแรงดัน $\pm 3V$ และต่อสัญญาณ output ที่ได้จาก Sweep Generator ที่ Tuner แก่ Oscillator

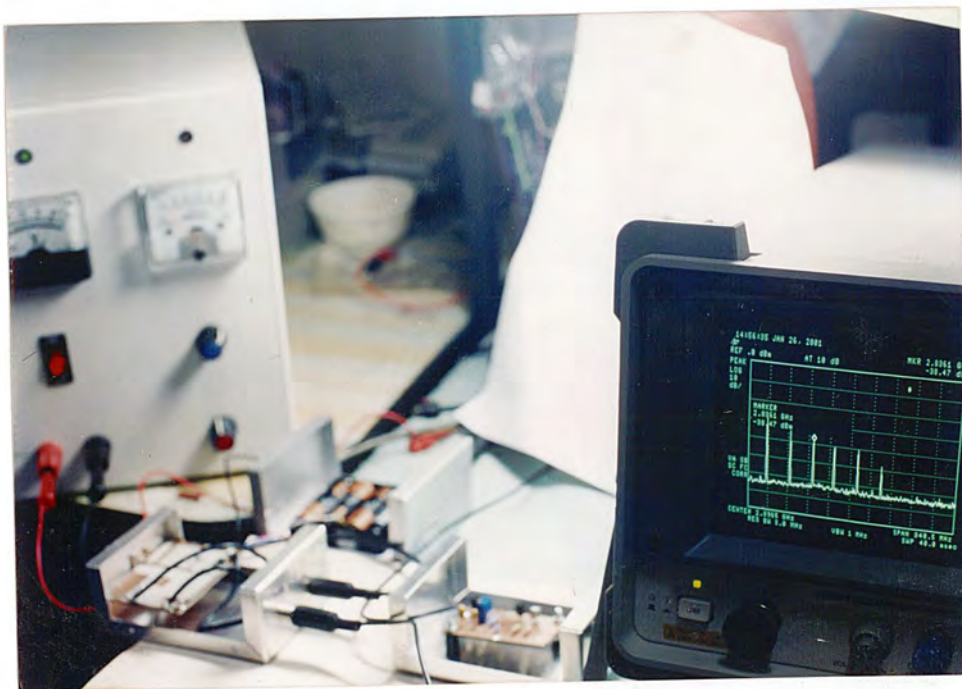


ภาพที่ 6-6 ต่อแหล่งจ่าย และสัญญาณ Tuner จาก Sweep Generator แก่ Oscillator

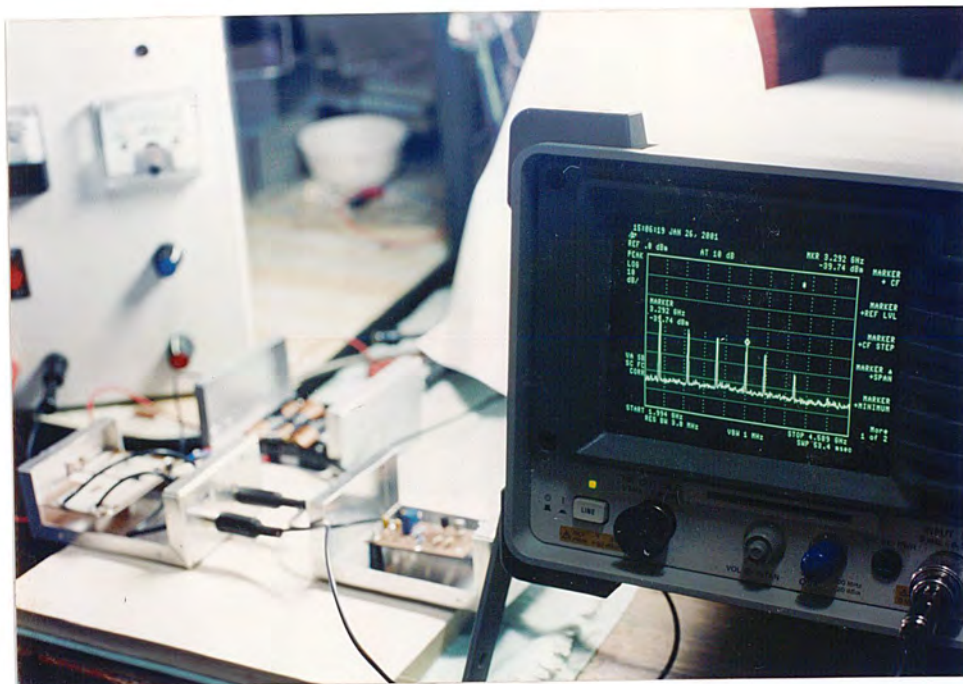
4. วัดสัญญาณ output ที่ได้จาก Oscillator ด้วย Spectrum Analyzer



ภาพที่ 6-7 การจับสัญญาณ Oscillator ด้วย Spectrum Analyzer

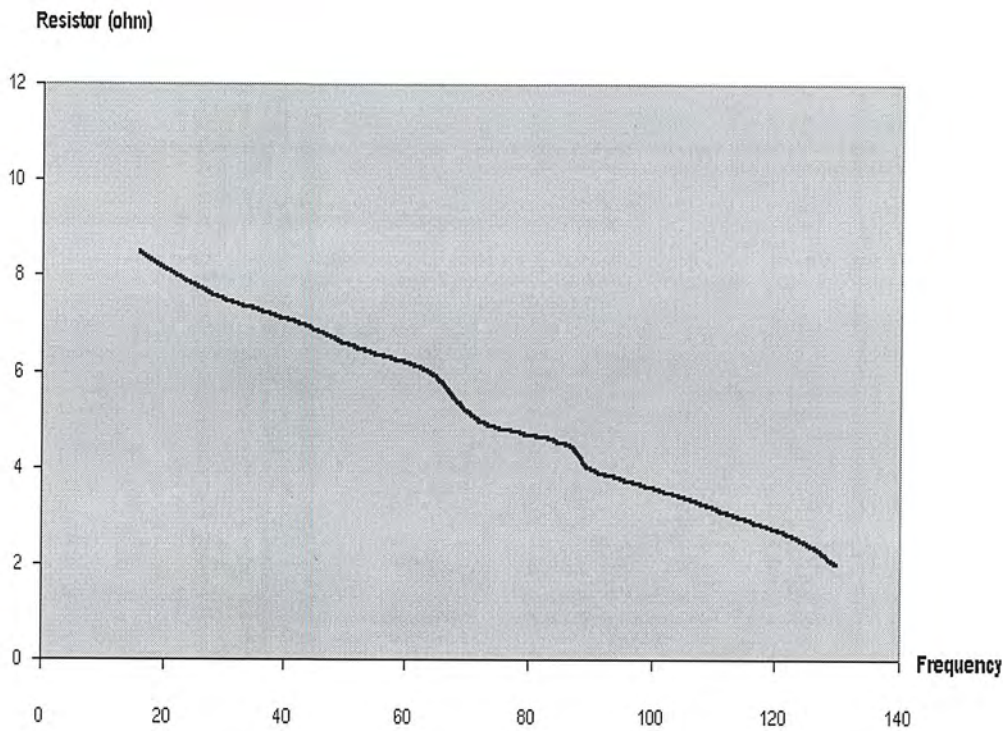


ภาพที่ 6-8 การจับสัญญาณ Oscillator ด้วย Spectrum Analyzer ในย่านความถี่ 2 GHz

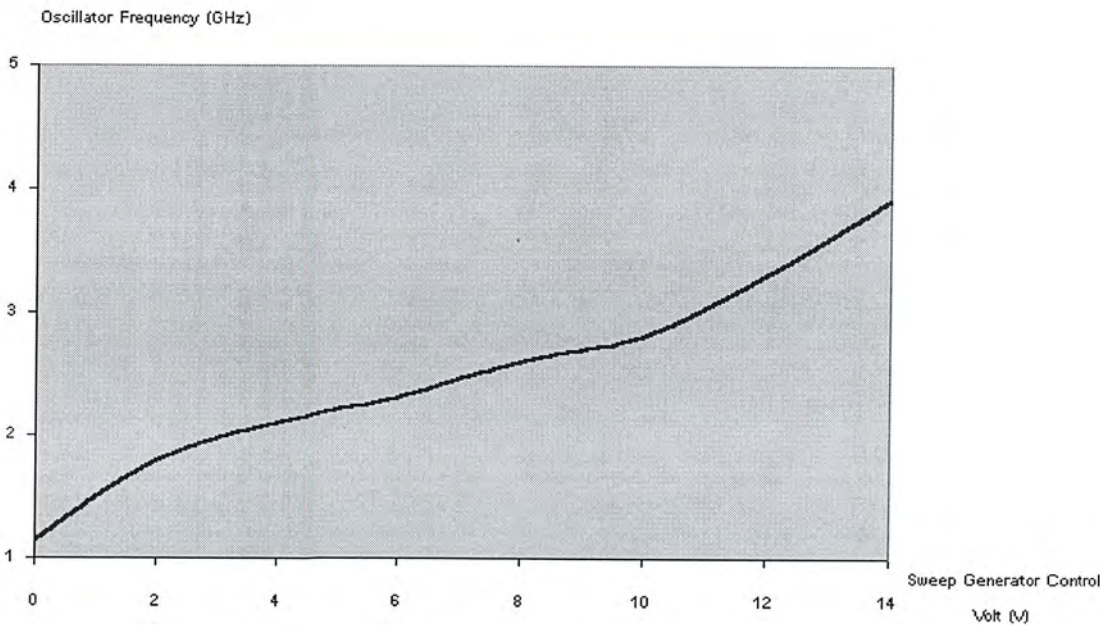


ภาพที่ 6-9 การจับสัญญาณ Oscillator ด้วย Spectrum Analyzer ในย่านความถี่ 3 GHz

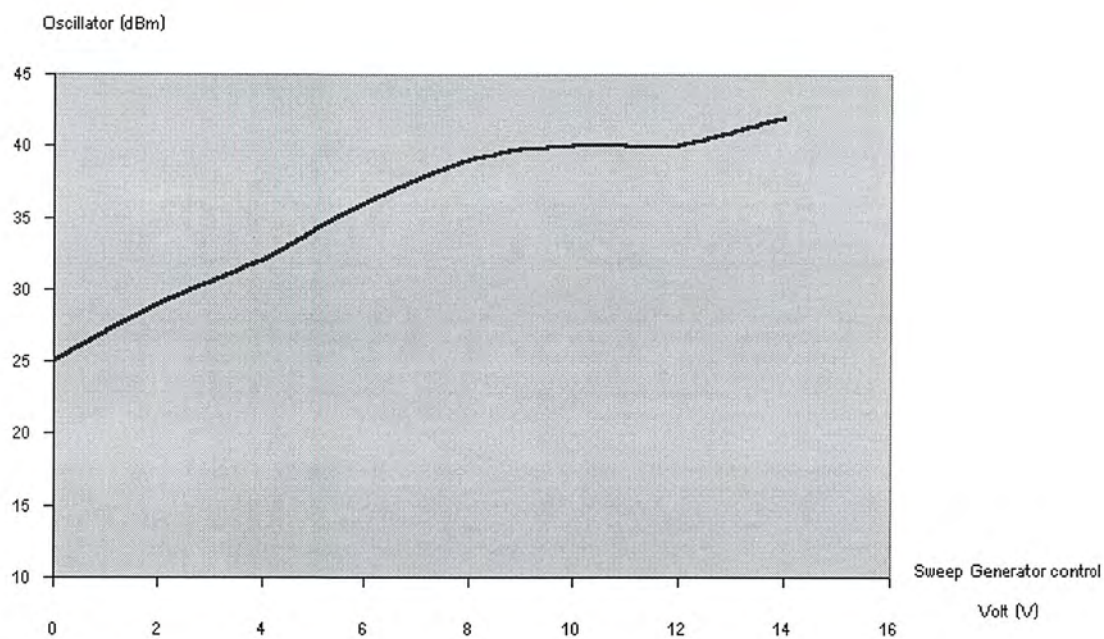
6.5 กราฟแสดงการทำงานของ Sweep Generator



ภาพที่ 6-10 กราฟแสดง ค่าความถี่ของวงจร Sweep Generator เมื่อ ปรับค่าความต้านทาน R1 เมื่อ C1 =4.7 μ F



ภาพที่ 6-11กราฟแสดง ความถี่ที่ได้จาก Oscillator เมื่อใช้งานร่วมกับ Sweep Generator



ภาพที่ 6-12 กราฟแสดงขนาดแรงดัน dBm จาก Oscillator เมื่อใช้งานร่วมกับ Sweep Generator

บทสรุป

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบเครื่องกำเนิดความถี่ที่สามารถปรับค่าความถี่ได้ใน ช่วงความถี่ตั้งแต่ 1GHz ถึง 3GHz โดยใช้การป้อนแรงดันในระดับต่างๆเพื่อกำหนดความถี่ในย่านต่างๆ ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้ จะเห็นความสำคัญของปัญหาคือการเลือกแผ่นปรีนลายวงจร ที่จำเป็นต้องให้ ค่าแอมพลิจูดตามทฤษฎีการออกแบบ และตัวประกอบคุณภาพของวาแรกเตอร์ไดโอดเมื่อนำมาใช้ ในวงจรกำเนิดความถี่สูง มีพารามิเตอร์ที่ไม่คงที่ตามทฤษฎีของวาแรกเตอร์ไดโอดดังที่ได้ แสดงไว้ข้างต้น แล้วแต่มีข้อดีคือมีขนาดเล็กใช้งานง่าย ไม่เหมือนกับอุปกรณ์ แมคคานิกส์ ทั่วไป จากการทดลอง เมื่อใช้ งานร่วมกับ Sweep Generator จะสามารถแสดง สัญญาณได้ ตั้งแต่ 1-3 GHz ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้

บรรณานุกรม

บัณฑิต ไรจน์อารยานนท์, "วิศวกรรมศาสตร์สายอากาศ" สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

J. Bahl and P. Bhartia, "Microstrip Antennas," Artech House Inc., Massachusetts, 1982

รศ. ชวลิต เบญจางคประเสริฐ, "Microwave Communication Systems" สถาบันเทคโนโลยี

พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

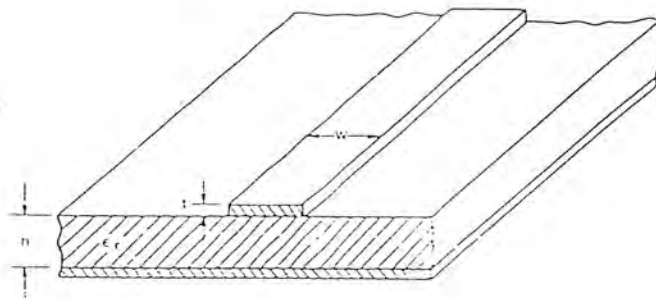
A.A.R. Townsed, "Digital Line of Sight radio Link A Test Manual", Prentice

Hall International, 1987

ภาคผนวก

Appendix A3

Microstrip Line Design Tables



$$Z_0 = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \ln \left\{ \frac{8h}{W} + 0.25 \frac{W}{h} \right\} & \frac{W}{h} \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \left\{ \frac{W}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{W}{h} + 1.444 \right) \right\}^{-1} & \frac{W}{h} \geq 1 \end{cases}$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{W} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

$$\epsilon_r = 2.22$$

W/H	ϵ_r'	Z_0	W/H	ϵ_r'	Z_0
0.0500	1.6530	236.6361	2.5500	1.8850	56.5952
0.1000	1.6707	203.2641	2.6000	1.8871	55.9037
0.1500	1.6842	183.7372	2.6500	1.8892	55.2291
0.2000	1.6954	169.9053	2.7000	1.8913	54.5709
0.2500	1.7053	159.2016	2.7500	1.8933	53.9284
0.3000	1.7141	150.4811	2.8000	1.8953	53.3011
0.3500	1.7222	143.1322	2.8500	1.8973	52.6884
0.4000	1.7296	136.7894	2.9000	1.8992	52.0899
0.4500	1.7366	131.2169	2.9500	1.9011	51.5051
0.5000	1.7431	126.2536	3.0000	1.9030	50.9336
0.5500	1.7493	121.7843	3.0500	1.9049	50.3748
0.6000	1.7551	117.7241	3.1000	1.9067	49.8284
0.6500	1.7607	114.0085	3.1500	1.9086	49.2941
0.7000	1.7660	110.5871	3.2000	1.9103	48.7713
0.7500	1.7711	107.4281	3.2500	1.9121	48.2597
0.8000	1.7760	104.4755	3.3000	1.9139	47.7591
0.8500	1.7807	101.7263	3.3500	1.9156	47.2690
0.9000	1.7853	99.1524	3.4000	1.9173	46.7891
0.9500	1.7897	96.7378	3.4500	1.9189	46.3192
1.0000	1.7939	94.4551	3.5000	1.9206	45.8509
1.0500	1.7980	92.2965	3.5500	1.9222	45.4079
1.1000	1.8020	89.9390	3.6000	1.9238	44.9660
1.1500	1.8059	87.9428	3.6500	1.9254	44.5328
1.2000	1.8097	86.0701	3.7000	1.9270	44.1082
1.2500	1.8133	84.3063	3.7500	1.9286	43.6919
1.3000	1.8167	82.6398	3.8000	1.9301	43.2837
1.3500	1.8204	81.0573	3.8500	1.9316	42.8833
1.4000	1.8239	79.5527	3.9000	1.9331	42.4904
1.4500	1.8271	78.1174	3.9500	1.9346	42.1050
1.5000	1.8303	76.7449	4.0000	1.9361	41.7268
1.5500	1.8335	75.4296	4.0500	1.9375	41.3555
1.6000	1.8365	74.1666	4.1000	1.9389	40.9911
1.6500	1.8396	72.9516	4.1500	1.9404	40.6332
1.7000	1.8425	71.7811	4.2000	1.9417	40.2818
1.7500	1.8454	70.6517	4.2500	1.9431	39.9367
1.8000	1.8482	69.5602	4.3000	1.9445	39.5976
1.8500	1.8510	68.5058	4.3500	1.9459	39.2645
1.9000	1.8537	67.4846	4.4000	1.9472	38.9372
1.9500	1.8564	66.4952	4.4500	1.9485	38.6155
2.0000	1.8590	65.5357	4.5000	1.9498	38.2993
2.0500	1.8616	64.6047	4.5500	1.9511	37.9885
2.1000	1.8641	63.7008	4.6000	1.9524	37.6829
2.1500	1.8666	62.8225	4.6500	1.9537	37.3823
2.2000	1.8690	61.9687	4.7000	1.9549	37.0867
2.2500	1.8714	61.1363	4.7500	1.9562	36.7960
2.3000	1.8738	60.3303	4.8000	1.9574	36.5099
2.3500	1.8761	59.5437	4.8500	1.9586	36.2285
2.4000	1.8784	58.7777	4.9000	1.9598	35.9516
2.4500	1.8806	58.0315	4.9500	1.9610	35.6790
2.5000	1.8828	57.3042	5.0000	1.9622	35.4107

$\epsilon_r = 2.55$

W/H	ϵ'	Z_0	W/H	ϵ'	Z_0
0.0500	1.8297	224.9446	2.5500	2.1243	53.3112
0.1000	1.8521	193.0526	2.6000	2.1270	52.6561
0.1500	1.8692	174.4049	2.6500	2.1297	52.0171
0.2000	1.8835	161.1981	2.7000	2.1323	51.3936
0.2500	1.8960	150.9804	2.7500	2.1349	50.7850
0.3000	1.9073	142.6577	2.8000	2.1375	50.1909
0.3500	1.9175	135.6458	2.8500	2.1400	49.6107
0.4000	1.9270	129.5953	2.9000	2.1425	49.0440
0.4500	1.9358	124.2810	2.9500	2.1449	48.4903
0.5000	1.9441	119.5487	3.0000	2.1473	47.9492
0.5500	1.9520	115.2885	3.0500	2.1497	47.4203
0.6000	1.9594	111.4192	3.1000	2.1520	46.9031
0.6500	1.9665	107.8790	3.1500	2.1543	46.3973
0.7000	1.9732	104.6189	3.2000	2.1566	45.9025
0.7500	1.9797	101.6037	3.2500	2.1588	45.4185
0.8000	1.9859	98.7999	3.3000	2.1610	44.9447
0.8500	1.9919	96.1833	3.3500	2.1632	44.4810
0.9000	1.9977	93.7329	3.4000	2.1654	44.0270
0.9500	2.0033	91.4313	3.4500	2.1676	43.5824
1.0000	2.0087	89.2632	3.5000	2.1698	43.1470
1.0500	2.0139	87.0020	3.5500	2.1717	42.7204
1.1000	2.0190	84.9697	3.6000	2.1737	42.3024
1.1500	2.0239	83.0718	3.6500	2.1758	41.8928
1.2000	2.0287	81.2916	3.7000	2.1778	41.4913
1.2500	2.0333	79.6148	3.7500	2.1797	41.0976
1.3000	2.0379	78.0301	3.8000	2.1817	40.7116
1.3500	2.0423	76.5370	3.8500	2.1836	40.3330
1.4000	2.0466	75.0973	3.9000	2.1855	39.9616
1.4500	2.0508	73.7336	3.9500	2.1874	39.5973
1.5000	2.0549	72.4297	4.0000	2.1893	39.2397
1.5500	2.0589	71.1802	4.0500	2.1911	38.8898
1.6000	2.0628	69.9806	4.1000	2.1929	38.5443
1.6500	2.0667	68.8268	4.1500	2.1947	38.2041
1.7000	2.0704	67.7154	4.2000	2.1965	37.8740
1.7500	2.0741	66.6432	4.2500	2.1982	37.5479
1.8000	2.0777	65.6076	4.3000	2.2000	37.2275
1.8500	2.0812	64.6063	4.3500	2.2017	36.9128
1.9000	2.0847	63.6371	4.4000	2.2034	36.6035
1.9500	2.0881	62.6982	4.4500	2.2051	36.2996
2.0000	2.0914	61.7880	4.5000	2.2067	36.0009
2.0500	2.0947	60.9048	4.5500	2.2084	35.7072
2.1000	2.0979	60.0473	4.6000	2.2100	35.4185
2.1500	2.1010	59.2143	4.6500	2.2116	35.1347
2.2000	2.1041	58.4047	4.7000	2.2132	34.8555
2.2500	2.1071	57.6173	4.7500	2.2148	34.5809
2.3000	2.1101	56.8513	4.8000	2.2164	34.3107
2.3500	2.1131	56.1056	4.8500	2.2179	34.0450
2.4000	2.1160	55.3796	4.9000	2.2194	33.7834
2.4500	2.1188	54.6723	4.9500	2.2209	33.5261
2.5000	2.1216	53.9831	5.0000	2.2224	33.2728

$\epsilon_r = 3.80$

W/H

 ϵ_r' Z_0

W/H

 ϵ_r' Z_0

0.0500	2.4987	192.4334
0.1000	2.5393	154.8740
0.1500	2.5792	148.7323
0.2000	2.5780	137.5060
0.2500	2.6186	128.4711
0.3000	2.6389	121.2793
0.3500	2.6571	115.2241
0.4000	2.6711	110.0020
0.4500	2.6816	105.4192
0.5000	2.7011	101.3403
0.5500	2.7197	97.6704
0.6000	2.7331	94.3390
0.6500	2.7438	91.2935
0.7000	2.7531	88.4907
0.7500	2.7698	85.8987
0.8000	2.7810	83.4900
0.8500	2.7119	81.2434
0.9000	2.8023	79.1406
0.9500	2.8111	77.1686
1.0000	2.8221	75.3087
1.0500	2.8310	73.3728
1.1000	2.8407	71.4331
1.1500	2.8486	69.6071
1.2000	2.8567	68.4829
1.2500	2.8637	67.0518
1.3000	2.8749	65.6961
1.3500	2.8829	64.4111
1.4000	2.8906	63.1890
1.4500	2.8982	62.0243
1.5000	2.9056	60.9102
1.5500	2.9129	59.8435
1.6000	2.9199	58.8195
1.6500	2.9267	57.8350
1.7000	2.9337	56.8888
1.7500	2.9403	55.9725
1.8000	2.9468	55.0898
1.8500	2.9532	54.2362
1.9000	2.9594	53.4108
1.9500	2.9655	52.6109
2.0000	2.9715	51.8338
2.0500	2.9774	51.0841
2.1000	2.9832	50.3540
2.1500	2.9889	49.6437
2.2000	2.9945	48.9574
2.2500	3.0000	48.2953
2.3000	3.0054	47.6369
2.3500	3.0107	47.0034
2.4000	3.0159	46.3887
2.4500	3.0210	45.7860
2.5000	3.0261	45.2009

2.5500	3.0311	44.6306
2.6000	3.0360	44.0747
2.6500	3.0408	43.5326
2.7000	3.0455	43.0037
2.7500	3.0502	42.4877
2.8000	3.0548	41.9841
2.8500	3.0593	41.4923
2.9000	3.0638	41.0121
2.9500	3.0682	40.5431
3.0000	3.0725	40.0847
3.0500	3.0768	39.6368
3.1000	3.0810	39.1989
3.1500	3.0852	38.7708
3.2000	3.0893	38.3521
3.2500	3.0934	37.9426
3.3000	3.0974	37.5417
3.3500	3.1013	37.1495
3.4000	3.1051	36.7656
3.4500	3.1090	36.3897
3.5000	3.1128	36.0216
3.5500	3.1166	35.6610
3.6000	3.1203	35.3078
3.6500	3.1239	34.9617
3.7000	3.1276	34.6225
3.7500	3.1311	34.2900
3.8000	3.1346	33.9640
3.8500	3.1381	33.6444
3.9000	3.1416	33.3309
3.9500	3.1450	33.0233
4.0000	3.1483	32.7215
4.0500	3.1517	32.4254
4.1000	3.1549	32.1349
4.1500	3.1582	31.8495
4.2000	3.1614	31.5694
4.2500	3.1646	31.2944
4.3000	3.1677	31.0242
4.3500	3.1708	30.7589
4.4000	3.1739	30.4982
4.4500	3.1769	30.2420
4.5000	3.1799	29.9903
4.5500	3.1829	29.7429
4.6000	3.1858	29.4996
4.6500	3.1887	29.2605
4.7000	3.1916	29.0253
4.7500	3.1945	28.7941
4.8000	3.1973	28.5666
4.8500	3.2001	28.3429
4.9000	3.2028	28.1227
4.9500	3.2056	27.9061
5.0000	3.2083	27.6929

$\epsilon_r = 4.40$

W/H	ϵ_r	Z_0	W/H	ϵ_r	Z_0
0.0500	3.8199	181.1946	2.5500	3.4663	41.7348
0.1000	2.9692	155.1074	2.6000	3.4722	41.2129
0.1500	2.9067	139.8591	2.6500	3.4781	40.7040
0.2000	2.9380	129.0672	2.7000	3.4838	40.2075
0.2500	2.9653	120.7244	2.7500	3.4895	39.7232
0.3000	2.9901	113.9348	2.8000	3.4951	39.2505
0.3500	3.0126	108.2191	2.8500	3.5006	38.7890
0.4000	3.0334	103.2915	2.9000	3.5060	38.3384
0.4500	3.0528	98.7670	2.9500	3.5114	37.8982
0.5000	3.0710	95.1193	3.0000	3.5167	37.4682
0.5500	3.0882	91.8592	3.0500	3.5219	37.0477
0.6000	3.1045	88.5171	3.1000	3.5270	36.6371
0.6500	3.1200	85.8453	3.1500	3.5320	36.2355
0.7000	3.1348	83.0035	3.2000	3.5370	35.8427
0.7500	3.1490	80.5604	3.2500	3.5419	35.4585
0.8000	3.1627	78.2908	3.3000	3.5468	35.0826
0.8500	3.1759	76.1741	3.3500	3.5516	34.7148
0.9000	3.1885	74.1931	3.4000	3.5563	34.3547
0.9500	3.2007	72.3337	3.4500	3.5610	34.0022
1.0000	3.2126	70.5838	3.5000	3.5656	33.6570
1.0500	3.2240	68.7619	3.5500	3.5701	33.3189
1.1000	3.2352	67.1245	3.6000	3.5746	32.9877
1.1500	3.2460	65.5958	3.6500	3.5791	32.6632
1.2000	3.2565	64.1627	3.7000	3.5835	32.3452
1.2500	3.2667	62.8125	3.7500	3.5878	32.0335
1.3000	3.2766	61.5371	3.8000	3.5921	31.7279
1.3500	3.2863	60.3287	3.8500	3.5963	31.4282
1.4000	3.2957	59.1783	3.9000	3.6005	31.1343
1.4500	3.3050	58.0821	3.9500	3.6046	30.8461
1.5000	3.3140	57.0345	4.0000	3.6087	30.5632
1.5500	3.3228	56.0310	4.0500	3.6127	30.2857
1.6000	3.3314	55.0679	4.1000	3.6167	30.0133
1.6500	3.3398	54.1420	4.1500	3.6207	29.7460
1.7000	3.3480	53.2504	4.2000	3.6245	29.4835
1.7500	3.3561	52.3907	4.2500	3.6284	29.2257
1.8000	3.3640	51.5607	4.3000	3.6322	28.9726
1.8500	3.3717	50.7585	4.3500	3.6360	28.7240
1.9000	3.3793	49.9924	4.4000	3.6397	28.4797
1.9500	3.3867	49.2309	4.4500	3.6434	28.2397
2.0000	3.3940	48.5000	4.5000	3.6470	28.0039
2.0500	3.4012	47.7961	4.5500	3.6507	27.7721
2.1000	3.4082	47.1166	4.6000	3.6542	27.5442
2.1500	3.4151	46.4445	4.6500	3.6578	27.3202
2.2000	3.4219	45.7981	4.7000	3.6613	27.0999
2.2500	3.4286	45.1693	4.7500	3.6647	26.8833
2.3000	3.4351	44.5578	4.8000	3.6681	26.6702
2.3500	3.4416	43.9628	4.8500	3.6715	26.4607
2.4000	3.4479	43.3836	4.9000	3.6749	26.2545
2.4500	3.4541	42.8198	4.9500	3.6782	26.0516
2.5000	3.4603	42.2702	5.0000	3.6815	25.8519

CONVERSIONS BETWEEN TWO-PORT PARAMETERS NORMALIZED TO $Z_0 = 1$ WITH $\Delta' = K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}$

	S	Z	Y	H	A
S	$\begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$	$S_{11} = \frac{(Z_{11}-1)(Z_{22}+1)-Z_{12}Z_{21}}{(Z_{11}+1)(Z_{22}+1)-Z_{12}Z_{21}}$ $S_{12} = \frac{2Z_{12}}{(Z_{11}+1)(Z_{22}+1)-Z_{12}Z_{21}}$ $S_{21} = \frac{(Z_{11}+1)(Z_{22}-1)-Z_{12}Z_{21}}{(Z_{11}+1)(Z_{22}+1)-Z_{12}Z_{21}}$ $S_{22} = \frac{(Z_{11}-1)(Z_{22}+1)-Z_{12}Z_{21}}{(Z_{11}+1)(Z_{22}+1)-Z_{12}Z_{21}}$	$S_{11} = \frac{(1-Y_{11})(1+Y_{22})+Y_{12}Y_{21}}{(1+Y_{11})(1+Y_{22})-Y_{12}Y_{21}}$ $S_{12} = \frac{-2Y_{12}}{(1+Y_{11})(1+Y_{22})-Y_{12}Y_{21}}$ $S_{21} = \frac{(1+Y_{11})(1+Y_{22})-Y_{12}Y_{21}}{(1+Y_{11})(1-Y_{22})+Y_{12}Y_{21}}$ $S_{22} = \frac{(1+Y_{11})(1+Y_{22})-Y_{12}Y_{21}}{(1+Y_{11})(1+Y_{22})-Y_{12}Y_{21}}$	$S_{11} = \frac{(h_{11}-1)(h_{22}+1)-h_{12}h_{21}}{(h_{11}+1)(h_{22}+1)-h_{12}h_{21}}$ $S_{12} = \frac{2h_{12}}{(h_{11}+1)(h_{22}+1)-h_{12}h_{21}}$ $S_{21} = \frac{(h_{11}+1)(h_{22}-1)-h_{12}h_{21}}{(1+h_{11})(1-h_{22})+h_{12}h_{21}}$ $S_{22} = \frac{(h_{11}-1)(h_{22}+1)-h_{12}h_{21}}{(h_{11}+1)(h_{22}+1)-h_{12}h_{21}}$	$\frac{A+B-C-D}{A+B+C+D} \frac{2AD-BC}{A+B+C+D}$ $\frac{2}{A+B+C+D} \frac{-A+B-C+D}{A+B+C+D}$
Z	$Z_{11} = \frac{(1+S_{11})(1-S_{22})+S_{12}S_{21}}{(1-S_{11})(1-S_{22})-S_{12}S_{21}}$ $Z_{12} = \frac{2S_{12}}{(1-S_{11})(1-S_{22})-S_{12}S_{21}}$ $Z_{21} = \frac{(1-S_{11})(1-S_{22})-S_{12}S_{21}}{(1-S_{11})(1+S_{22})+S_{12}S_{21}}$ $Z_{22} = \frac{(1-S_{11})(1-S_{22})-S_{12}S_{21}}{(1-S_{11})(1+S_{22})+S_{12}S_{21}}$	$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$	$\frac{Y_{12}}{\Delta'} \quad \frac{-Y_{12}}{\Delta'}$ $\frac{-Y_{11}}{\Delta'} \quad \frac{Y_{11}}{\Delta'}$	$\frac{\Delta'}{h_{12}} \quad \frac{h_{12}}{h_{11}}$ $\frac{-h_{12}}{h_{11}} \quad \frac{1}{h_{11}}$	$\frac{A}{C} \quad \frac{\Delta'}{C}$ $\frac{1}{C} \quad \frac{D}{C}$
Y	$Y_{11} = \frac{(1-S_{11})(1+S_{22})+S_{12}S_{21}}{(1+S_{11})(1+S_{22})-S_{12}S_{21}}$ $Y_{12} = \frac{-2S_{12}}{(1+S_{11})(1+S_{22})-S_{12}S_{21}}$ $Y_{21} = \frac{(1+S_{11})(1+S_{22})-S_{12}S_{21}}{(1+S_{11})(1-S_{22})+S_{12}S_{21}}$ $Y_{22} = \frac{(1+S_{11})(1+S_{22})-S_{12}S_{21}}{(1+S_{11})(1-S_{22})+S_{12}S_{21}}$	$\frac{Z_{12}}{\Delta'} \quad \frac{-Z_{12}}{\Delta'}$ $\frac{-Z_{11}}{\Delta'} \quad \frac{Z_{11}}{\Delta'}$	$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{h_{11}} \quad \frac{-h_{12}}{h_{11}}$ $\frac{h_{12}}{h_{11}} \quad \frac{\Delta'}{h_{11}}$	$\frac{D}{B} \quad \frac{-\Delta'}{B}$ $\frac{-1}{B} \quad \frac{A}{B}$

CONVERSIONS BETWEEN TWO-PORT PARAMETERS NORMALIZED TO $Z_0 = 1$ WITH $\Delta^* = K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}$

	S	Z	Y	II	A
II	$h_{11} = \frac{(1+S_{11})(1+S_{12})-S_{12}S_{21}}{(1-S_{11})(1+S_{12})+S_{12}S_{21}}$	$\frac{\Delta^*}{Z_{11}} \quad \frac{Z_{12}}{Z_{11}}$	$\frac{1}{Y_{11}} \quad \frac{-Y_{12}}{Y_{11}}$	$\begin{bmatrix} Y_{11} & h_{11} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$	$\frac{B}{D} \quad \frac{\Delta^*}{D}$
	$h_{12} = \frac{(1-S_{11})(1+S_{22})+S_{12}S_{21}}{2S_{11}}$	$-\frac{Z_{12}}{Z_{11}} \quad \frac{1}{Z_{11}}$	$\frac{Y_{12}}{Y_{11}} \quad \frac{\Delta^*}{Y_{11}}$		$-\frac{1}{D} \quad \frac{C}{D}$
	$h_{21} = \frac{(1-S_{21})(1+S_{12})+S_{12}S_{21}}{-2S_{11}}$				
	$h_{22} = \frac{(1-S_{21})(1+S_{22})-S_{12}S_{21}}{(1-S_{11})(1+S_{12})+S_{12}S_{21}}$				
	$h_{11} = \frac{(1-S_{11})(1+S_{12})+S_{12}S_{21}}{(1-S_{11})(1+S_{12})+S_{12}S_{21}}$				
A	$A = \frac{(1+S_{11})(1-S_{12})+S_{12}S_{21}}{-2S_{11}}$	$\frac{Z_{11}}{Z_{11}} \quad \frac{\Delta^*}{Z_{11}}$	$\frac{-Y_{12}}{Y_{11}} \quad \frac{-1}{Y_{11}}$	$\frac{-\Delta^*}{h_{11}} \quad \frac{-h_{11}}{h_{11}}$	$\begin{bmatrix} Y_{11} \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_{11} \\ -I_1 \end{bmatrix}$
	$B = \frac{(1+S_{11})(1+S_{12})-S_{12}S_{21}}{2S_{11}}$				
	$C = \frac{(1-S_{11})(1-S_{12})-S_{12}S_{21}}{2S_{11}}$				
	$D = \frac{(1-S_{11})(1+S_{12})+S_{12}S_{21}}{2S_{11}}$	$\frac{1}{Z_{11}} \quad \frac{Z_{11}}{Z_{11}}$	$\frac{-\Delta^*}{Y_{11}} \quad \frac{-Y_{11}}{Y_{11}}$	$\frac{-h_{22}}{h_{11}} \quad \frac{-1}{h_{11}}$	

Appendix G: First-Order Bessel Function Values

x	$J_1(x)$	x	$J_1(x)$	x	$J_1(x)$	x	$J_1(x)$	x	$J_1(x)$
0.00	0.000	0.92	0.413	1.86	0.582	2.86	0.389	3.84	-0.003
0.02	+0.010	0.94	0.420	1.88	0.5815	2.88	0.3825	3.86	0.011
0.04	0.020	0.96	0.427	1.90	0.581	2.90	0.375	3.88	0.019
0.06	0.030	0.98	0.4335	1.92	0.5805	2.92	0.368	3.90	0.027
0.08	0.040	1.00	0.440	1.94	0.580	2.94	0.361	3.92	0.035
0.10	0.050	1.02	0.4465	1.96	0.579	2.96	0.354	3.94	0.043
0.12	0.060	1.04	0.453	1.98	0.578	2.98	0.3465	3.96	0.051
0.14	0.070	1.06	0.459	2.00	0.577	3.00	0.339	3.98	0.058
0.16	0.080	1.08	0.465	2.02	0.575	3.02	0.3315	4.00	0.066
0.18	0.090	1.10	0.471	2.04	0.574	3.04	0.324	4.10	0.103
0.20	0.0995	1.12	0.477	2.06	0.572	3.06	0.316	4.20	0.139
0.22	0.109	1.14	0.482	2.08	0.570	3.08	0.309	4.30	0.172
0.24	0.119	1.16	0.488	2.10	0.568	3.10	0.301	4.40	0.203
0.26	0.129	1.18	0.493	2.12	0.566	3.12	0.293	4.50	0.231
0.28	0.139	1.20	0.498	2.14	0.564	3.14	0.285	4.60	0.2565
0.30	0.148	1.22	0.503	2.16	0.561	3.16	0.277	4.70	0.279
0.32	0.158	1.24	0.508	2.18	0.559	3.18	0.269	4.80	0.2985
0.34	0.1675	1.26	0.513	2.20	0.556	3.20	0.261	4.90	0.315
0.36	0.177	1.28	0.5175	2.22	0.553	3.22	0.253	5.00	0.3275
0.38	0.187	1.30	0.522	2.24	0.550	3.24	0.245	5.05	0.334
0.40	0.196	1.32	0.526	2.26	0.547	3.26	0.237	5.10	0.337
0.42	0.205	1.34	0.5305	2.28	0.543	3.28	0.229	5.16	0.341
0.44	0.215	1.36	0.534	2.30	0.540	3.30	0.221	5.20	0.343
0.46	0.224	1.38	0.538	2.32	0.536	3.32	0.212	5.26	0.345
0.48	0.233	1.40	0.542	2.34	0.532	3.34	0.204	5.30	0.346
0.50	0.242	1.42	0.5455	2.36	0.5285	3.36	0.196	5.32	0.346
0.52	0.251	1.44	0.549	2.38	0.524	3.38	0.1865	5.34	0.346
0.54	0.260	1.46	0.552	2.40	0.520	3.40	0.179	5.36	0.346
0.56	0.269	1.48	0.555	2.42	0.516	3.42	0.171	5.38	0.346
0.58	0.278	1.50	0.558	2.44	0.511	3.44	0.1625	5.40	0.345
0.60	0.287	1.52	0.561	2.46	0.507	3.46	0.154	5.47	0.343
0.62	0.295	1.54	0.563	2.48	0.502	3.48	0.146	5.50	0.341
0.64	0.304	1.56	0.566	2.50	0.497	3.50	0.137	5.56	0.3375
0.66	0.312	1.58	0.568	2.52	0.492	3.52	0.129	5.60	0.334
0.68	0.321	1.60	0.570	2.54	0.487	3.54	0.121	5.66	0.3285
0.70	0.329	1.62	0.572	2.56	0.482	3.56	0.112	5.70	0.324
0.72	0.337	1.64	0.5735	2.58	0.476	3.58	0.104	5.80	0.311
0.74	0.345	1.66	0.575	2.60	0.471	3.60	0.0955	5.90	0.295
0.76	0.353	1.68	0.5765	2.62	0.465	3.62	0.087	6.00	0.277

APPENDIX (CONTINUED)

x	$J_1(x)$	x	$J_1(x)$	x	$J_1(x)$	x	$J_1(x)$	x	$J_1(x)$
0.78	0.361	1.70	0.578	2.64	0.4595	3.64	0.079	6.10	0.256
0.80	0.369	1.72	0.579	2.66	0.454	3.66	0.070	6.20	0.233
0.82	0.3765	1.74	0.580	2.68	0.448	3.68	0.062	6.30	0.208
0.84	0.384	1.76	0.5805	2.70	0.442	3.70	0.054	6.40	0.182
0.86	0.3915	1.78	0.581	2.72	0.435	3.72	0.0455	6.60	0.125
0.88	0.399	1.80	0.5815	2.74	0.429	3.74	0.037	6.70	0.095
0.90	0.406	1.82	0.582	2.76	0.423	3.76	0.029	6.80	0.065
		1.84	0.582	2.78	0.416	3.78	0.021	6.90	0.035
				2.80	0.410	3.80	0.013	7.00	0.005
				2.82	0.403	3.82	0.005	7.01	0.000
				2.84	0.396	3.83	0.000		

MOTOROLA
SEMICONDUCTOR
TECHNICAL DATA

BFW92A

The RF Line

NPN SILICON HIGH FREQUENCY TRANSISTOR

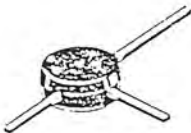
designed primarily for use in MATV/CATV amplifiers and other broadband linear applications demanding high power gain with low noise over a wide current range.

- High Power Gain —
MAG = 16 dB (Typ) @ $f = 0.5$ GHz
- Low Noise Figure —
NF = 2.7 dB (Typ) @ $f = 0.5$ GHz
- Ion-Implanted Arsenic Emitters
- Gold Top Metal
- Silicon Nitride Passivation
- Industry Standard Plastic Macro-T Package
- Compatible with Other BFW92 Types

$f_T = 4.5$ GHz @ 10 mA

HIGH FREQUENCY
TRANSISTOR

NPN SILICON



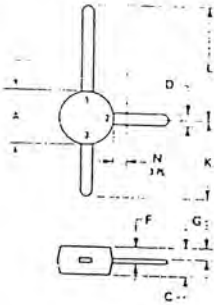
MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Collector-Emitter Voltage	V_{CE0}	15	Vdc
Collector-Base Voltage	V_{CB0}	25	Vdc
Emitter-Base Voltage	V_{EB0}	2.5	Vdc
Collector Current — Continuous	I_C	35	mA dc
Total Device Dissipation @ $T_C = 105^\circ\text{C}$ Derate Above 105°C	P_D	180 4.0	mW mW/ $^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	T_{stg}	-65 to 150	$^\circ\text{C}$

THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance Junction to Case (2)	$R_{\theta JC}$	250	$^\circ\text{C/W}$

Note: Case temperature measured on collector lead immediately adjacent to body of package



STYLE 2:
PIN 1, COLLECTOR
2, EMITTER
3, BASE

NOTE:
DIMENSION D NOT APPLICABLE IN ZONE X

DIM	MILLIMETERS		INCHES	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	4.44	5.21	0.175	0.205
B	1.90	2.54	0.075	0.100
C	0.84	0.99	0.033	0.039
D	0.20	0.30	0.008	0.012
E	0.76	1.14	0.030	0.045
F	7.24	8.13	0.285	0.320
G	10.54	11.43	0.415	0.450
H	—	1.65	—	0.065

CASE 317A-01

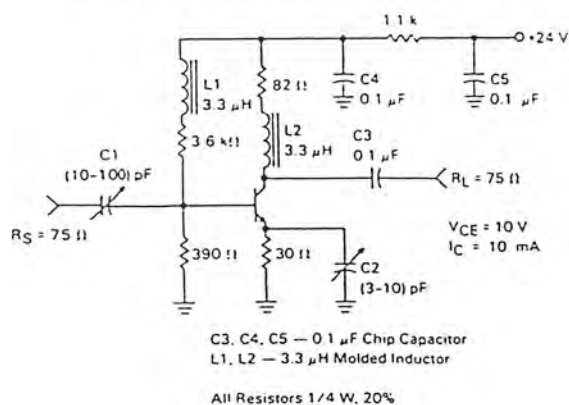
BFW92A

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_C = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
OFF CHARACTERISTICS					
Collector-Emitter Breakdown Voltage ($I_C = 2 \text{ mA}$, $I_E = 0$)	$V_{BR(CEO)}$	15	—	—	V
Collector-Base Breakdown Voltage ($I_C = 2 \text{ mA}$, $I_E = 0$)	$V_{BR(CBO)}$	15	—	—	V
Collector-Emitter Saturation Voltage ($I_C = 10 \text{ mA}$, $I_E = 0$)	$V_{CE(sat)}$	0.8	—	—	V
Collector Cutoff Current ($V_{CE} = 10 \text{ Vdc}$, $I_E = 0$)	I_{CBO}	—	—	50	nA
ON CHARACTERISTICS					
DC Current Gain ($I_C = 2.0 \text{ mA}$, $V_{CE} = 1.0 \text{ Vdc}$)	h_{FE}	20	50	150	
DYNAMIC CHARACTERISTICS					
Current-Gain Bandwidth Product ($I_C = 10 \text{ mA}$, $V_{CE} = 10 \text{ Vdc}$, $f = 0.5 \text{ GHz}$)	f_T	—	4.5	—	GHz
Collector-Base Capacitance ($V_{CE} = 10 \text{ Vdc}$, $f = 1.0 \text{ MHz}$, Emitter Guarded)	C_{cb}	—	0.5	1.0	pF
FUNCTIONAL PERFORMANCE					
Optimum Noise Figure (Tuned) ($I_C = 10 \text{ mA}$, $V_{CE} = 10 \text{ Vdc}$, $f = 0.5 \text{ GHz}$)	NF_{opt}	—	2.7	—	dB
Noise Figure (Untuned, $R_S = R_L = 50 \Omega$) ($I_C = 10 \text{ mA}$, $V_{CE} = 10 \text{ Vdc}$, $f = 0.5 \text{ GHz}$)	NF	—	3.0	—	dB
Maximum Available Gain (1) ($I_C = 10 \text{ mA}$, $V_{CE} = 10 \text{ Vdc}$, $f = 0.5 \text{ GHz}$)	MAG	—	16	—	dB
Insertion Gain ($I_C = 10 \text{ mA}$, $V_{CE} = 10 \text{ Vdc}$, $f = 0.5 \text{ GHz}$)	$ S_{21} ^2$	—	14	—	dB

$$(1) G_{\max} = \frac{|S_{21}|^2}{(1 - |S_{11}|^2)(1 - |S_{22}|^2)}$$

FIGURE 1 — 30-900 MHz BROADBAND AMPLIFIER



BFW92A

FIGURE 2 — BROADBAND GAIN (Circuit Figure 1)

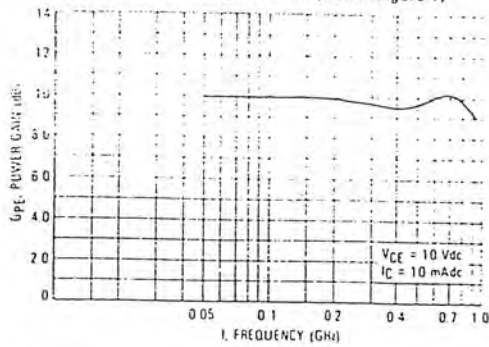


FIGURE 3 — 2nd AND 3rd ORDER INTERCEPT POINTS

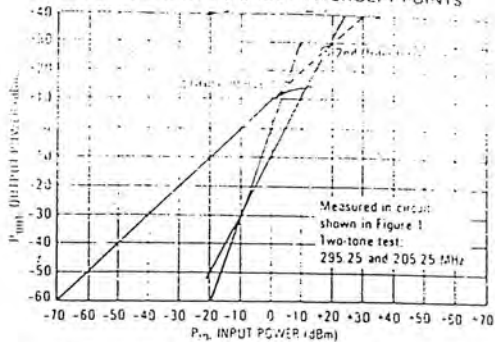


FIGURE 4 — MAXIMUM AVAILABLE GAIN versus FREQUENCY

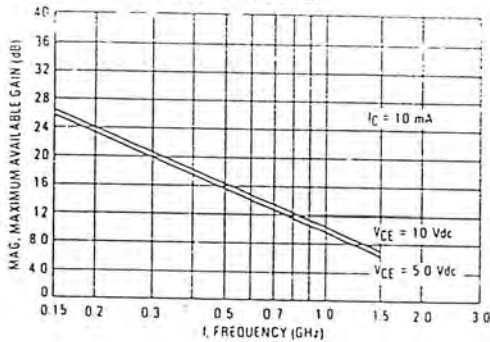


FIGURE 5 — $|S_{21}|^2$ versus FREQUENCY

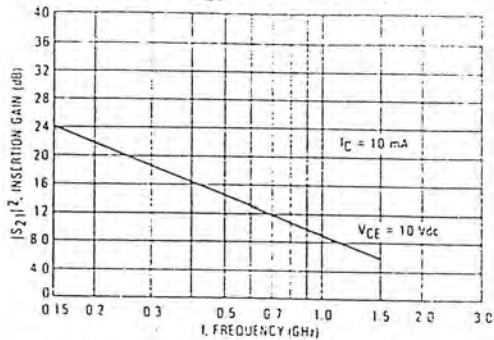


FIGURE 6 — MAXIMUM AVAILABLE GAIN versus COLLECTOR CURRENT

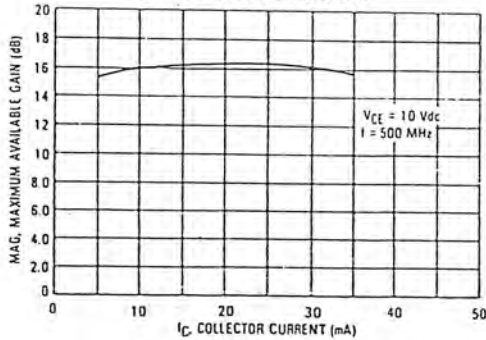
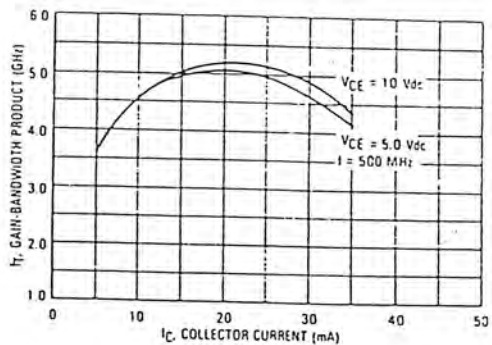


FIGURE 7 — GAIN-BANDWIDTH PRODUCT versus COLLECTOR CURRENT



BFW92A

FIGURE 8 — NOISE FIGURE
versus COLLECTOR CURRENT

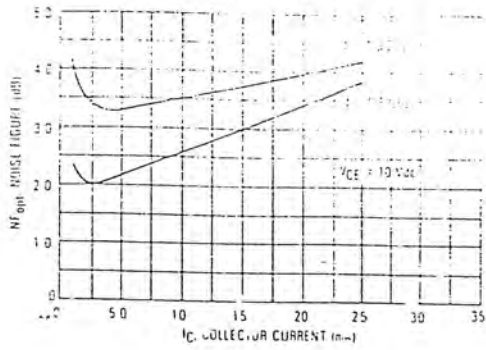


FIGURE 9 — NOISE FIGURE
versus COLLECTOR CURRENT
Untuned, R_S = R_L = 50 Ω

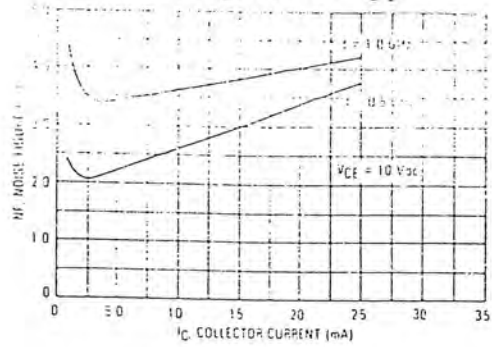


FIGURE 10 — NOISE FIGURE versus FREQUENCY

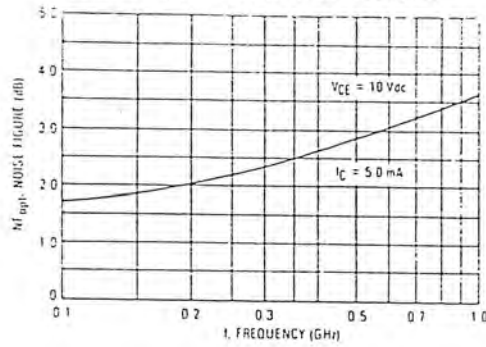


FIGURE 11 — NOISE FIGURE versus FREQUENCY
Untuned R_S = R_L = 50 Ω

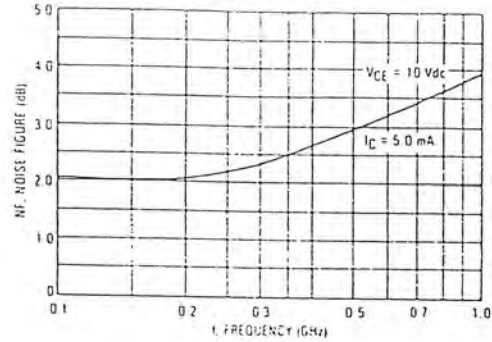


FIGURE 12 — C_{ib} INPUT CAPACITANCE versus
EMITTER BASE VOLTAGE

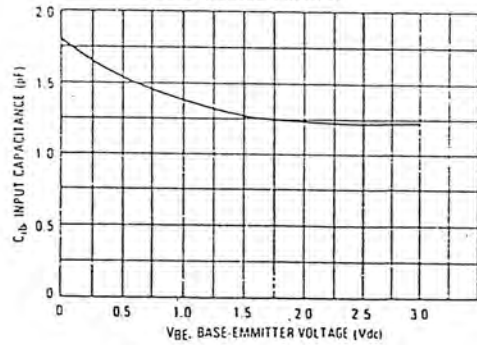
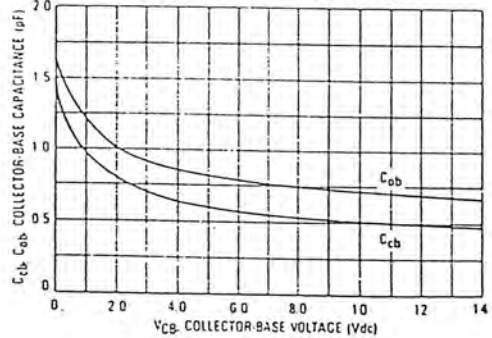


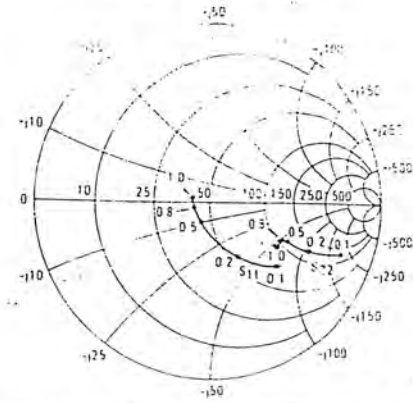
FIGURE 13 — COLLECTOR-BASE CAPACITANCE
versus COLLECTOR-BASE VOLTAGE



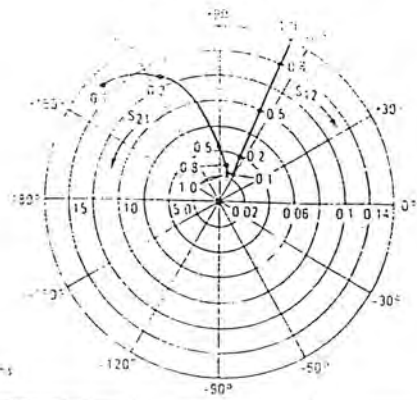
BFW92A

BFW92A COMMON-EMITTER S-PARAMETERS

INPUT/OUTPUT REFLECTION
COEFFICIENTS versus FREQUENCY
($V_{CE} = 10\text{ V}$, $I_C = 10\text{ mA}$)



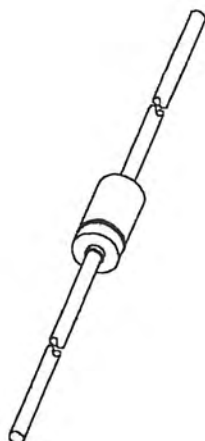
FORWARD REVERSE TRANSMISSION
COEFFICIENTS versus FREQUENCY
($V_{CE} = 10\text{ V}$, $I_C = 10\text{ mA}$)



Coordinates in Ohms

V_{CE} (Volts)	I_C (mA)	f (MHz)	S_{11}		S_{21}		S_{12}		S_{22}	
			$ S_{11} $	$\angle S_{11}$	$ S_{21} $	$\angle S_{21}$	$ S_{12} $	$\angle S_{12}$	$ S_{22} $	$\angle S_{22}$
50	50	100	0.71	-33	11.2	145	0.031	69	0.87	-15
		200	0.49	-60	8.8	122	0.052	62	0.70	-26
		500	0.21	-119	4.5	32	0.094	61	0.48	-30
		800	0.17	-161	3.0	78	0.137	60	0.44	-36
		1000	0.16	-176	2.5	71	0.164	60	0.44	-40
	10	100	0.52	-46	16.6	135	0.027	67	0.78	-23
		200	0.31	-75	11.2	113	0.044	65	0.58	-28
		500	0.14	-150	5.2	88	0.089	67	0.40	-29
		800	0.15	-173	3.3	76	0.135	65	0.37	-34
		1000	0.16	-154	2.8	70	0.164	64	0.37	-38
	15	100	0.40	-55	19.7	129	0.025	69	0.72	-26
		200	0.22	-88	12.1	109	0.041	68	0.52	-29
		500	0.14	-170	5.4	86	0.087	70	0.36	-27
		800	0.16	-161	3.5	76	0.134	68	0.34	-23
		1000	0.17	-145	2.9	69	0.164	66	0.35	-37
	20	100	0.33	-62	21.1	125	0.023	69	0.68	-27
		200	0.18	-99	12.5	105	0.039	69	0.49	-26
		500	0.14	-178	5.5	85	0.086	72	0.35	-26
		800	0.17	-155	3.5	75	0.133	69	0.33	-32
		1000	0.18	-142	2.9	69	0.164	67	0.34	-37
	25	100	0.27	-69	21.9	122	0.022	70	0.65	-27
		200	0.15	-111	12.7	104	0.038	71	0.47	-27
		500	0.16	-172	5.5	85	0.085	73	0.35	-25
		800	0.19	-153	3.5	75	0.132	70	0.33	-31
		1000	0.20	-140	2.9	69	0.163	68	0.33	-36
10	50	100	0.73	-30	11.1	146	0.026	71	0.90	-14
		200	0.53	-52	8.8	124	0.044	63	0.75	-21
		500	0.21	-98	4.7	94	0.082	62	0.57	-25
		800	0.14	-136	3.1	80	0.120	62	0.53	-30
		1000	0.11	-161	2.6	73	0.143	62	0.53	-34
	10	100	0.57	-39	16.7	137	0.023	70	0.82	-18
		200	0.35	-62	11.5	115	0.038	66	0.65	-23
		500	0.12	-117	5.4	89	0.078	69	0.50	-23
		800	0.09	-163	3.5	78	0.118	67	0.47	-28
		1000	0.09	-168	2.9	71	0.144	66	0.48	-32
	15	100	0.46	-46	13.9	130	0.021	70	0.77	-20
		200	0.26	-68	12.6	110	0.035	68	0.60	-22
		500	0.09	-137	5.6	87	0.076	71	0.47	-21
		800	0.09	-177	3.7	77	0.117	69	0.45	-27
		1000	0.10	-153	3.0	71	0.143	68	0.46	-31
	20	100	0.39	-50	21.5	126	0.020	70	0.74	-21
		200	0.21	-73	13.0	107	0.034	71	0.58	-21
		500	0.08	-154	5.7	86	0.075	72	0.46	-20
		800	0.10	-168	3.7	76	0.117	70	0.45	-27
		1000	0.11	-148	3.0	71	0.142	69	0.45	-31
	25	100	0.34	-54	22.3	123	0.019	70	0.71	-20
		200	0.17	-79	13.0	105	0.033	71	0.57	-20
		500	0.08	-166	5.7	86	0.075	73	0.47	-19
		800	0.11	-162	3.7	76	0.116	70	0.45	-26
		1000	0.13	-144	3.0	70	0.141	69	0.46	-30

DATA SHEET



BB405B

UHF variable capacitance diode

Product specification

Supersedes data of April 1992

File under Discrete Semiconductors, SC01

1996 May '03

UHF variable capacitance diode

BB405B

FEATURES

- Excellent linearity
- Matched to 3%
- Hermetically sealed leaded glass SOD68 (DO-34) package
- C28: 2 pF; ratio: 8.3
- Low series resistance.

APPLICATIONS

- Electronic tuning in UHF television tuners
- VCO.

DESCRIPTION

The BB405B is a variable capacitance diode, fabricated in planar technology, and encapsulated in the hermetically sealed leaded glass SOD68 (DO-34) package.

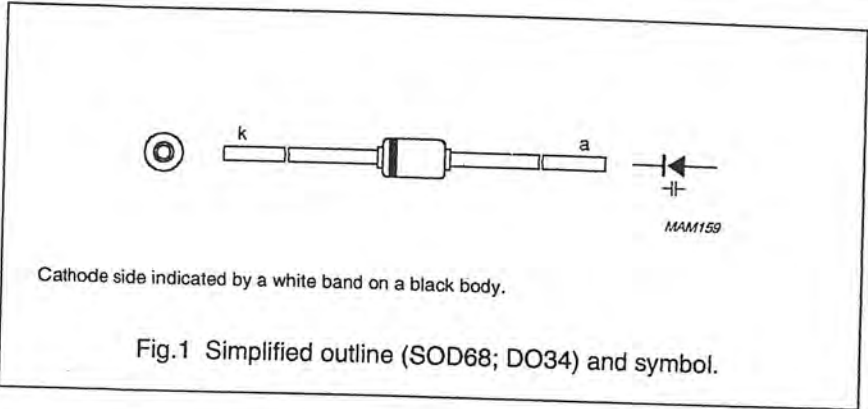
ELECTRICAL CHARACTERISTICS

T_j = 25 °C; unless otherwise specified.

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
I _R	reverse current	V _R = 28 V; see Fig.3	–	–	10	nA
		V _R = 28 V; T _j = 85 °C; see Fig.3	–	–	200	nA
r _s	diode series resistance	f = 470 MHz; note 1	–	–	0.75	Ω
C _d	diode capacitance	V _R = 1 V; f = 1 MHz; see Figs 2 and 4	–	–	18	pF
		V _R = 3 V; f = 1 MHz; see Figs 2 and 4	–	11	–	pF
		V _R = 28 V; f = 1 MHz; see Figs 2 and 4	1.8	–	2.2	pF
$\frac{C_{d(1V)}}{C_{d(28V)}}$	capacitance ratio	f = 1 MHz	7.6	–	–	
$\frac{\Delta C_d}{C_d}$	capacitance matching	V _R = 0.5 to 28 V	–	–	3	%

Note

1. V_R is the value at which C_d = 9 pF.



LIMITING VALUES

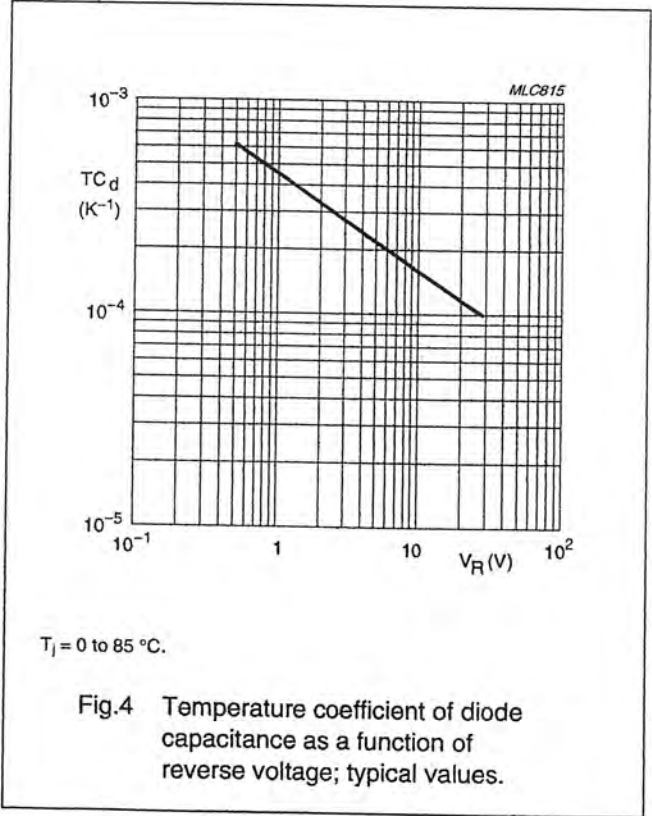
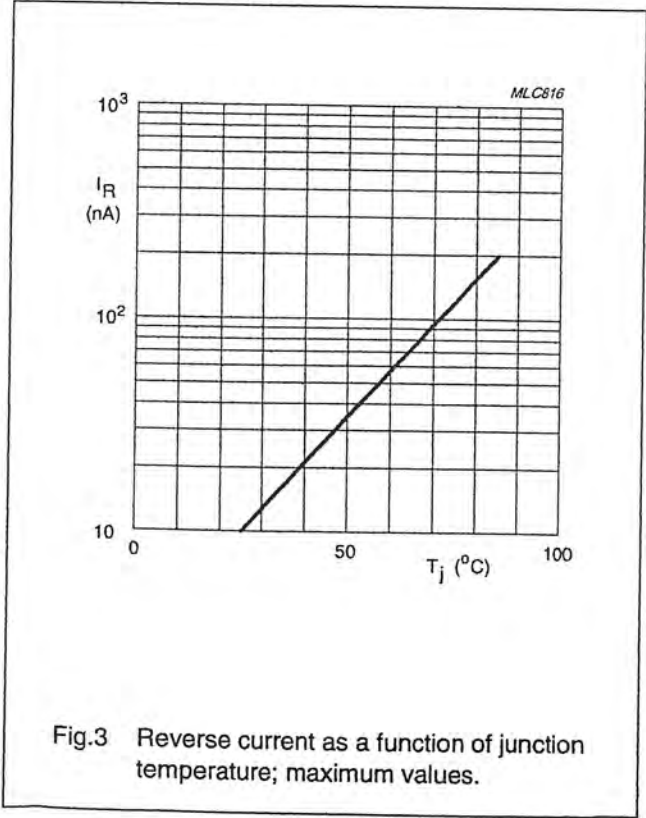
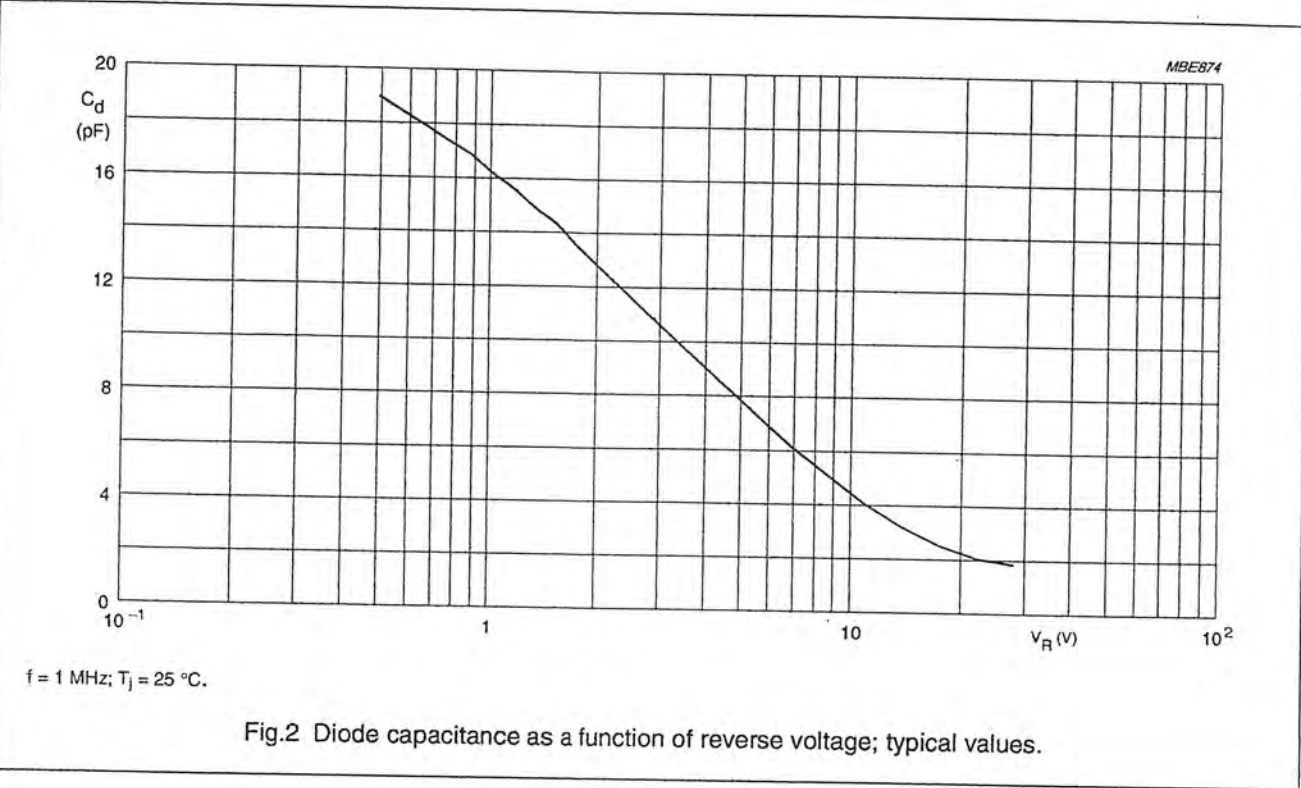
In accordance with the Absolute Maximum Rating System (IEC 134).

SYMBOL	PARAMETER	MIN.	MAX.	UNIT
V _R	continuous reverse voltage	–	30	V
I _F	continuous forward current	–	20	mA
T _{stg}	storage temperature	–55	+150	°C
T _j	operating junction temperature	–55	+100	°C

UHF variable capacitance diode

BB405B

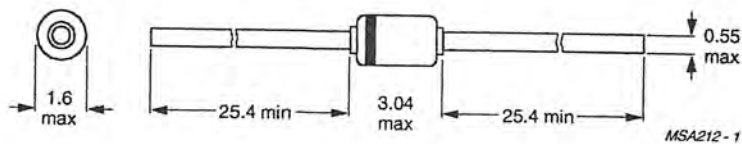
GRAPHICAL DATA



UHF variable capacitance diode

BB405B

PACKAGE OUTLINE



Dimensions in mm.

Fig.5 SOD68 (DO-34).

DEFINITIONS

Data sheet status	
Objective specification	This data sheet contains target or goal specifications for product development.
Preliminary specification	This data sheet contains preliminary data; supplementary data may be published later.
Product specification	This data sheet contains final product specifications.
Limiting values	
Limiting values given are in accordance with the Absolute Maximum Rating System (IEC 134). Stress above one or more of the limiting values may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only and operation of the device at these or at any other conditions above those given in the Characteristics sections of the specification is not implied. Exposure to limiting values for extended periods may affect device reliability.	
Application information	
Where application information is given, it is advisory and does not form part of the specification.	

LIFE SUPPORT APPLICATIONS

These products are not designed for use in life support appliances, devices, or systems where malfunction of these products can reasonably be expected to result in personal injury. Philips customers using or selling these products for use in such applications do so at their own risk and agree to fully indemnify Philips for any damages resulting from such improper use or sale.