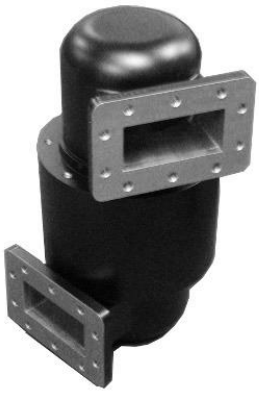
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

دستور کار آزمایشگاه مایکروویو



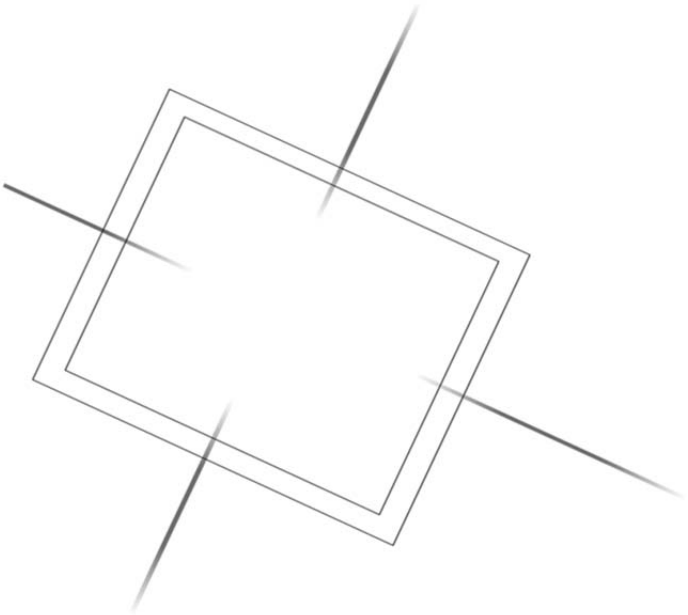
جواد سلیمان میگونی

بهمن ۱۳۹۴

دیباچه

امروزه بروز تحولات گسترده در زمینه مخابرات و ارتباطات، تغییرات عمده ای را در عرصه های متفاوت حیات بشری به دنبال داشته است و با پیشرفت علوم و فناوری ارتباطات، نیازها و خواسته های جدید در زمینه صنعت مخابرات آشکار شده است. عامل زمان در ساخت ادوات مخابراتی نسبت به گذشته دو چندان شده و این امر گرایش به ادوات پیش ساخته مخابراتی را افزایش داده است. شاید بتوان یکی از موثرترین راه های رسیدن به این مهم را در کسب تجربیاتی در آزمایشگاه های تخصصی رشته مهندسی مخابرات جسجو کرد. آزمایشگاه مایکروویو از جمله آزمایشگاه های تخصصی حوزه مهندسی مخابرات است که دستاوردهای عملی زیادی را برای دانشجویان دوره کارشناسی به ارمغان خواهد آورد. دانشجویان این رشته با روشهای طراحی و شبیه سازی و اندازه گیری بسیاری از ادوات پرکاربرد حوزه مخابرات در این آزمایشگاه آشنا خواهند شد. آزمایشگاه ریزموج دانشگاه سمنان در بهمن ۱۳۹۳ آغاز به کار کرده است. گزارش پیش رو، شامل آزمایشهای اصلی این درس می باشد. بسی شایسته است که از زحمات دوستانی که در گردآوری این سند همکاری نموده اند، به ویژه آقای مهندس صالحی عارف و خانم مهندس عبداللهی قدردانی شود. لازم به توضیح است که پس از بررسی های انجام شده در مجموعه آزمایشهای بکار گرفته شده در سند شرکت Amitec، تغییراتی در توالی آزمایشها و محتوای برخی از آنها صورت گرفته است. امید است که این سند مورد رضایت کاربران محترم قرار گیرد. لطفا ما را از نظرات سازنده خود در بهبود کیفی این آزمایشگاه مطلع گردانید.

میگونی – بهمن ۱۳۹۴



فهرست

مقدمه‌ای بر مفاهیم و معرفی تجهیزات: ۵

مفاهیم dBW و dBm: ۵

معرفی مختصر ادوات موجبری: ۵

آزمایش نخست: آشنایی با تجهیزات ۱۵

بخش اول:اندازه‌گیری توان و تضعیف، پین مدولاتورها و آشکارسازهای کریستالی ۱۵

مراحل انجام آزمایش: ۱۶

بررسی اثر مدولاسیون بر توان انتقال داده شده: ۱۶

بخش دوم: اندازه گیری توان و تضعیف و معرفی کوپلر جهتی ۱۷

اندازه‌گیری توان: ۱۷

اندازه‌گیری تضعیف: ۱۷

کوپلر جهتی: ۱۷

اندازه‌گیری ضریب کوپلینگ ۱۹

اندازه‌گیری جهت دهی ۲۰

اندازه‌گیری تلفات بازگشتی بار ۲۱

فصل دوم: اندازه‌گیری مشخصات موجبر مستطیلی ۲۳

بخش نخست: انتشار امواج در موجبرها و موج ساکن ۲۳

موج‌های ساکن ۲۵

اندازه‌گیری طول موج در فضای آزاد و در موجبر ۲۶

اندازه‌گیری مقادیر کم و متوسط SWR ۲۷

اندازه‌گیری SWR زیاد، با استفاده از تضعیف‌کننده کالیبره شده ۲۸

بخش دوم: امپدانس ۲۹

اندازه‌گیری امپدانس: ۳۲

فصل سوم: پارامترهای پراکندگی ۳۴

بررسی مشخصات تی جادویی: ۳۴

اندازه‌گیری دکوپلینگ بین بازوی H و بازوی E ۳۵

اندازه‌گیری تلفات داخلی هایبرید T ۳۶

اندازه‌گیری تلفات بازویH ۳۷

ایزولاتور و سیرکولاتور: ۳۹
سیرکولاتورها: ۳۹
برخی پارامترهای ایزولاتور و سیرکولاتورها: ۳۹
اندازه‌گیری VSWR ورودی: ۳۹
اندازه‌گیری تلفات داخلی و ایزولاسیون ۴۰
فصل چهارم: اندازه‌گیری شیفت فاز ۴۱
نحوه انجام آزمایش ۴۱
محاسبات ۴۲
مشاهدات ۴۲
ثابت دی الکتریک: ۴۲
نحوه انجام آزمایش ۴۳
فصل پنجم: مباحث تکمیلی ۴۵
بخش اول: اندازه‌گیری مقادیر زیاد SWR ۴۵
بخش دوم: اندازه‌گیری توان مزدوج و توان Z0 ۴۶
اندازه‌گیری توان مزدوج و **Z0** ۴۷
مفاهیم تلفات عدم تطبیق و حداکثر توان منتقل شده ۴۸
بخش سوم: اندازه‌گیری مقادیر اندک تضعیف ۵۰
مراحل ۵۰
بخش چهارم: آشنایی با گان اسیلاتور: ۵۱
اثر مقاومت منفی و الکترون منتقل شده ۵۱
حوزه‌های gunn ۵۲
گان اسیلاتور ۵۳
رسم منحنی جریان-ولتاژ ۵۳
اندازه‌گیری توان خروجی اسیلاتور بر حسب ولتاژ تغذیه ۵۴
بخش پنجم: آشنایی با پین مدولاتور و آشکارسازهای کریستالی: ۵۵
ویژگی‌های قانون مربع در آشکار ساز کریستالی ۵۸
بررسی بیشتر پین مدولاتور: ۶۰
بخش ششم: پاسخ فرکانسی ۶۰
فصل ششم: لینک مایکروویو ۶۱

مقدمه‌ای بر مفاهیم و معرفی تجهیزات:

در این دستورکار و در این آزمایشگاه صرفا ادوات غیر فعال مایکروویو از نوع مکانیکی و موجبری مورد بررسی قرار می‌گیرد. قبل از به معرفی برخی مفاهیم مقدماتی می‌پردازیم.

مفاهیم dBW و dBm:

در فرکانس‌های مایکروویو، به دلیل اینکه مقدار توان‌های بسیار کوچک (درحد پیکووات) مد نظر هستند، لذا آن‌ها را در حوزه لگاریتم بر حسب واحدهای dBW و dBm بیان می‌نمایند. تعاریف این واحدها به صورت زیر است:

$$P(dBW) = 10\log P\,(W)$$
$$P(dBm) = 10\,logP\,(mW)$$
$$P(dBW) = P(dBm) + 30$$

به عنوان مثال، 1uW برابر -60dBW یا -30dBm است.

نسبت دو توان مختلف که معادل اختلاف دو توان در حوزه لگاریتم است، بر حسب dB بیان می‌شود.

$$P_2 - P_1 = 10\log\left(\frac{P_2}{P_1}\right)(dB)$$

مثلا 3dB معادل نسبت $\frac{1}{2}$ و 30dB معادل نسبت $\frac{1}{1000}$ است.

معرفی مختصر ادوات موجبری:

گان اسیلاتور

گان اسیلاتور، که به افتخار گان، مکتشف اثر گان در سال ۱۹۶۳، نام گذاری شده است، فرکانس‌های مایکروویو را تولید می‌کند. ساختمان این قطعه به این صورت است که دیود گان که آزادانه به یک محفظه تشدید کوپل شده است، با ولتاژ ۸ تا ۱۰ ولت DC بایاس شده است.
توان خروجی گان اسیلاتور می‌تواند بسته به ولتاژ تغذیه و سایر ویژگی‌های اسیلاتور بین ۱تا۱۰میلی وات تغییر کند.

پین دیود مدولاتور:

این قطعه از یک پین دیود استفاده می‌شود، که در طول موجبر به صورت موازی قرار می‌گیرد. اگر پین دیود به صورت معکوس بایاس شود، افت عبوری دیود، آن قدر ناچیز است که تاثیری بر عبور انرژی در موجبر نخواهد داشت. اما اگر تمام یا مقداری از اثر بایاس معکوس برداشته شود، دیود شروع می‌کند به کنترل مقدار انرژی عبوری. در نتیجه اثر مدولاسیون دامنه یا پالس ایجاد می‌شود. بدیهی است که برای دریافت بیشترین توان در خروجی، تطبیق امپدانس لازم است.

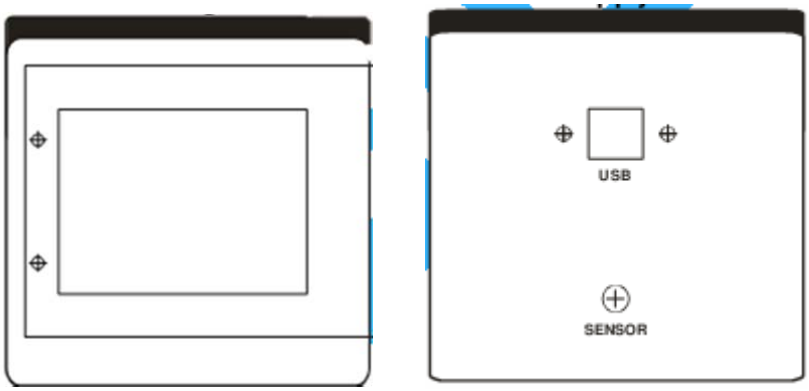
فرکانس متر:

اصول کار اولیه فرکانس متر مبتنی است بر خاصیت رزونانس با ضریب کیفیت بالا در حفره‌های تشدید که به یک موجبر متصل شده است. سیگنال مایکروویو در موجبر بواسطه یک شکاف کوچک به محفظه تشدید کوپل می‌شود. هرگاه فرکانس تشدید محفظه، مساوی فرکانس سیگنال درون موجبر شود، حداکثر انرژی انتقالی از

موجبر به محفظه اتفاق خواهد افتاد. این پدیده سبب یک افت شدید در پاورمتر متصل به موجبر، می‌شود. فرکانس واقعی، با قرائت میکرومتر روی قطعه به دست می‌آید.

پاورمتر:

یک ترموکوپل می‌تواند انرژی مایکروویو را به یک ولتاژ قابل اندازه‌گیری DC تبدیل کند. این ولتاژ DC تقویت شده و به مبدل آنالوگ به دیجیتال داده می‌شود تا توان در LCD نمایش داده شود. نشانگر LCD، طوری تنظیم شده تا سطح توان داخل موجبر را نمایش دهد. پاور متر به یک اسیلاتور دی الکتریکی ۱۰,۵ گیگاهرتزی مجهز شده است. این دستگاه می‌تواند برای اندازه‌گیری‌های دو پورتی مورد استفاده قرار بگیرد. منبع DRO به کمک مدولاتور پین می‌تواند با سطح TLL یا CMOS در فرکانس‌های DC تا 10KHZ مدوله شود. این ویژگی می‌تواند در انتقال اطلاعات یا اتصال به SWRمتر مورد استفاده قرار بگیرد.



تضعیف‌کننده متغیر 20dB:

یک تضعیف‌کننده متغیر، تضعیفی متناسب با میزان نفوذ یک نوار مقاومتی داخل موجبر ایجاد می‌کند. تضعیف‌کننده متغیر برای کنترل سطح توان یا ایزوله کردن منبع از بار به کار می‌رود.

تضعیف‌کننده ثابت:

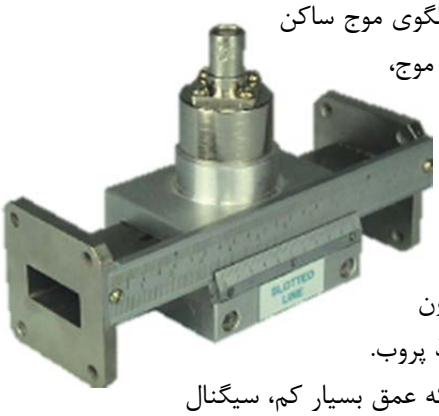
هدف تضعیف‌کننده ثابت در سیستم، ایجاد تضعیف ثابت به میزان 6dB است. تضعیف به وسیله نفوذ یک جاذب نازک، در بخشِ مستقیمِ موجبر استاندارد به دست می‌آید.

کوپلر جهتی

کوپلر جهتی که باعث می‌شود تا انرژی موجود در موجبر در یک جهت کوپل شود در واقع یک ابزار نمونه برداری از سیگنال مایکروویو است. یک کوپلر جهتی شامل دو موجبر است که کنار هم قرار گرفته و بوسیله روزنه هایی در محل اتصال، به هم کوپل شده اند. کوپلرهای جهتی بسیار در سیستم‌های مایکروویو استفاده می‌شوند تا توان تابیده شده و توان بازگشتی را اندازه بگیرند و برای اندازه‌گیری نسبت موج ساکن یا SWR مورد نیاز هستند.

جهت دهی که یک معیار شایسنگی برای کوپلر جهتی است، معیاری است تا مشخص کند که چقدر توان می‌تواند در جهت مورد نظر در موجبر مجاور کوپل شود. معمولا یک طرف موجبر مجاور یک بار تطبیق قرار می‌دهند تا انرژی هدایت شده در جهت غیر مطلوب را جذب کند. کوپلر جهتی که در این سیستم استفاده می‌شود، دارای فاکتور کوپلینگ 14dB و جهت دهی 30dB می‌باشد.

خط شکاف دار:



در اندازه‌گیری موج ساکن درون یک موجبر، خط شکاف دار استفاده می‌شود تا دامنه و فاز الگوی موج ساکن را اندازه‌گیری کند. بدست آوردن اطلاعات از الگوی موج ساکن به ما کمک می‌کند تا طول موج، نسبت موج ساکن و امپدانس یک خط انتقال را به دست آوریم. همانطور که از نام آن مشخص است، خط شکاف دار، یک شکاف در طول خط مرکزی سمت پهن موجبر دارد. این قطعه شامل یک پروب و یک کریستال دیود است که در طول شکاف می‌تواند حرکت کند. پروب از میدان درون موجبر نمونه برداری می‌کند و آشکارساز کریستالی، یک سیگنال یکسو شده متناسب با سطح میدان الکتریکی درون موجبر تولید می‌کند. عمق پروب درون موجبر در بهینه ترین نقطه ثابت شده و مقدار سیگنال آشکار شده، متناسب است با عمق نفوذ پروب.
کاربر باید بداند که عمق بهینه شده مورد استفاده در خط شکاف دار، ۲ میلیمتر است. زیرا که عمق بسیار کم، سیگنال آشکار شده را بسیار ضعیف می‌کند و عمق بسیار زیاد به طور قابل ملاحظه‌ای توان سیگنال اصلی درون موجبر را کاهش می‌دهد و حتی سبب اعوجاج میدان‌ها می‌شود.

تنظیم‌کننده با پیچ لغزان:

عمدتا کاربرد استفاده از تنظیم‌کننده با پیچ لغزان تطبیق بارها، آشکارسازها یا آنتن‌ها به امپدانس مشخصه موجبر است. تنظیم‌کننده با پیچ لغزان از یک پروب تشکیل شده است که روی یک ارابه قرار گرفته است و می‌تواند در طول دیواره‌های موجبر بلغزد. زمانی که میکرومترِ تنظیم‌کننده می‌چرخد، عمق پروب درون موجبر تغییر می‌کند. ترکیب عمق و مکان پروب سبب بازتاب درون موجبر با فاز و دامنه مشخص می‌شود.

آشکارساز کریستالی:

آشکارساز دیود کریستالی درون دیواره‌های موجبر قرار گرفته و به یک کانکتور هم محور متصل شده است. آشکارساز کریستالی در حقیقت یک دیود است که به میدان‌های الکترومغناطیسی درون موجبر پاسخ می‌دهد. دیود شامل یک قطعه نازک از سیلیکن و یک سیم تنگستن نازک و یک بدنه است. یک طرف سیلیکن مستقیم به بدنه متصل است و طرف دیگر آن به یک تکه سیم تنگستنی متصل شده است. عملکرد دیود با توجه به خواص متفاوت تنگستن و سیلیکن است. سیلیکن الکترون اضافی خیلی کمی دارد اما درون تنگستن الکترون‌های آزاد زیادی وجود دارد. بنابراین، وقتی ولتاژی به دیود در جهتی اعمال شود که الکترون‌ها را مجبور به رها کردن سیلیکون و ورود به تنگستن می‌کند، جریان خیلی کمی حاصل می‌شود. برعکس، وقتی جهت اعمال ولتاژ معکوس شود، جریان زیادی از تنگستن به سیلیکون وارد می‌شود. اینگونه دیود می‌تواند برای آشکارسازی انرژی مایکروویو، مورد استفاده قرار گیرد. دیود یک قطعه آسیب پذیر است که می‌تواند به سبب ولتاژ اضافی، آسیب ببیند. مشخصه یک آشکارساز کریستالی، (یا رابطه بین ولتاژ خروجی و جریان حاصل از توان RF ورودی) طوری است که قطعه به ازای یک بازه توانی مشخصی از ورودی، از قانون مربع پیروی می‌کند. قانون مربع، یعنی ولتاژ خروجی، با مربع ولتاژ ورودی متناسب است. فلذا می‌توان گفت که ولتاژ خروجی مستقیما متناسب است با توان ورودی.

بار تطبیق:

بار تطبیق در واقع تطبیقی برای خطوط انتقال مایکروویو است. از آنجا که موج‌های ساکن به دلیل عدم تطبیق امپدانس در یک سیستم ایجاد می‌شوند، بار تطبیق برای کاهش SWR در یک سیستم به کار می‌رود. این قطعه تمام سیگنال RF ورودی به موجبر را جذب می‌کند و اجازه بازتاب هیچ سیگنالی را از سمت اتصال کوتاهش نمی‌دهد.

مبدل کواکس به موجبر:

این قطعه بین موجبر و یک کواکس۵۰ اهم تطبیق ایجاد می‌کند. توان عبوری می‌تواند در هر دو جهت باشد. با این حال SWR در مبدل باید کمتر از ۱,۲ باشد تا اجازه عبور بیشترین توان را بدهد.

تی جادویی (هیبرید تی):

تی جادویی یک قطعه چهار پورتی است که از ترکیب دو تی E Plane و H plane ساخته شده است. توان تابیده شده به هر بازو، به طور مساوی بین دو بازوی مجاور تقسیم می‌شود اما هیچ توانی به بازوی مقابل نمی‌رسد. تی جادویی یک قطعه ضروری در میکسرهای متوازن، مدارهای کنترل اتوماتیک فرکانس و مدارهای اندازه‌گیری امپدانس می‌باشد.

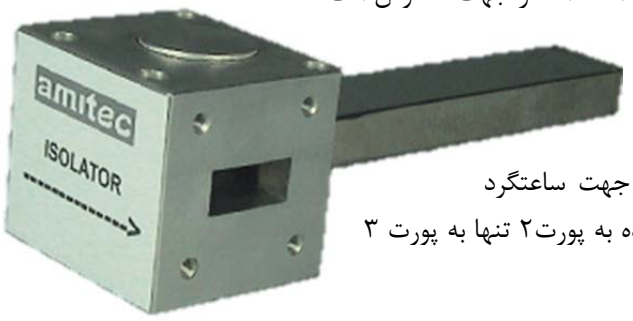
صفحه بازتاب دهنده:

این قطعه وسیله‌ای برای بازتاب دادن امواج الکترومغناطیسی در فضای آزاد هنگام اندازه‌گیری طول موج سیگنال است.

صفحه اتصال کوتاه:

هنگام اندازه‌گیری طول موج درون موجبر، یک صفحه اتصال کوتاه برای ایجاد اتصال کوتاه در طرف باز موجبر استفاده می‌شود.

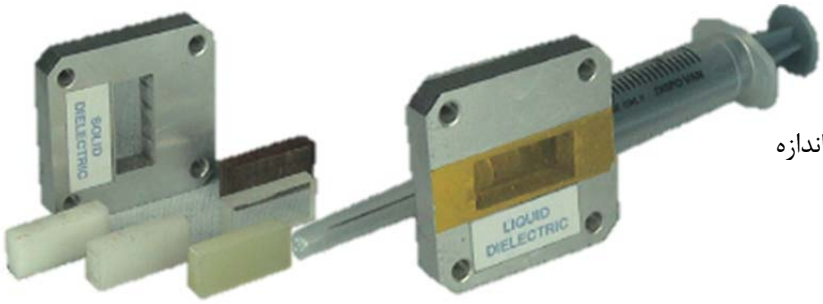
ایزولاتور/ سیرکولاتور:



ایزولاتور یک قطعه دو پورتی است که افت عبوری کمی در جهت مستقیم داشته اما در جهت معکوس افت زیادی دارد. بنابرین این قطعه فقط اجازه توان را در یک جهت می‌دهد. لذا این قطعه می‌تواند توان تابیده شده از بارهای عدم تطبیق را جذب کرده و منبع را از آن‌ها ایزوله کند.

سیرکولاتور، یک اتصال سه پورتی است که اجازه عبور توان را فقط در جهت ساعتگرد می‌دهد. موج تابیده شده به پورت۱ تنها به پورت۲ می‌رود و موج تابیده شده به پورت۲ تنها به پورت ۳ می‌رود و به همین ترتیب.

دی الکتریک جامد و مایع:



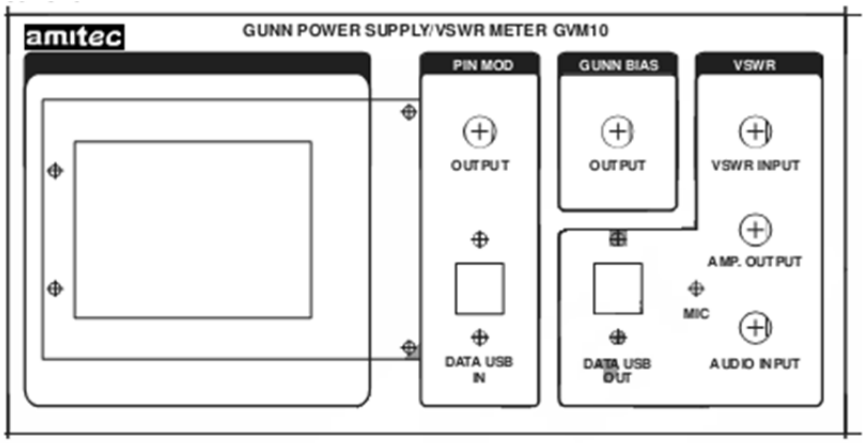
این سلول یک محفظه موجبری است که می‌تواند برای نگهداری دی الکتریک‌های مایع و جامد به کار رود، تا ثابت دی الکتریک آن‌ها و تانژانت تلفات آن‌ها اندازه گرفته شود.

شیفت دهنده فاز:

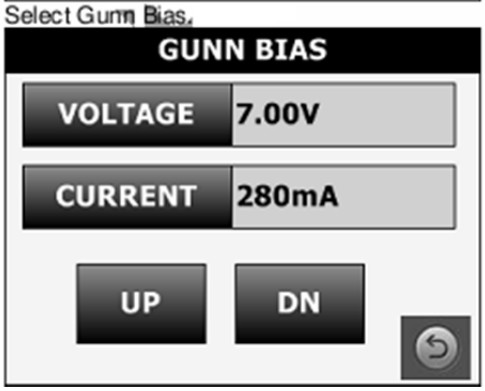
این قطعه شامل یک پره دی الکتریک است که درون یک موجبر قرار گرفته تا فاز سیگنال مایکروویو را در پورت خروجی تغییر دهد.

منبع تغذیه گان/ SWR متر:

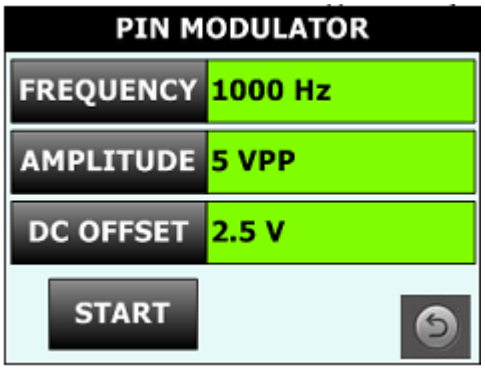
منبع تغذیه گان، یک موج مربعی 1KHz تولید می‌کند تا پین دیود را مدوله کند تا SWR متر بتواند آن را آشکار کند. به علاوه یک میکروفن درون آن قرار گرفته تا بتوان بدان وسیله هم پین دیود را مدوله کرد. همچنین یک کانکتور USB در این دستگاه تعبیه شده تا داده‌های سریال ورودی از PC را به سیگنال مدوله کننده پین دیود، اعمال کند. این دستگاه شامل یک منبع تغذیه DC با نویز کم برای گان دیود است که دارای صفحه نمایش دیجیتال برای نمایش ولتاژ و جریان نیز می‌باشد.



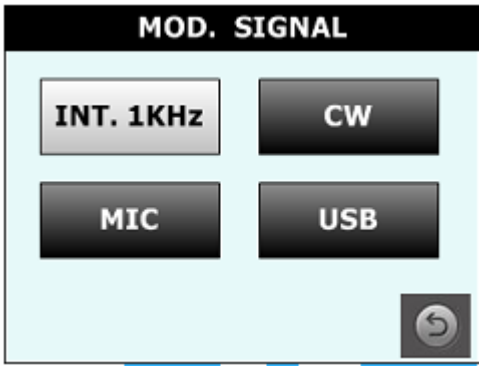
Select Gunn Bias.



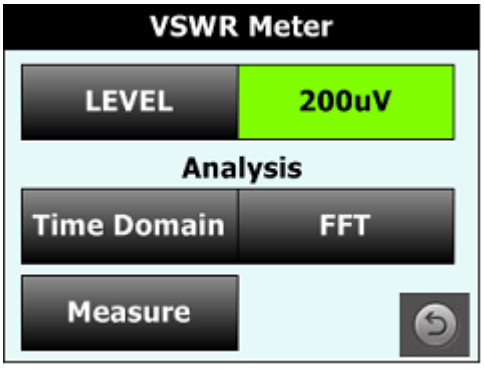
کلید UP در منوی GUNN BIAS فشرده، تا ولتاژ به ۷ولت برسد. افزایش ولتاژ تا ۷ ولت عمدا به آرامی صورت می‌گیرد تا آسیبی به گان دیود نرسد. صفحه نمایش بالا، جریان مصرف شده توسط گان دیود را حدود ۲۸۰میلی آمپر نشان می‌دهد.



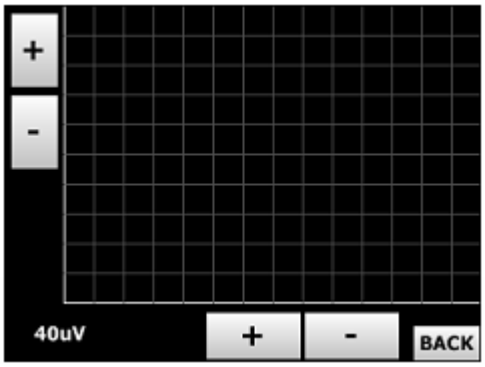
Frequency را در بخش Pin Modulator روی 1000Hz بگذارید، دامنه را روی 5v و آفست dc را روی 2.5v قرار دهید.



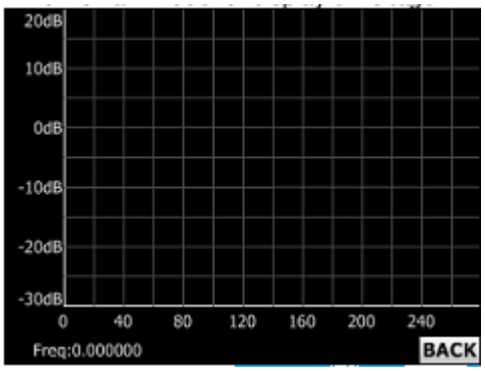
1KHz را بعنوان سیگنال مدوله کننده برای پین مدولاتور انتخاب کنید.



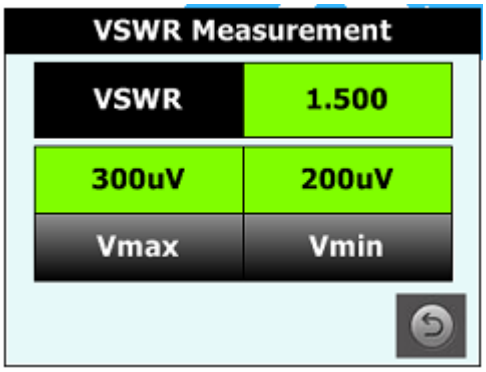
VSWRمتر ولتاژ لحظه‌ای را با سطح 200uv نمایش می‌دهد. شما می‌توانید حوزه زمان یا FFT را برای به تصویر کشیدن ولتاژ لحظه‌ای انتخاب کنید.



حالت حوزه زمان، برای نمایش ولتاژ



حالت FFT برای نمایش ولتاژ



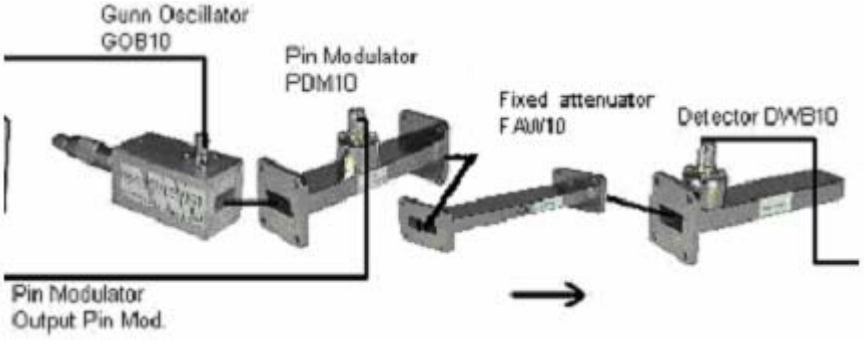
با فشردن دکمه Measure وارد بخش اندازه‌گیری می‌شوید.

در این بخش، برای اندازه‌گیری VSWR، می‌بایست دو کمیت Vmax و Vmin مشخص شوند. در صورت فشرده شدن Vmax، ولتاژ فعلی به عنوان ولتاژ ماکزیمم ذخیره شده و با فشردن Vmin، ولتاژ فعلی به عنوان ولتاژ مینیمم ذخیره می‌شود و دستگاه می‌تواند VSWR را محاسبه نماید.

VSWR متر دو ورودی دارد.

یک ورودی VSWR از نوع BNC ، در پنل جلوی دستگاه است که برای خواندن SWR به کار می‌رود. خروجی دمدوله شده از آشکارساز یا خط شکاف دار، توسط یک فیلتر میان گذر با فرکانس مرکزی 1KHz و پهنای باند 100Hz فیلتر شده و توسط یک تقویت کننده با بهره بالا تقویت می‌شود. این سیگنال از چندین تضعیف‌کننده می‌گذرد تا به پردازنده داخلی می‌رسد. هر تضعیف‌کننده، توان سیگنال ورودی را ۱۰برابر یا 10dB کم می‌کند. در نهایت این سیگنال به یک سیگنال DC تبدیل شده تا در نمایشگر دستگاه نشان داده شود. پاسخ دستگاه متناسب با خاصیت قانون مربعِ آشکارساز کالیبره شده است. VSWR می‌تواند مستقیما بدین شکل خوانده شود که: ابتدا با فشردن Vmax برای ماکزیمم مقدار خوانده شده در خط شکافدار و سپس با فشردن Vmin برای ثبت مینیمم مقدار آن، می‌توان VSWR را مشاهده کرد.

ورودی دیگر، یک ورودیِ کم نویزِ پهن باند است که سیگنال‌های در بازه بین ۲۰هرتز تا ۱۵کیلوهرتز را تقویت می‌کند. این سیگنال تقویت شده و برای ارتباطات صوتی به بلندگو داده می‌شود. همچنین این سیگنال به مقایسه کننده‌هایی فرستاده می‌شود تا سیگنالی که به صورت ASK دمدوله شده را به یک شکل موج دیجیتال تبدیل کنند. این شکل موج دیجیتال، همان داده‌های سریالی است که با پورت سریال PC همخوانی دارد.



تنظیمات تجهیزات:

۱. دکمه UP را در منوی گان بایاس فشرده تا ولتاژ به ۷ ولت برسد.
۲. خروجی BNC گان بایاس را به گان اسیلاتور بزنید. میکرومتر گان اسیلاتور را حوالی 10GHz تنظیم کنید.
۳. منبع تغذیه /VSWR متر را از پنل پشت روشن کنید. بالا بردن ولتاژ تا ۷ولت. این عمل به عمد آهسته انجام می‌شود تا گان دیود آسیب نبیند.
۴. پین مدولاتور را به خروجی فلنج گان اسیلاتور بزنید.
۵. خروجی BNC ی که روی آن Pin Mod نوشته را به اسیلوسکوپ وصل کنید. فرکانس را ۱۰۰۰هرتز و دامنه را ۵ولت و آفست را ۲,۵ ولت بگذارید.
۶. این کار اطمینان می‌دهد که سیگنال مدوله کننده، ۱کیلوهرتز باقی می‌ماند. می‌توانید این سیگنال را در اسکوپ ببینید.
۷. حالا خروجی BNC پین مدولاتور را از اسکوپ جدا کرده و آن را به BNC موجبری پین مدولاتور بزنید.
۸. تضعیف‌کننده ثابت یا ایزولاتور را به خروجی پین مدولاتور متصل کنید.
۹. حالا تضعیف‌کننده متغیر را در خروجی ایزولاتور قرار دهید. میکرومتر را کاملا بیرون قرار دهید. این باعث کمینه تضعیف و بیشینه عبور توان می‌شود.
۱۰. حالا فرکانس متر را به خروجی تضعیف‌کننده متغیر بزنید.
۱۱. آشکار ساز موجبر را به خروجی فرکانس متر بزنید.
۱۲. حالا BNC خروجی آشکارساز موجبری را به ورودی BNC در VSWRمتر بزنید.
۱۳. جهت نمایش لحظه ای VSWR، می‌توان با فشردن Vmax بیشینه ولتاژ را ثبت کرده و سپس با فشردن Vmin کمینه ولتاژ را انتخاب کرد.

کاربری:

۱. برای افزایش قابلیت اطمینان در اندازه‌گیری، اتصال هر قطعه مایکروویو، باید درست باشد و قواعد زیر در آن رعایت شود:

الف) مرکز مستطیل موجبرها باید تراز بوده و گوشه‌ها هم بر هم منطبق باشند.

ب) دو فلنج باید با چهار پیچ و مهره، محکم به هم چفت شده تا اطمینان حاصل شود که امواج نشت نمی‌کنند.

۲. قطعات این آزمایشگاه، نباید برای اهداف آزمایشی دیگری استفاده شوند.

۳. هیچ یک از قطعات نباید بیفتند یا ضربه ببینند.

۴. آن‌ها را از رطوبت و حرارت دور نگهدارید.

۵. می بایست از نگهداری آن‌ها در محیط‌های غبار آلود اجتناب کرد و پس از استفاده در سرجای خودشان قرار گیرند.

۶. قبل از بستن برای آزمایش، بررسی کنید که آیا ماده‌ای خارجی به ورودی یا خروجی موجبرها چسبیده است یا نه. در صورت وجود، آن‌ها را برطرف کنید.

۷. هنگامی که اسیلاتور نوسان می‌کند، نباید از خروجی آن به داخل قطعه نگاه کرد.

به خاطر اینکه اسیلاتور در این مجموعه آزمایشی توان کمی دارد، خروجی آن برای سایر قسمت‌های بدن خطرناک نیست. اما ممکن است به چشم‌ها آسیب بزند.

نحوه استفاده از پاورمتر:

پاور متر این آزمایشگاه، تا ده‌ها میلی وات توان را از طریق پروب اندازه‌گیری می‌کند. اگر توانی بیشتر از ۱۰۰میلی وات مستقیما بدون تضعیف اندازه‌گیری شود، ممکن است آشکار ساز حرارتی آسیب ببیند. پاورمتر توان مطلق را اندازه می‌گیرد و بر خلاف SWRمتر نیازی به مدولاسیون ندارد.

این دستگاه، قابلیت اندازه‌گیری در بازه فرکانسی 8.2GHz تا 12.4GHz را دارد و محدوده دینامیکی آن از 30dBm- تا 20dBm+ است.

نحوه استفاده از منبع تغذیه گان

منبع تغذیه گان، یک ولتاژ DC آرام بالارونده با ولتاژ ۸تا۱۰ ولت تولید می‌کند تا دیود گان را بایاس کند. این اسیلاتور، با اعمال موج مربعی 1KHz برای بایاس پین مدولاتور، سیگنال موج پیوسته خروجی گان را مدوله می‌کند. این پوش AM اجازه می‌دهد که سیگنال باند X، بوسیله دمدولاسیون با یک دیود در آشکار ساز، آشکار شود. سیگنال 1KHz دمدوله شده، متناسب با سطح توان سیگنال باند X است.

آزمایش نخست: آشنایی با تجهیزات

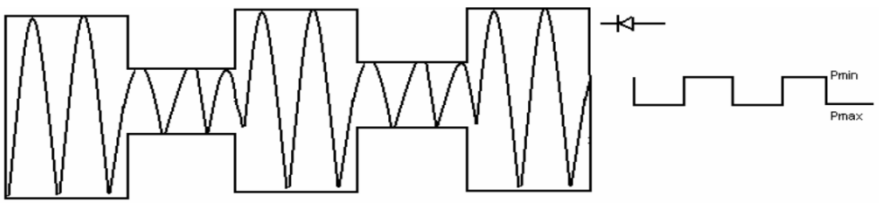
بخش اول:اندازه‌گیری توان و تضعیف، پین مدولاتورها و آشکارسازهای کریستالی

به طور کلی برای انجام انواع آزمایش‌ها در آزمایشگاه به دو چیز نیاز است. یکی سیگنال ژنراتور مایکروویو و دیگری یک آشکارساز که بتواند سیگنال را در نقطه مورد نظر آشکار کند. وظیفه سیگنال ژنراتور مایکروویو در این آزمایشگاه به عهده گان اسیلاتور می‌باشد. با ساختمان و مشخصه این قطعه در فصل آخر بیشتر آشنا خواهید شد. در اینجا فقط لازم است بدانید که این قطعه، یک قطعه تک پورتی است که هنگامی که به آن یک ولتاژ DC مناسب اعمال شود، می‌تواند سیگنالی در باند X تولید کند. فرکانس این سیگنال و توان آن به ترتیب با چرخاندن پیچ تنظیم و تغییر ولتاژ تغذیه قابل تنظیم می‌باشد.

پس از اینکه به مدار، سیگنالی اعمال شد، لازم است قطعه‌ای در مکان مورد نظر جهت آشکار سازی سیگنال تعبیه شود.

در این آزمایشگاه، به دوشکل می‌توان، توان سیگنال مایکروویو را آشکار کرد: یکی آشکار ساز کریستالی و دیگری پاورمتر. آشکار ساز کریستالی یک قطعه تک پورتی است که در خروجی BNC آن همواره ولتاژی DC، متناسب با توان ورودی به دهانه موجبری، مشاهده می‌شود. این ولتاژ می‌تواند به وسیله ولتمتر، اسیلوسکوپ و یا دستگاه VSWRمتر قرائت شود. با ساختمان و نحوه عملکرد این قطعه هم در فصل آخر بیشتر آشنا خواهید شد. پاورمتر هم یک دستگاه اندازه‌گیری توان است. این دستگاه شامل یک سنسور ترموکوپلی است که به دهانه موجبر وصل شده تا توان خروجی از آن پورت را اندازه بگیرد.

در صورتی که در مسیر ورودی سیگنال مایکروویو به سیستم، یک پین مدولاتور قرار دهیم، می‌توانیم ورود یا عدم ورود سیگنال مایکروویو به سیستم را کنترل کنیم. پین مدولاتور یک قطعه دو پورتی موجبری است که در وسط آن یک کانکتور BNC تعبیه شده است. در صورتی که به این کانکتور، ولتاژی اعمال شود، پین مدولاتور اجازه عبور توان را بدون هیچ افتی می‌دهد، و در صورتی که ولتاژی به آن اعمال نشود، پین مدولاتور اجازه عبور توان را نخواهد داد. در صورتی که به جای ولتاژ ثابت، یک سیگنال مربعی با فرکانس 1KHz به پین مدولاتور اعمال شود، عملا سیگنال مایکروویوِ ورودی به سیستم، با فرکانس 1KHz قطع و وصل می‌شود. به عبارتی سیگنال مایکروویو مطابق شکل، با سیگنال مربعی 1KHz مدوله می‌شود.



مدولاسیون موج مربعی وآشکار سازی

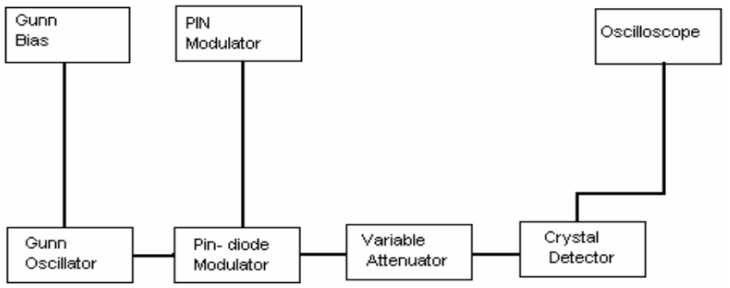
از آنجا که در آزمایشگاه، اسیلوسکوپی نداریم که بتواند سیگنال‌های باند X را نمایش دهد، با انجام این مدولاسیون، و مشاهده سیگنال آشکار شده در اسیلوسکوپ، می‌توان وجود یا عدم وجود سیگنال مایکروویو و همچنین توان آن را مشاهده کرد.

لذا توصیه می‌شود در تمام آزمایش ها، خروجی آشکار ساز را به جای SWRمتر به اسیلوسکوپ متصل کرده تا علاوه بر توان، پوش سیگنال مایکروویو را هم ببینید..

تضعیف‌کننده متغیر وسیله‌ای پر استفاده در آزمایشگاه است. استفاده از آن در تمام آزمایش‌ها توصیه می‌شود. زیرا گاهی برخی از قطعات، نسبت به سطح توان بالا حساس هستند و ممکن است آسیب ببینند. لذا با استفاده از تضعیف‌کننده متغیر می‌توان کنترل خوبی روی توان ورودی به سیستم داشت.

توصیه می‌شود در تمام آزمایش ها، جهت حفاظت از گان اسیلاتور، پس از گان اسیلاتور یک ایزولاتور قرار دهید. این کار، گان اسیلاتور را در برابر توان‌های بازگشتی که به دلیل عدم تطبیق، مدار باز و یا اتصال کوتاه ممکن است رخ دهد، مصون نگه می‌دارد.

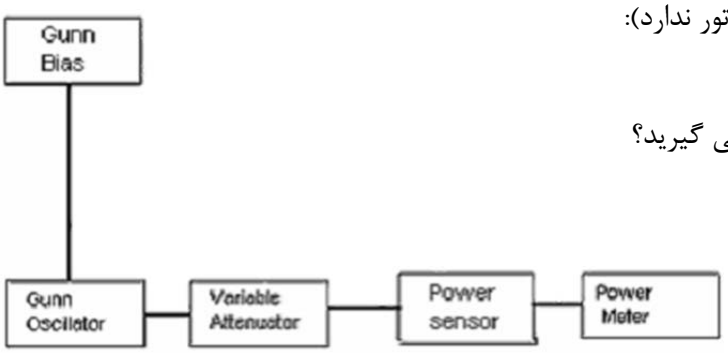
مراحل انجام آزمایش:



دیاگرام ست آپ برای مدولاسیون موج مربعی

۱. ست آپ را مطابق شکل زیر ببندید:
۲. تضعیف‌کننده متغیر را روی 10dB تنظیم کنید.
۳. منبع تغذیه گان را روشن کرده و ولتاژ 7v را به گان اسیلاتور اعمال کنید.
۴. مولد موج مربعی را روی خروجی 1KHz و 2Vp-p تنظیم کنید.
۵. به ازای تضعیف های مختلف، توان را بخوانید.
۶. تضعیف‌کننده را در یک وضعیت ثابت قرار داده، تغذیه گان اسیلاتور را تغییر دهید و خروجی را مشاهده نمایید.
۷. خروجی آشکار ساز کریستالی را از اسیلوسکوپ جدا کرده و به SWRمتر متصل کنید. مراحل ۵و۶ را تکرار کرده و خروجی را در منوی VSWR مشاهده نمایید.
۸. آشکار ساز کریستالی را با سنسور پاورمتر جایگزین کنید.
۹. پاورمتر را روشن کرده و پس از طی شدن زمان Warm up، مراحل ۵و۶ را تکرار کرده و به ازای تضعیف‌های مختلف، توان را یادداشت نمایید.
۱۰. آشکار ساز کریستالی را جایگزین سنسور پاور متر نمایید.
۱۱. مراحل ۳و۴ را انجام دهید.
۱۲. حال تغذیه گان اسیلاتور را قطع کنید. یعنی کابل را از کانکتور BNC گان اسیلاتور جدا کنید. (پین مدولاتور همچنان روشن باشد)
۱۳. در خروجی چه مشاهده می‌کنید؟ چرا؟

بررسی اثر مدولاسیون بر توان انتقال داده شده:



۱. ست آپ روبرو را ببندید (توجه کنید که پین مدولاتور ندارد):
۲. به ازای تضعیف های مختلف توان را اندازه بگیرید.
۳. با گام ۹ مرحله قبل مقایسه نمایید. چه نتیجه‌ای می گیرید؟

بخش دوم: اندازه گیری توان و تضعیف و معرفی کوپلر جهتی

اندازه‌گیری توان:

به طور کلی به دو روش می‌توان توان را اندازه گرفت: روش مستقیم، با استفاده از کوپلر جهتی.

روش مستقیم: در این روش، سنسور، یا آشکارساز کریستالی، مستقیما به دهانه موجبر متصل می‌شود

با استفاده از کوپلر جهتی: همانطور که می‌دانید، ویژگی مهم کوپلرها این است که مقداری از توان وارد شده را به بازوی کوپل انتقال می‌دهند. در صورتی که بخواهیم توان وارد شده به یکی از پورت‌های یک قطعه را اندازه بگیریم، می‌توانیم در مسیر عبور توان، یک کوپلر جهتی گذاشته و با اتصال آشکار ساز یا سنسور پاورمتر، توان را از بازوی کوپل اندازه بگیریم. سپس عدد به دست آمده را در مقیاس خطی تقسیم بر ضریب کوپلیگ و در مقیاس لگاریتمی منهای ضریب کوپلیگ کنیم تا مقدار واقعی توان عبوری به دست آید.

اندازه‌گیری تضعیف:

اگرچه در حالت کلی تضعیف به معنی کاهش یا تقلیل چیزی است، اما در مایکروویو به طور خاص به نسبت بین توان ورودی و خروجی اطلاق می‌شود.

$$A(dB) = 10log\frac{P_1}{P_2}$$

که در آن P_1 توان ورودی و P_2 توان خروجی است.

تلفات عبوری، اگرچه به لحاظ ریاضی همان تضعیف است، اما مفهومی کاملا متفاوت دارد. تضعیف در سیستم عمدا و با هدف قبلی انجام می‌شود، در حالی که تلفات عبوری یک اتفاق نامطلوب است. تلفات در سیستم به خاطر قطعات فیزیکی غیر ایده‌آل اتفاق می‌افتد.

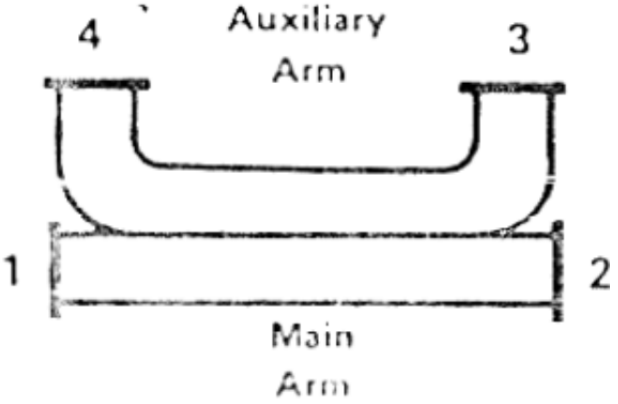
در موجبرهای مایکروویو دو روش مشهور اندازه‌گیری عبارتند از: نسبت توان و جایگزینی RF

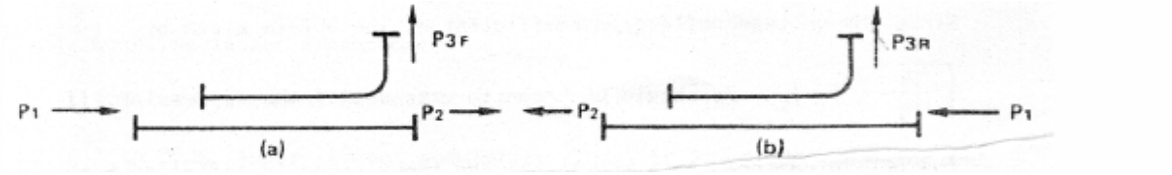
روش نسبت توان: در این روش، ابتدا توان ورودی به قطعه اندازه گرفته می‌شود، سپس قطعه مورد نظر، مابین سنسور پاورمتر یا آشکارساز کریستالی، قرار می‌گیرد و توان خروجی از قطعه اندازه گرفته می‌شود. با تقسیم توان خروجی به توان ورودی، می‌توان افت عبوری آن قطعه را اندازه گرفت.

روشن جایگزین RF: ابتدا توان خروجی از DUT اندازه‌گیری می‌شود. سپس DUT با تضعیف‌کننده متغیر کالیبره، جایگزین می‌شود. تضعیف‌کننده متغیر را تا جایی که سطح توان با حالت قبل یکی به دقت تنظیم می‌کنیم. حال مقدار تضعیف DUT به سادگی با تضعیف‌کننده متغیر برابر است. این مقدار را از روی تضعیف‌کننده می‌خوانیم.

کوپلر جهتی:

کوپلر جهتی نشان داده شده در شکل اساسا یک ابزار نمونه‌برداری می‌باشد که انعکاسی به سیستم های اصلی وارد نمی‌کند. ساختار فیزیکی کوپلرهای جهتی را میتوان بصورت یک خط انتقال به همراه یک پورت ورودی اما دو پورت خروجی تصور کرد. جهت دهی کوپلر های جهتی تنها اجازه عبور انژری در یک جهت را می‌دهد.





جهت نمونه برداری کوپلر جهتی

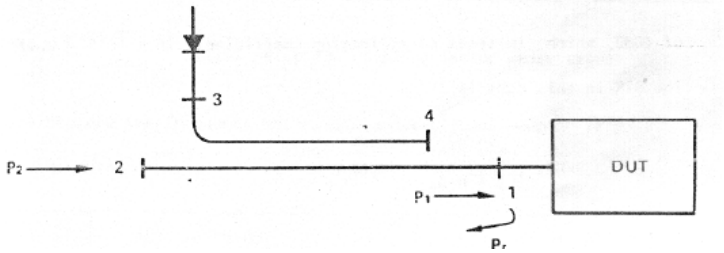
۱.امواج تصادفی ۲.امواج برگشت شده

خصوصیات اساسی یک کوپلر جهتی در شکل بالا به صورت گرافیکی ارایه شده است. توجه شود که یک انتهای کوپلر جهتی دارای یک پایانه تطبیق است.

ضریب کوپلینگ و جهت دهی که مهمترین معیارهای شایستگی کوپلر جهتی هستند به صورت زیر تعریف می‌شوند:

ضریب کوپلینگ : $10log\frac{P_1}{P_{3F}}$ (dB)

جهت دهی : $10log\frac{P_{3F}}{P_{3R}}$ (dB)



درهنگام اندازه گیری تلفات بازگشتی یک دستگاه یا یک قطعه، سیگنال ورودی در پورت دو اعمال می‌شود و قطعه تحت ازمایش(DUT) به پورت یک وصل شده است وسیگنال بازگشتی از پورت ۳ دریافت می شود.

توان در آشکارساز، زمانی که ضریب کوپلینگ برابر c است، عبارت است از: $P_3 = \frac{P_R}{C}$

زمانی که ضریب انعکاسی ولتاژ DUT بصورت زیر داده شده است:

$$\left(\frac{P_r}{P_1}\right)^{\frac{1}{2}} = \rho$$

P1 می‌بایست معلوم باشد تا از عبارت فوق بتوان استفاده کرد. اگر DUT با صفحه اتصال کوتاه جایگزین شود تمام توان ورودی باز خواهد گشت و بنابراین توان P1 در پورت ۳ ظاهر می شود. در حالیکه توان واقعی در پورت۳ برابر $\frac{P_R}{C}$ است. نسبت دو سیگنال آشکار شده در پورت۳ بصورت زیر است:

$$\frac{P_1}{C} \times \frac{C}{P_R} = \frac{1}{\rho^2}$$

نسبت بیان شده در بالا، تلفات بازگشتی نامیده می‌شود. دقت اندازه گیری تلفات بازگشتی وابسته به جهت دهی کوپلر می‌باشد. که تعیین می‌کند چه کسری از توان ورودی در پورت ۲ به پورت ۳ نشت کند.

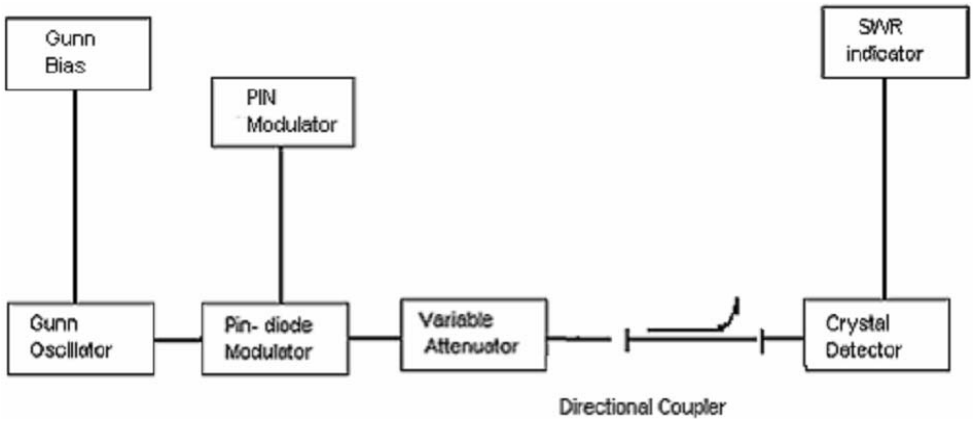
برای مثال جهت دهی ۴۰ دسی بل مطابق با تلفات بازگشتی ۴۰ دسی بل است ،که به بیانی ضریب انعکاس آن ۰,۰۱ است.

در این مثال مقدار swr برابر است با:

$$SWR = \frac{1 + 0.01}{1 - 0.01} = 1.02$$

اندازه‌گیری ضریب کوپلینگ

۱. تجهیزات را مطابق شکل زیر ببندید. تضعیف‌کننده متغیر را روی 20dB تنظیم کنید. (A1) سیگنال مدولاسیون ۱۰۰۰هرتزی را به مدولاتور دیود PIN اعمال کرده و اسیلاتور Gunn را روشن کنید. Vmax را در VSWRمتر بخوانید و این مقدار را به عنوان مرجع در نظر بگیرید.



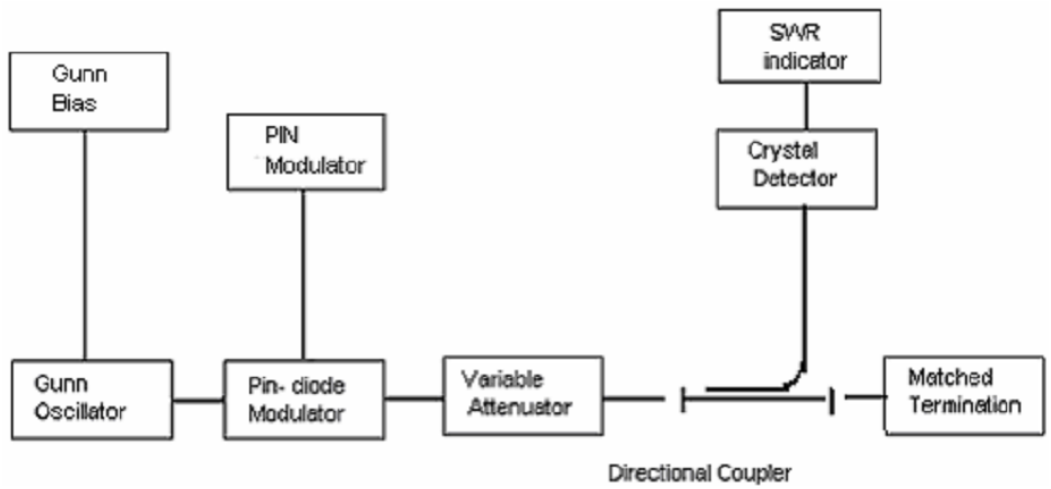
تنظیمات اولیه برای اندازه‌گیری فاکتور کوپلینگ

۲. تضعیف‌کننده متغیر را تغییر دهید تا همان مرجعی که در ۱ مشاهده شد، بدست آید.

A1 [dB]	A2 [dB]	A3 [dB]	A1-A2 [dB]	A4 [dB]	(A3-A4) [dB]

داده‌ها برای محاسبه فاکتور کوپلینگ

۳. جدول فوق را با تضعیفِ تضعیف‌کننده پر کنید. A1-A2 فاکتور کوپلینگ کوپلر جهتی می‌باشد.



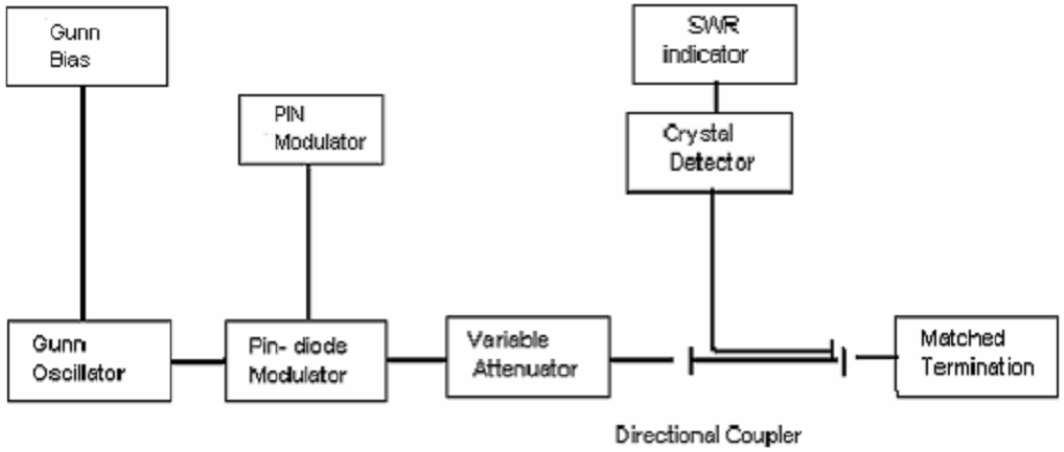
تنظیمات اولیه برای اندازه‌گیری فاکتور کوپلینگ

اندازه‌گیری جهت دهی

۱. تضعیف‌کننده را روی 20dB تنظیم کنید.(A3)

۲. Vmax را در SWRمتر بخوانید و این مقدار را به عنوان مرجع در نظر بگیرید.

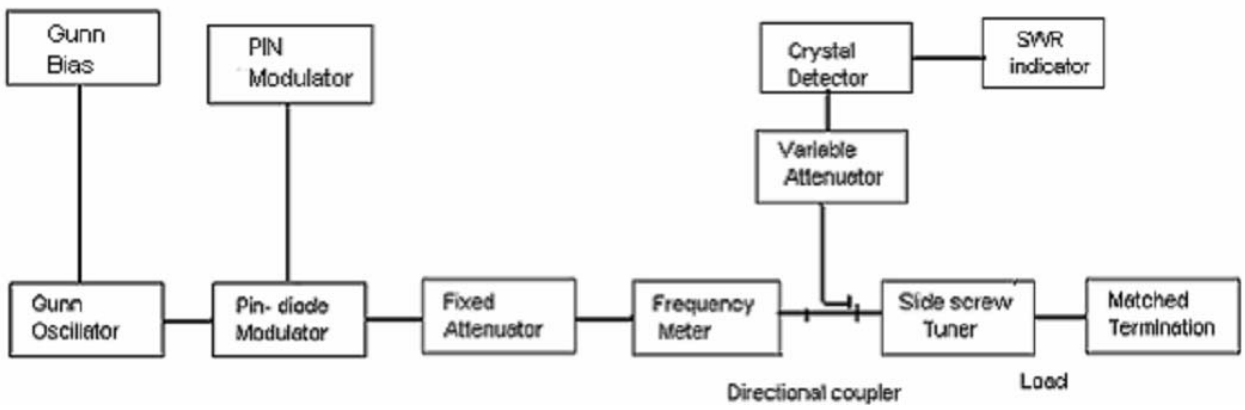
۳. جهت کوپلر را مطابق شکل زیر تغییر دهید.



شکل ۰-۱ دیاگرام تجهیزات برای اندازه‌گیری جهت دهی

تضعیف را کاهش داده تا به همان ولتاژی که در مرحله۲ رسیده بودید برسید. (A4)جهت دهی برابر است با dB(A3-A4). آن را حساب کنید.

اندازه‌گیری تلفات بازگشتی بار



تنظیمات، برای اندازه‌گیری تلفات بازگشتی

۱. تجهیزات را مطابق شکل بالا ببندید.

۲. عمق پروب خط شکاف‌دار را روی 5mm تنظیم کنید.

۳. تضعیف‌کننده را روی 0dB بگذارید(A5). Vmax را در SWRمتر یا اسکوپ، بخوانید و این مقدار را به عنوان مرجع در نظر بگیرید.

۴. تضعیف‌کننده را روی حداکثر تضعیف بگذارید. بار را با اتصال کوتاه جایگزین کنید.

۵. تضعیف را کم کنید تا به مرجع مرحله ۳ برسید. مقدار فعلی تضعیف‌کننده را یادداشت کنید(A6).

۶. تلفات بازگشتی= (A6-A5) dB

A5 [dB]	A6 [dB]	(A5-A6)+ [dB]	ρ	SWR

داده‌ها برای محاسبه تلفات بازگشتی

- آزمایش‌های بالا برای کوپلر bend طراحی شده اند. در صورتی که زمان کافی در اختیار دارید، می‌توانید پارامترهای کوپلر کراس را نیز به این روش اندازه بگیرید.

فصل دوم: اندازه‌گیری مشخصات موجبر مستطیلی

بخش نخست: انتشار امواج در موجبرها و موج ساکن

موجبر مایکروویر یک لوله توخالی فلزی با سطح مقطع مستطیلی یا دایروی است. در آزمایش‌های ما از موجبر مستطیلی استفاده می‌شود که تحلیل ریاضی آن در ادامه آمده است. فرض می‌شود کاربر اطلاعات پایه درباره معادله موج را دارد. موجبر دایروی هم به روش مشابه و با استفاده از مختصات استوانه‌ای آنالیز می‌شود. تحلیل خود را با معادله موج آغاز می‌کنیم:

الف) معادله موج

معادله موج مختصرشده به صورت زیر بیان می‌شود:

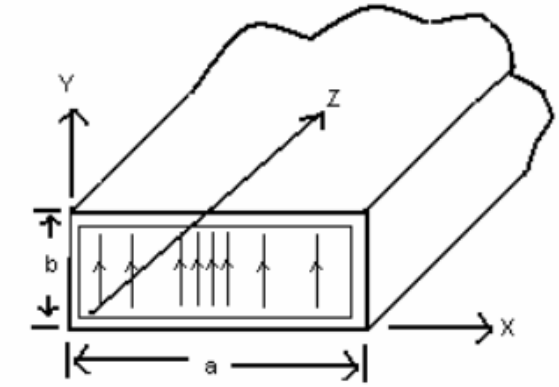
$$\partial^2\phi + k^2\phi = 0$$

که در آن $\phi(x, y, z)$ تابع موج اسکالر و k عدد موج است که در یک عایق کامل به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$k^2 = \omega^2\mu\varepsilon$$

در دستگاه مختصات مستطیلی معادله به شکل زیر در می‌آید:

$$\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial z^2} + k^2\phi = 0$$



موجبر مستطیلی در دستگاه مختصات مستطیلی

همان طور که در شکل نشان داده شده، دستگاه مختصات مستطیلی در این جا به گونه‌ای قرار گرفته که محور z جهت انتشار است.

هدف، به دست آوردن جوابی به فرم $f(x, y)\,g(z)$ است که در آن f فقط تابعی از z بوده و g فقط تابعی از x و y (یا هر مختصات متعامد مناسب دیگری) باشد.

با توجه به اینکه انتشار فقط در راستای z صورت می‌گیرد: $\{c_1 e^{-j\beta gz} + c_2 e^{+j\beta gz}\}$

اگر معادله را نسبت به ϕ و به روش جداسازی متغیرها حل کنیم خواهیم داشت:

$$\phi = \{A_1 cosk_x x + A_2 sink_x x\}\{B_1 cosk_y y + B_2 sink_y y\}$$

که در آن: $k_x{}^2 + k_y{}^2 = k^2$

موجی که در راستای مثبت محور z منتشر می‌شود با e^{-z} نشان داده می‌شود و موجی که با e^{+z} نشان داده می‌شود در راستای منفی محور z منتشر می‌شود.

سه نوع مد انتشار که برای ما اهمیت ویژه‌ای دارند عبارتند از:

مدهای TEM (transverse electromagnetic): در این مدها هر دو میدان الکتریکی و مغناطیسی بر راستای انتشار عمودند. بنابراین هیچ مولفه میدانی در راستای انتشار وجود ندارد. مدهای TEM در موجبرها وجود ندارند.

مد TE (transverse electric) یا مدهای H : در این مدها میدان الکتریکی در راستای z وجود ندارد اما میدان مغناطیسی در راستای Z داریم. بنابراین تمام مولفه‌های میدان می‌توانند از مولفه محوری میدان مغناطیسی (H_z) استخراج شوند.

مد TM (transverse magnetic) یا مدهای E : در این مدها میدان مغناطیسی در راستای z وجود ندارد اما میدان الکتریکی در راستای Z داریم. بنابراین تمام مولفه‌های میدان می‌توانند از مولفه محوری میدان الکتریکی (E_z) استخراج شوند.

مدهای TE و TM مدهای انتشار در یک موجبر توخالی هستند. در ادامه با استفاده از ریاضیات، مولفه‌های میدان را به دست می‌آوریم. فرض می‌کنیم دیواره‌های داخلی موجبر از جنس هادی کامل هستند. همچنین فرض می‌شود موجبر از عایق کامل پر شده است. چنین شرایطی برای ساده سازی پاسخ‌های میدان ضروری اند.

الف) مدهای TE_{mn}

معادله فوق می‌تواند برای H_z و فقط با در نظر گرفتن راستای z+ نوشته شود.

شرایط مرزی در دیواره‌های موجبر اعمال می‌شود: مولفه عمودی میدان مغناطیسی عرضی در دیواره‌های موجبر که هادی کامل هستند حذف می‌شود. همچنین مولفه مماسی میدان الکتریکی در دیواره‌های موجبر حذف می‌شود. سپس شرایط مرزی D را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$\frac{\partial D}{\partial x} = 0 \quad at \quad x = 0, a$$
$$\frac{\partial D}{\partial y} = 0 \quad at \quad x = 0, b$$

اعمال دو معادله فوق به معادله قبلی، مقادیر زیر را برای ثابت‌های معادله مشخصه تعیین می‌کند:

$$K_x = \frac{n\pi}{a} \quad n=0, 1, 2, \ldots$$
$$K_y = \frac{m\pi}{b} \quad m=0, 1, 2, \ldots$$

با استفاده از روابط بالا و جایگذاری $A_{nm} = A_1 B_1$ پاسخ D به صورت زیر است:

$$D = A_{nm}\cos(\frac{n\pi x}{a})\cos(\frac{m\pi y}{b})$$

پس فرم نهایی H_z به صورت زیر است:

$$H_z = A_{nm}\cos(\frac{n\pi x}{a})\cos(\frac{m\pi y}{b})$$

منظور از اعداد صحیح m و n تعداد نیم سیکل‌های تغییرات هر مولفه میدان نسبت به x و y است. به عبارت دیگر هر ترکیبی از m و n نشان دهنده یک شکل متمایز میدان در موجبر است.

مدهای TM: برای محاسبه پاسخ میدان در مدهای TM از روشی کاملا مشابه استفاده می‌شود. تنها تفاوت این است که این بار باید H_z صفر قرار داده شود.

ب) مشخصات موجبر مستطیلی

فرکانس قطع و طول موج قطع.

فرم نمایی e^{-z} نشان دهنده موجی است که در راستای $+z$ در حرکت است. رابطه

$\lambda_g = \sqrt{k^2 - {k_c}^2}$ را مجددا بررسی می‌کنیم.

$K>K_c$: λ_g حقیقی است و در واقع انتشار در راستای $+z$ داریم.

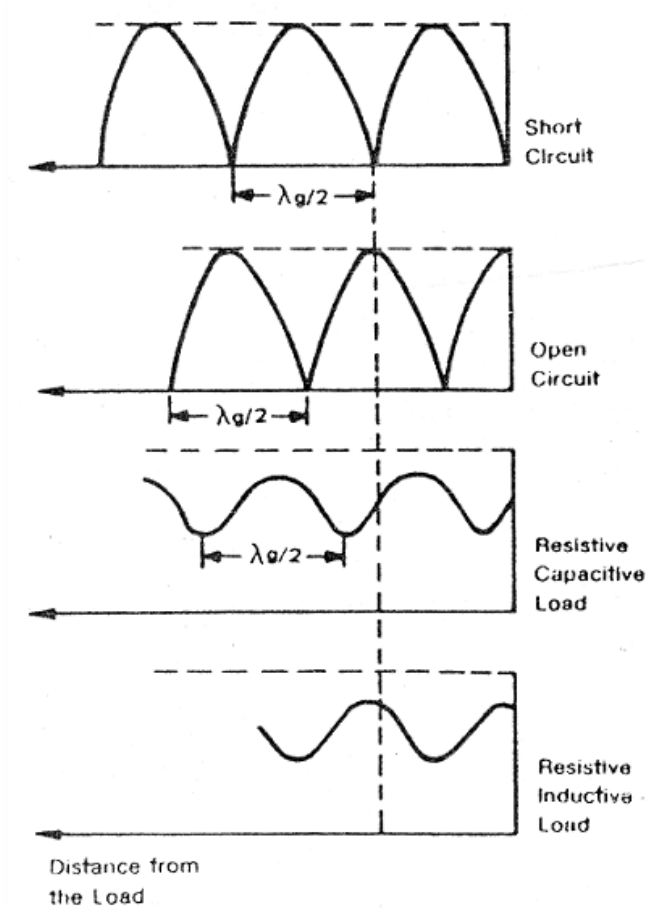
$K<K_c$: λ_g موهومی است و مد انتشار سریعاً در راستای $+z$ میرا می‌شود.

برای تضمین انتشار در موجبر، طول موج درموجبر بزرگتر از طول موج در فضای آزاد است.

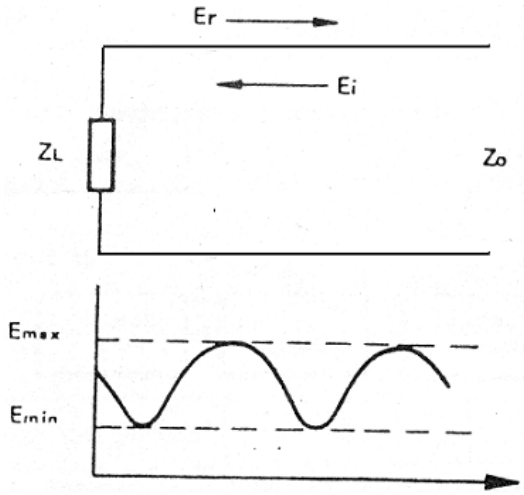
سرعت فاز: سرعت فاز یا سرعت یک نقطه ی فاز- ثابت در موجبر به سادگی از فرکانس و طول موج در موجبر به دست می‌آید. لازم به ذکر است سرعت فاز در موجبر می‌تواند از سرعت نور در فضای آزاد یعنی $3 * 10^8$ فراتر رود.

موج‌های ساکن

در هر نقطه در طول یک خط انتقال، می‌توان تصور کرد که میدان الکترومغناطیسی به صورت جمع دو شکل موج است: یک موج رونده به سمت بار و دیگری به سمت مولد. علت بازتاب، عدم تطبیق امپدانس است. هر نقطه باز (شکاف) در خط انتقال، یک عدم تطبیق ایجاد می‌کند و باعث بازتابش می‌شود. دامنه و فاز موج بازتابی به امپدانس بار وابسته است. میزان تضعیف خط هم، بر دامنه موج بازتابی اثر می‌گذارد. تنها راه حذف بازتاب این است که یا خط بی نهایت بلند باشد یا خط و بار از نظر امپدانسی، تطبیق باشند. موج ساکن، از دو موج رونده در جهات مخالف، حاصل می‌شود. جمع برداری دو موج، نقاط کمینه و بیشینه‌ای روی الگوی موج ساکن در یک خط انتقال بی تلف ایجاد می‌کند.



در شکل زیر، ولتاژ شکل موج ساکن، در یک خط انتقال که دارای امپدانس مشخصه Z_0 و امپدانس بار Z_L است نشان داده شده است:



در شکل بالا، ضریب بازتاب مختلط عبارت است از:

$$\rho = \frac{E_r}{E_i} = \frac{\underline{Z} - Z_0}{\underline{Z} + Z_0}$$

که در آن:

E_r سیگنال بازتاب، E_I سیگنال تابش و $\bar{Z}$ امپدانس مختلط در نقطه داده شده است.

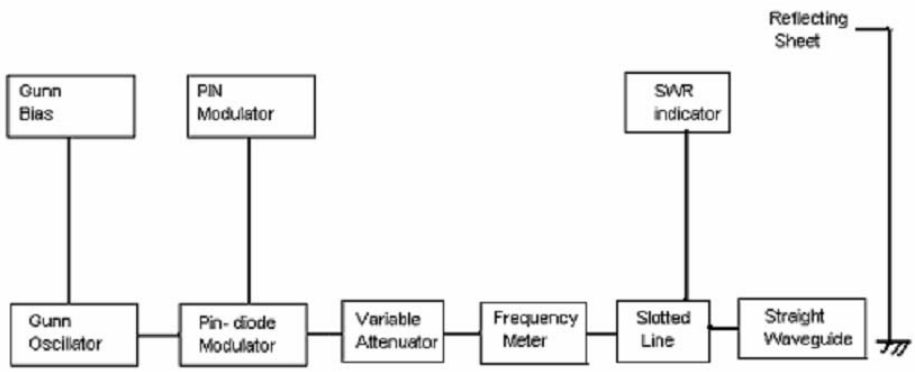
ρ مشاهده شده در بار، عبارت است از: $\rho_L = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$ بنابرین:

$$VSWR = S = \frac{E_{max}}{E_{min}} = \frac{[E_i] + [E_r]}{[E_i] - [E_r]}$$

$$\rho = \frac{S - 1}{S + 1}$$

اندازه‌گیری طول موج در فضای آزاد و در موجبر

۱. تجهیزات را مطابق شکل زیر ببندید:



آرایش تجهیزات برای اندازه‌گیری‌های فرکانس

۲. صفحه بازتاب دهنده را به سمت سرِ باز موجبر طوری حرکت دهید که صفحه بازتاب دهنده به صورت عمود بر موجبر قرار گرفته باشد. موج‌های ساکن در بین موجبر و صفحه بازتاب دهنده و در فضای آزاد ایجاد می‌شوند. با حرکت صفحه، الگوی موج ساکن با توجه به بازتاب‌ها از صفحه، تغییر می‌کند. پروبی که در خط شکاف‌دار قرار گرفته است، این تغییر در امواج ساکن را آشکار می‌کند. موقعیت عمودی سیگنال نمایش داده شده در اسکوپ را طوری تنظیم کنید که بالای موج مربعی روی صفر قرار گیرد. دلیل این تنظیم، منفی بودن خروجی آشکارساز کریستالیِ خط شکاف دار است. بنابراین توان سطح بالای این پالس در واقع کمتر از توان سطح پایین پالس است.دو مکان مجاور را پیدا کنید که دامنه آشکار شده در آن نقاط حداقل باشند. پروب را در خط شکاف‌دار حرکت ندهید. فاصله بین این دو نقطه متناسب است با نصف طول موج در فضای آزاد. این فاصله را در جدول ثبت کنید.

۳. خروجی خط شکاف‌دار را بوسیله صفحه اتصال کوتاه بپوشانید. موقعیت پروب را در خطوط شکاف‌دار، تغییر داده و جایی را بیابید که ولتاژ آشکارشده خروجی در آن، حداقل باشد. از آن نقطه، یک نقطه متوالی دیگر

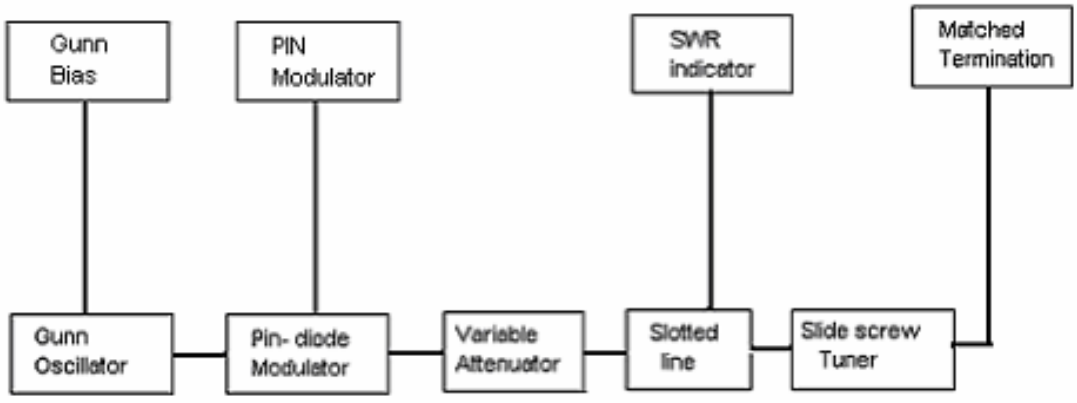
را نیز پیدا کنید که مجددا در آن جا ولتاژ، حداقل شده باشد. فاصله بین دو نقطه، نصف طول موج در داخل موجبر می‌باشد.

فرکانس					
λ اندازه‌گیری شده					
λ_g اندازه‌گیری شده					
λ محاسبه شده					
λ_g محاسبه شده					

مقایسه مقادیر محاسبه شده و اندازه‌گیری شده فرکانس، طول موج در فضای آزاد

اندازه‌گیری مقادیر کم و متوسط SWR

بار تطبیقی که قبل از آن، تنظیم‌کننده با پیچ لغزان قرار دارد، می‌تواند یک عدم تطبیق ایجاد کند. این عدم تطبیق باعث می‌شود که درون موجبر شکاف دار، موج ساکن ایجاد شود. در ادامه می‌خواهیم مشخصات این موج ساکن را اندازه بگیریم.



شکل ۰-۱دیاگرام تجهیزات برای اندازه‌گیری SWR

۱. ست آپ را مطابق شکل بالا ببندید:
۲. ولتاژ تغذیه گان را روی 7V تنظیم کنید.
۳. تضعیف‌کننده متغیر را روی 10dB بگذارید.
۴. گان اسیلاتور و پین مدولاتور را روشن کنید.
۵. پروب را در خط شکاف‌دار آن قدر جابجا کرده تا حداکثر ولتاژ را روی VSWRمتر یا اسیلوسکوپ مشاهده کنید

۶. پروب را به جایی ببرید که حداقل ولتاژ مشاهده شود. این مقدار را یادداشت کنید. و با استفاده از فرمول، VSWR را حساب کرده و در جدول یادداشت نمایید.

۷. مراحل بالا را برای سه عمق مختلف دیگر تکرار کنید.

عمق پروب (mm)				
VSWR				

جدول ۰-۱ عمق پروب بر اساس VSWR

اندازه‌گیری SWR زیاد، با استفاده از تضعیف‌کننده کالیبره شده

۱. عمق پروب تنظیم‌کننده با پیچ لغزان را حداکثر کنید.

۲. پروب را در طول شکاف حرکت داده تا یک مینیمم مشاهده شود.

۳. تضعیف‌کننده متغیر را روی مقداری تنظیم کنید که Vmax ، VSWR برابر 0dB شود. این مقدار را A1 بنامید.

۴. پروب را در طول شکاف آن قدر جابجا کنید و تضعیف‌کننده را تنظیم کنید تا همان مقدار حداکثر مرحله قبل حاصل شود. مقدار آن را برحسب dB بخوانید و آن را A2 بنامید و در جدول بنویسید.

۵. SWR را با استفاده از فرمول زیر حساب کنید.

$$SWR = 10^{\frac{A2-A1}{20}}$$

۶. مراحل را با یک عمق پروب دیگر تکرار کنید.

نفوذ پروب	A1 dB	A2 dB	SWR

اندازه‌گیری SWR با استفاده از تضعیف‌کننده کالیبره شده

می توانید آزمایش‌های قبل را در حالتی که در انتهای موجبر شکاف دار، صفحه اتصال کوتاه وصل کرده اید، هم انجام دهید و با سایر نتایج مقایسه نمایید. سعی کنید فرمول اخیر را اثبات نمایید.

بخش دوم: امپدانس

در یک خط انتقال با امپدانس مشخصه Z_0 ضریب انعکاس بین سیگنال واقعی و سیگنال بازتابی با توجه به معادله زیر تعریف می‌شود.

$$\boldsymbol{\rho = (\underline{Z} - Z_0)/(\underline{Z} + Z_0)}$$

که

$$\boldsymbol{\underline{Z} = R + jx} \quad : \quad \textbf{امپدانس بار متصل به خط}$$

$$\boldsymbol{\rho = [\rho]\varepsilon^{j\theta}} \quad : \quad \textbf{ضریب انعکاس مختلط}$$

دامنه $\boldsymbol{\rho}$ نسبت دامنه بین سیگنال واقعی و بازتابی است.

زاویه $\boldsymbol{\theta}$ مشخص کننده زاویه چرخش فاز در نقطه انعکاس است.

ولتاژ در هر نقطه روی خط انتقال مجموع برداری شکل موج‌های تابیده شده و بازتابی است. شکل موج‌های ولتاژ حاصل را الگوهای موج ایستا می‌نامند.

در حقیقت زمانی که دو شکل موج هم فاز با هم جمع می‌شوند تشکیل یک پیک در آن نقطه می‌دهد. همچنین زمانیکه دو شکل موج با فاز مخالف، با هم جمع می‌شوند یک دره یا یک مینیمم ولتاژ در آن نقطه مشاهده می‌شود. نسبت موج ولتاژ ایستا VSWR همان طور که در قسمت قبل آمد، به این صورت تعریف می‌شود :

$$VSWR = \frac{(E_{max})}{(E_{min})} = \frac{\left\{1 + \left(\frac{E_r}{E_i}\right)\right\}}{\left\{1 - \left(\frac{E_r}{E_i}\right)\right\}} = \frac{\{1 + (\rho)\}}{\{1 + (\rho)\}}$$

زاویه چرخش فاز ضریب انعکاس در فاصله d از بار به اینصورت مشخص می‌شود:

$$\theta = 2\pi \frac{d}{\lambda_g}$$

تعیین امپدانس بار، شامل سه مرحله‌ی زیر است:

۱) به دست آوردن داده‌ی موجبر با اندازه‌گیری دقیق.
۲) تعیین دامنه و فاز ضریب بازتاب
۳) محاسبه امپدانس بار

از اسمیت چارت در مرحله سوم برای تعیین امپدانس بار در هر نقطه از موجبر (یا به طور عمومی خط انتقال) با استفاده از دانستن ضرایب بازتاب، استفاده می‌شود.

اسمیت چارت یک نمایش گرافیکی از مشخصه انتقالی امپدانس طول خط انتقال است. مختصات چارت، رزیستانس و راکتانس نرمالیزه را می‌دهد. که به Z_0 امپدانس مشخصه موجبر نرمالیزه شده اند. دایره‌های VSWR معمولا در چارت رسم نشده اند، اما در صورت نیاز می‌توان آن‌ها را با پرگاری که هم مرکز با نقطه وسط چارت قرار گرفته، ایجاد کرد. توجه داشته باشید که مقیاس فاصله نوشته شده در محیط بیرونی دایره، با طول موج موجبر، نرمالیزه شده است. معمولا بهترین راه برای آموختن اسمیت چارت حل مسایل واقعی است. پس مثال زیر را بررسی می‌کنیم.

مثال: یک موجبر به یک امپدانس بار نرمالیزه شده $0.6 + 1.2j$متصل شده است. طول موج برابر ۴۲ میلیمتر است .

الف) امپدانس را در ۱۰میلیمتر از بار بیابید.

ب) فاصله بار از جایی که اولین مینیمم VSWR اتفاق می‌افتد را بیابید.

حل :

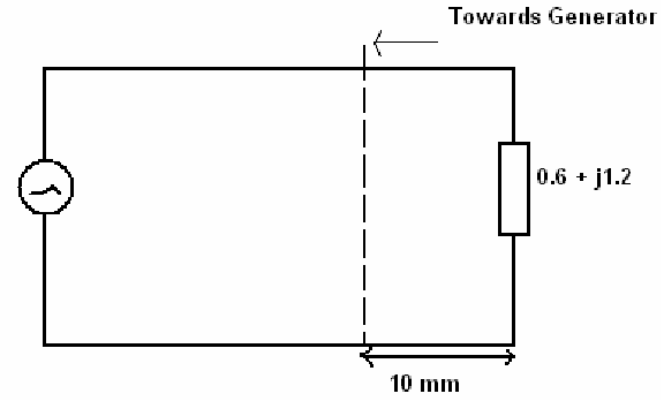
الف) با مراجعه به اسمیت چارت همان طور که در زیر نشان داده شده:

۱. نقطه ی A را روی چارت را که نشانگر امپدانس بار 0.6+1.2j است مشخص کنید .

۲. خطی مستقیم از 0 تا A رسم کنید. این خط، دایره فاصله را در 0.15λ به سمت مولد قطع می‌کند. حرکت به اندازه 10mm از بار برابر با حرکت از بار به اندازه $\frac{10mm}{42mm} = 0.238\lambda$ است.

۳. یک نقطه روی دایره فاصله مشخص کنید که برابر $0.15+0.238\lambda = 0.388\lambda$ باشد. خطی مستقیم از این نقطه تا 0 بکشید.

۴. یک دایره به شعاع A و مرکز 0 رسم کنید. امپدانس در نقطه B نشان دهنده امپدانس یک نقطه در 10mm دورتر از بار به سمت مولد لست. امپدانس نرمالیزه شده B برابر با 0.38-0.78j است.



Sample problem with the Smith Chart

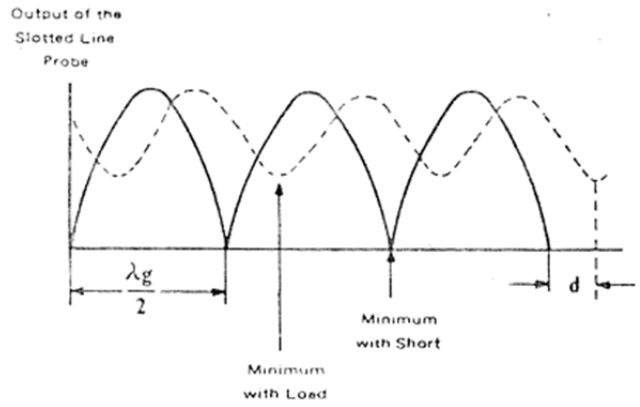
ب) نقطه C با VSWR برابر 4.3، جایی است که ماکزیمم الگوی VSWR اتفاق می‌افتد. اولین مینیمم در نقطه D اتفاق می‌افتد. فاصله بین نقطه A و نقطه D برابر $0.35\lambda = 0.5\lambda - 0.15\lambda$ است .

زمانیکه روی تعیین یک امپدانس ناشناخته کار می‌کنیم لازم است که یک صفحه مبنایی تنظیم کنیم که امپدانس نسبت به آن سنجیده شود. برای برای مثال، ترمینال‌های ورودی آن قطعه (که امپدانسش ناشناخته است) می‌توانند صفحه مبنا باشند. با گرفتن یک سطح مبنا امپدانس ناشناخته قابل اندازه‌گیری است.

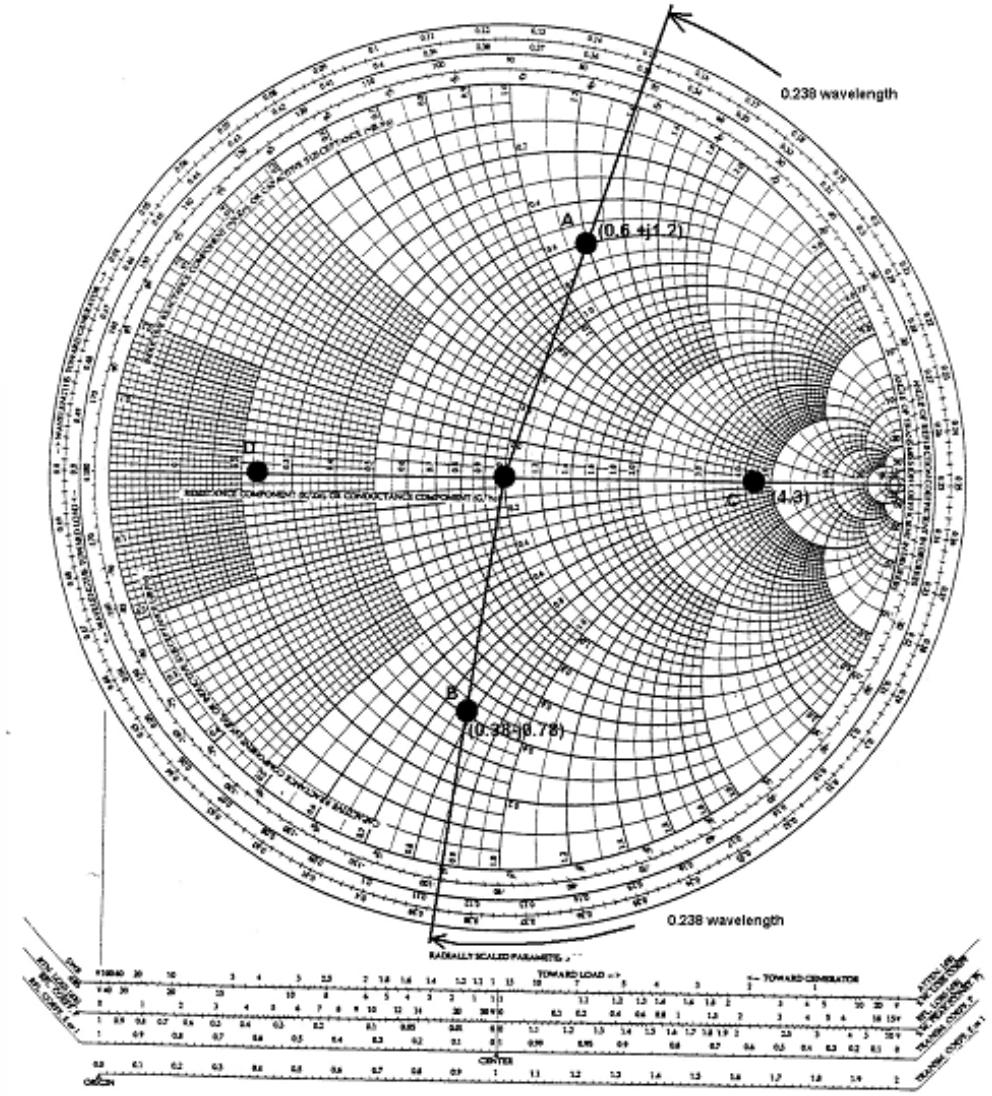
الف) امپدانس ناشناخته را به خط شکاف دار وصل کنید سپس VSWR و مکان مینیمم‌ها را بیابید.

ب) امپدانس ناشناخته را با صفحه اتصال کوتاه در خروجی خط شکاف‌دار جابجا کنید سپس فاصله بین مینیمم مقادیر مجاور را اندازه‌گیری کنید. فاصله به دست آمده باید برابر 0.5λ طول موج باشد .

پ) یکی از نقاط مینیمم را به عنوان مبنا مانند شکل زیر انتخاب کنید.



Fundamentals of Impedance Measurements



یک دایره VSWR روی اسمیت چارت مانند آنچه در شکل زیر نشان داده شده رسم کنید. امپدانس در محل مینیمم ولتاژ برابر $\frac{1}{SWR}$ است. زمانیکه اتصال کوتاه بر روی بار قرار داده شود، مینیمِم VSWR به سمت بار حرکت می‌کند. لذا امپدانس در بار با رسم یک خط مستقیم از نقطه‌ای به فاصله $\frac{d}{\lambda_g}$ از صفر، در خارجی ترین دایره، تا مرکز دایره VSWR به دست می‌آید. محل تقاطع دایره و خط مستقیم نشان دهنده ی امپدانس بار است.

توجه کنید که امپدانس خط در فاصله $\frac{\lambda_g}{2}$ ، λ_g ، $\frac{3\lambda_g}{2}$ و ... از بار، با امپدانس بار برابر است.

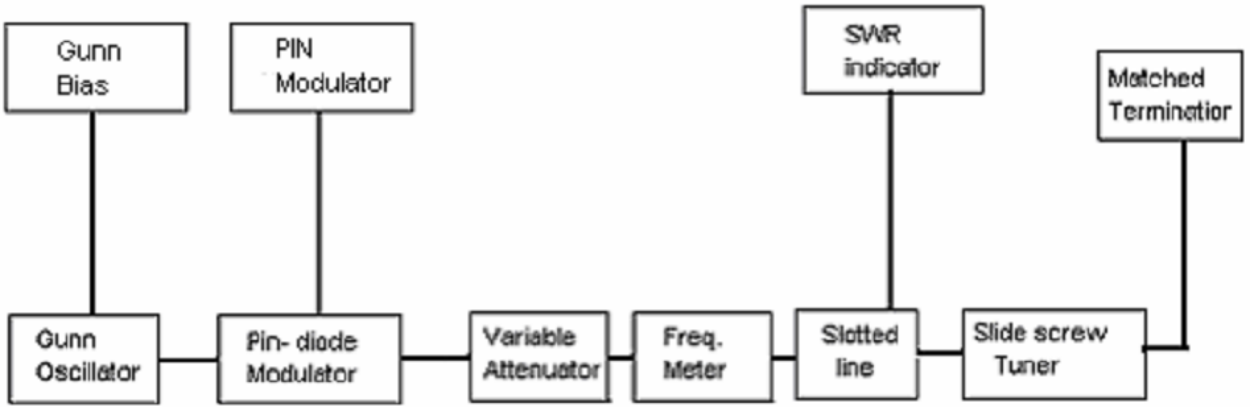
تاکنون فرض کردیم که موجبر بدون افت بود. در شرلیطی که موجبر افت داشته باشد مسیرهای روی اسمیت چارت به جای دایره به شکل حلزونی خواهد بود. در خطوط تلفاتی، SWR با حرکت به سمت بار، افزایش می‌یابد و با حرکت به سمت ژنراتور، کاهش می‌یابد.

اندازه‌گیری امپدانس:

تنظیم‌کننده با پیچ لغزان به همراه بار تطبیق، یک امپدانس مجهول ایجاد کرده است که در ادامه آن را اندازه‌گیری می‌کنیم.

۱. ست آپ زیر را ببندید:

۲. گان اسیلاتور و پین مدولاتور را روشن کنید.



شکل ۰-۲ دیاگرام ست آپ برای اندازه‌گیری SWR

۳. VSWR بار مجهول را همان طور که قبلا آموختید اندازه بگیرید.

۴. پروب تنظیم‌کننده با پیچ لغزان را آن قدر بچرخانید تا عمق پروب تقریبا ۵ میلی متر شود.

۵. محل مینیمم ولتاژ را یادداشت کنید. (d_L)

نکته: در اندازه‌گیری بعدی، هرگاه $(d_L - d_{s1})$ مثبت شود، پروب را به سمت مولد ببرید. اگر مقدار منفی شد، پروب را به سمت بار ببرید. همچنین توجه داشته باشید که $\frac{d_L - d_{s1}}{\lambda_g}$ همواره کمتر از 0.25 است.

۶. تنظیم‌کننده با پیچ لغزان و ترمینال تطبیق را از تجهیزات باز کنید. یک صفحه اتصال کوتاه را در شکاف بگذارید.

۷. فاصله d_{s1} و d_{s2} را که متناسب است با فاصله دو مینیمم متوالی VSWR به دست آورید.

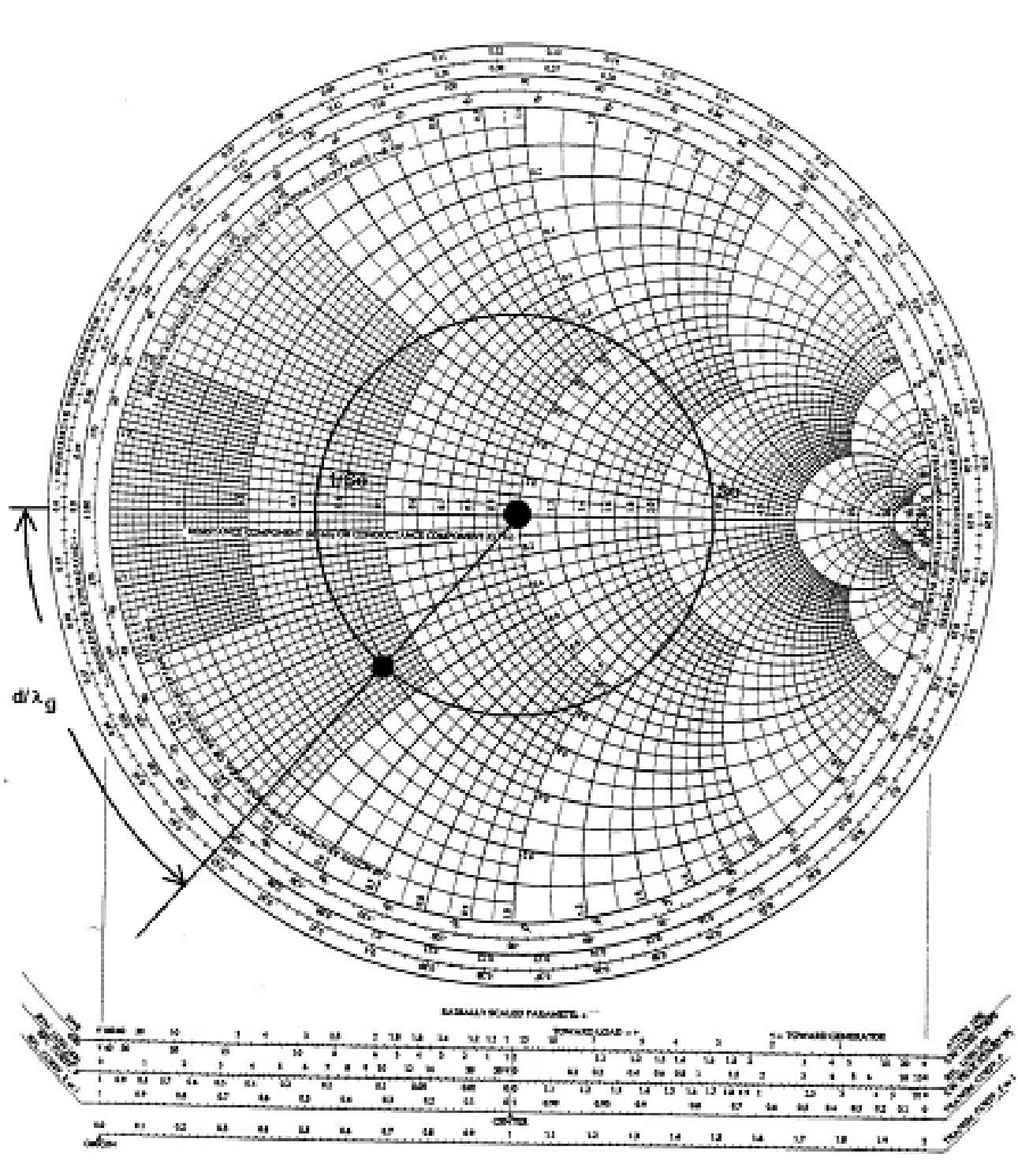
۸. همچنین نزدیکترین محل مینیمم به d_L را مشخص کنید.

۹. با این اطلاعات جدول را کامل کرده و امپدانس بار را محاسبه کنید.

۱۰. مراحل را به ازای دو یا چند عمق مختلف تکرار کنید.

نفوذ پروب (mm)	SWR بار S_L	مینیمم بار d_L(mm)	مینیمم‌های کوتاه d_{s1}(mm), d_{S2}(mm)	$\lambda_g = 2(d_{s1} - d_{s2})$ (mm)	$\frac{d_L - d_{s1}}{\lambda_g}$	امپدانس بار
فرکانس GHz						
5 mm						

جدول ثبت اطلاعات برای اندازه‌گیری امپدانس



فصل سوم: پارامترهای پراکندگی

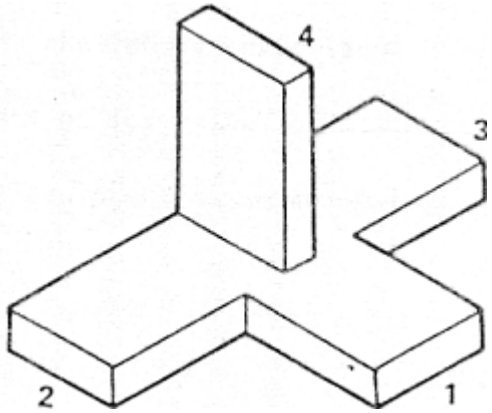
در این بخش مایلیم ادوات موجبری مختلف را مورد بررسی قرار داده و خصوصا پارامترهای پراکندگی آن‌ها را بررسی کنیم. هدف این است که علاوه بر آموختن روش اندازه‌گیری هر کدام از پارامترها در ادوات مختلف، یک دید کلی از رفتار آن قطعه در جذب یا انتقال توان نیز به دست آید.

پیش از این با اندازه گیری توان، تضعیف، VSWR و امپدانس آشنا شدیم. از این پس، می توانیم این مشخصات را برای هر قطعه دلخواه اندازه گیری نماییم.

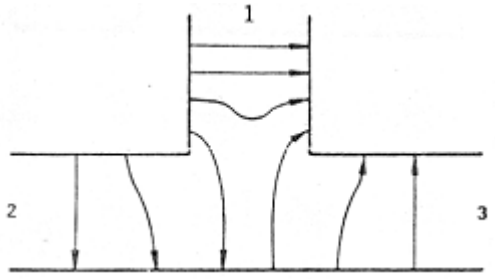
برای اندازه‌گیری پارامترهای پراکندگی یک قطعه، لازم است از یکی از پورت‌های مورد نظر توان را وارد کرده و از پورت مورد نظر دیگر توان را بخوانیم و این دو توان را در مقیاس خطی بر هم تقسیم و در مقیاس لگاریتمی از هم کم کنیم.

بررسی مشخصات تی جادویی:

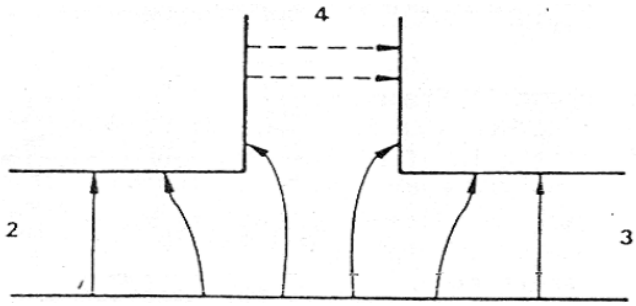
یک هیبریدT در واقع، ورژن مایکروویوی از سیم پیچ هیبرید است که به طور معمول در مدارهای ریپیتر تلفن استفاده می‌شود.



هنگامی که مدارهای پل کاملا با امپدانس خارجی تطبیق یافتند، سیگنال اعمال شده به پورت۱ در پورت ۲و ۳ ظاهر می‌شود، اما در پورت۴ سیگنالی ظاهر نخواهد شد. به همین ترتیب، هنگامی که سیگنالی به پورت۴ اعمال می‌شود، سیگنال به پورت‌های ۲و۳ می‌رسد، اما در پورت۱ سیگنالی وجود نخواهد داشت. روابط ورودی و خروجی مذکور، می‌توانند به صورت توزیع میدان ها درون یک هیبرید T بیان شوند. نمایی از میدان الکتریکی در حالی که ورودی از پورت۱ است، در شکل زیر نمایش داده شده است. فرض شده که تمام بازوهای هیبریدT به طور کامل تطبیق شده است.



میدان نسبت به صفحه میانی، تقارن زوج دارد. اگر ورودی به پورت۴ اعمال شود، سیگنال به طور مساوی به پورت‌های ۲و۳ می‌رسد اما هیچ سیگنالی به پورت۱ نمی‌رسد.

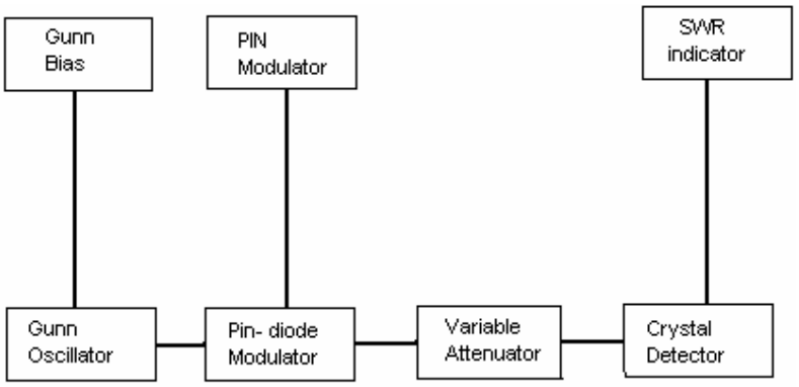


در شکل روبرو، یک نمای جانبی در محل اتصال هیبریدT وقتی که سیگنال به پورت۴ اعمال شده و موجبر در مد TE10 تحریک شده، نشان داده شده است. دلیل اینکه هیچ توانی به پورت۱ نمی‌رسد به خاطر هم پاسخی و تقارن میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی است. سیگنال به طور مساوی تقسیم شده و به پورت۲ به صورت همفاز و به پورت۳ با فاز ۱۸۰درجه می‌رسد. **بازوی۱ گاهی بازوی H خوانده می‌شود، زیرا در صفحه میدان مغناطیسی قرار دارد.**

بازوی۴ را هم به همان دلیل بازویE می‌گویند. جای دیگری که می‌تواند به عنوان ورودی در نظر گرفته شود، بازوهای ۲و۳ هستند. در این حالت، جمع برداری دو ورودی در پورت۱ و تفاضل برداری آن ها در پورت۴ ظاهر خواهد شد.

۱. تجهیزات را مطابق شکل ببندید.

۲. ولتاژ 7v به گان اسیلاتور اعمال نمایید.



تنظیمات اولیه

۳. سیگنال مدولاسیون را به مدولاتورِ پین دیود اعمال کنید.

اندازه‌گیری دکوپلینگ بین بازوی H و بازوی E

۱. تجهیزات را مطابق شکل صفحه بعد ببندید.

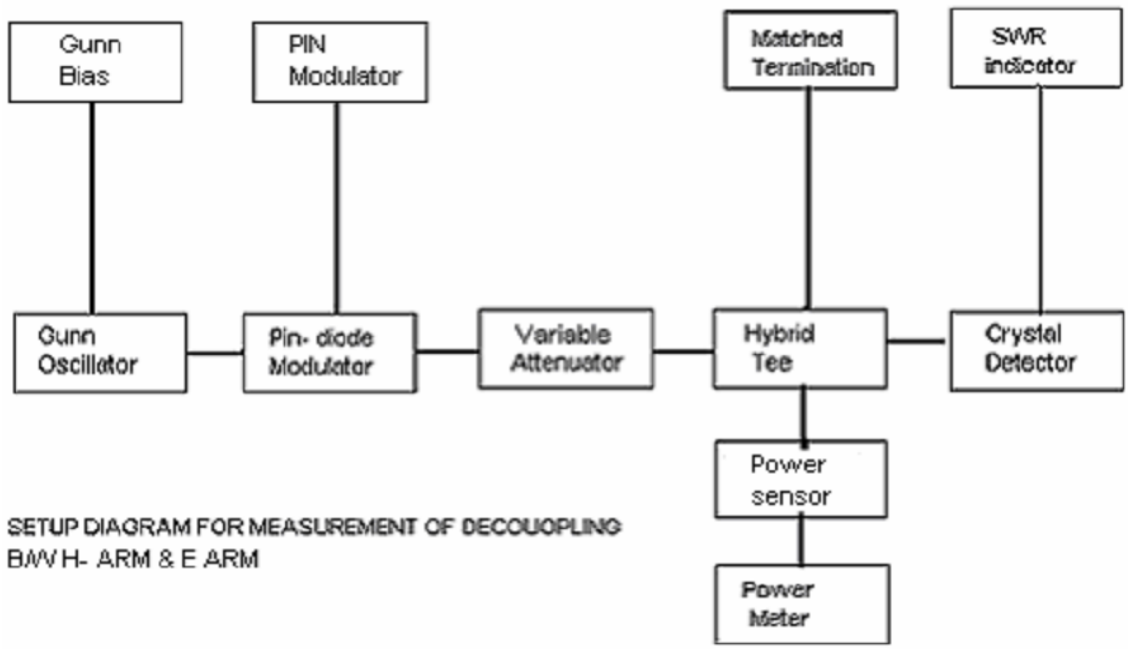
۲. تضعیف‌کننده را روی 20dB تنظیم کنید (A1) و ولتاژ را یادداشت کنید.

۳. آشکار ساز را جدا کرده و تضعیف‌کننده متغیر را روی بازوی ۱ قرار دهید.

۴. بار تطبیق و پاورمتر را به بازوی ۲ و ۳ وصل کرده و آشکارساز کریستالی را به بازوی۴ متصل نمایید. پاورمتر را خاموش نگه‌دارید. (از سنسور پاور متر فقط به عنوان بار تطبیق استفاده شده است) تضعیف‌کننده را آنقدر تغییر دهید تا به ولتاژ مرحله ۲ برسید. مقدار تضعیف در این مرحله را A1 بنامید.

۵. نتایج را در جدول زیر بنویسید.

دکوپلینگ A1-A2+(n×10) (dB)	تغییرات بهره SWRمتر (در گام‌های 10dB) n گام	میزان تضعیف تضعیف‌کننده متغیر	
		A2 [dB]	A1 [dB]



برای اندازه‌گیری دکوپلینگ بازوهای E و H

اندازه‌گیری تلفات داخلی هایبرید T

۱. آشکار ساز را به تضعیف‌کننده‌ای که روی 20dB تنظیم است، متصل کنید. (A3)

۲. آشکار ساز را جدا کرده و بازوی۱ هایبرید T را به تضعیف‌کننده متصل کنید.

۳. بار تطبیق و پاورمتر را به بازوی۳ و ۴وصل کنید. همچنین آشکار ساز را به بازوی ۲متصل نمایید.

۴. تضعیف تضعیف‌کننده را کاهش دهید(A4) تا همان مرجع مرحله یک بدست آید. تلفات داخلی بین بازوی۱ و۲ عبارت است از A3-A4 .

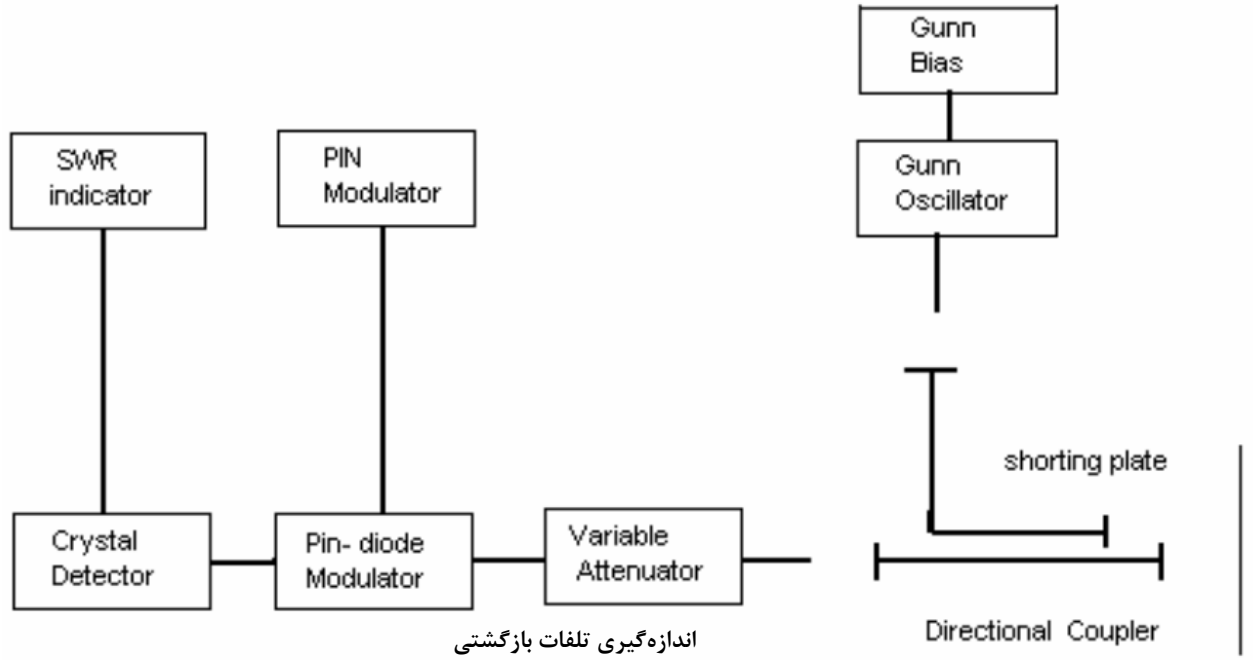
۵. برای اندازه‌گیری تلفات داخلی بین بازوی ۱ و ۳، مراحل ۴ و ۵را تکرار کنید.

۶. برای اندازه‌گیری تلفات داخلی بین بازوی ۲و۴ مراحله ۳، ۴ و ۵ را هم انجام دهید.

۷. نتایج را ثبت کنید.

بازوهای مسیر سیگنال	تضعیف تضعیف‌کننده متغیر		تلفات داخلی (dB)
	A4 (dB)	A3 (dB)	
		20	1-2
		20	1-3
		20	4-2

اندازه‌گیری تلفات بازوی H

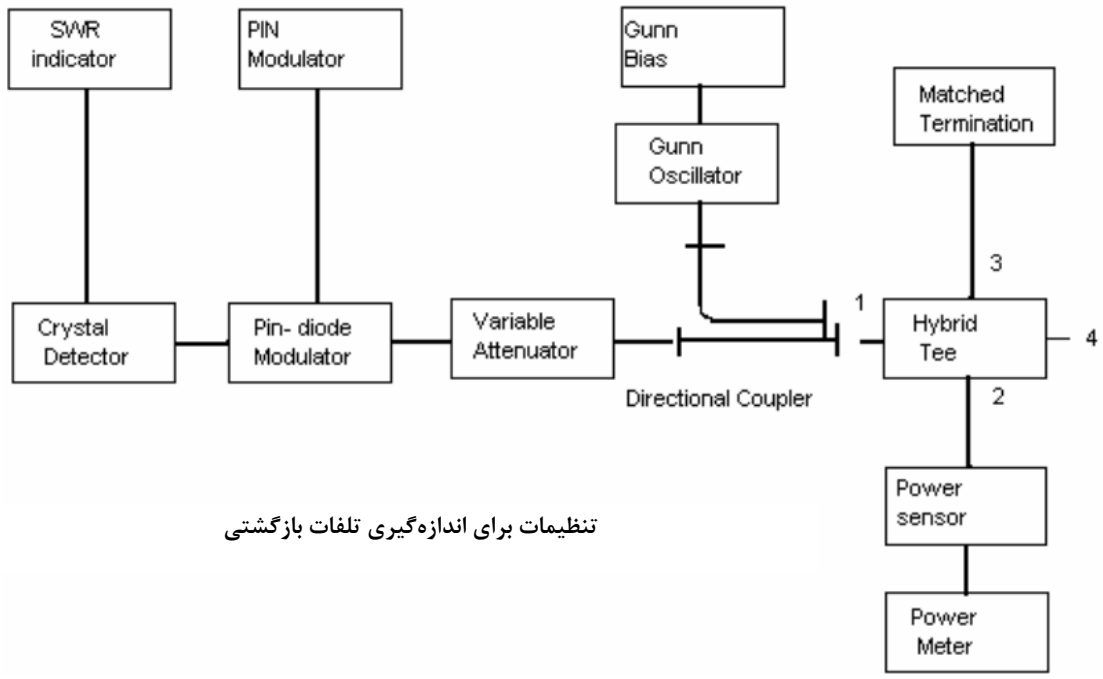


اندازه‌گیری تلفات بازگشتی

تجهیزات را مطابق شکل ببندید

۱. اسیلاتور را روشن کنید. مراقب باشید از 9v بیشتر نشود.
۲. تضعیف‌کننده متغیر را روی 20dB (A5) تنظیم کنید.
۳. ولتاژ اندازه‌گیری در SWR متر یا اسیلوسکوپ را بخوانید

۴. صفحه اتصال کوتاه را بردارید. بازوی۱ را مانند شکل به کوپلر جهتی متصل کنید. بار تطبیقی به بازوی۳ وصل نمونه و بازوی۴ را به صورت باز، رها کنید. (بازوی۴ در E plane. از آنجا که دکوپلینگ از بازوی۴ نزدیک 30-40dB است، در صورتی که آن را به صورت باز رها کنیم، اتفاقی نمی‌افتد.)



تنظیمات برای اندازه‌گیری تلفات بازگشتی

۵. گین SWR متر را به اندازه 10dB افزایش دهید. تضعیف را کاهش دهید(A6) تا به همان سطح مرحله۳ برسد. نتایج را ثبت کنید.

۶. مرحله ۵و۶ را با استفاده از E-plane ، T (بازوی۴) به جای H-plane ، T تکرار کنید.

نوع شئ	تضعیف		افزایش بهره‌ی SWRمتر در گام‌های 10dB A6-A5+(n×10)	تلفات بازگشتی	
	A5 [dB]	A6 [dB]		بر اساس dB	مقدار مطلق
بازوی ۱					
بازوی ۴					

جدول ۰-۱ داده‌های اندازه‌گیری تلفات بازگشت

- با روش‌های مشابه می‌توانید آزمایش‌هایی روی سه راهی‌های E و H موجود نیز انجام دهید.

ایزولاتور و سیرکولاتور:

ایزولاتور یک قطعه دو پورتی است با افت عبوری کم در جهت مستقیم و ایزولاسیون زیاد در جهت عکس. پورت سوم در ایزولاتورها همیشه به بار تطبیق متصل می‌باشد.

سیرکولاتورها:

یک سیرکولاتور یک اتصال سه پورتی است که انتقال فقط در جهت حرکت عقربه‌های ساعت در آن میسر است. موج ورودی به پورت ۱ از پورت ۲ و موج ورودی به پورت ۲ از پورت ۳ دریافت می‌شود و به همین ترتیب.

برخی پارامترهای ایزولاتور و سیرکولاتورها:

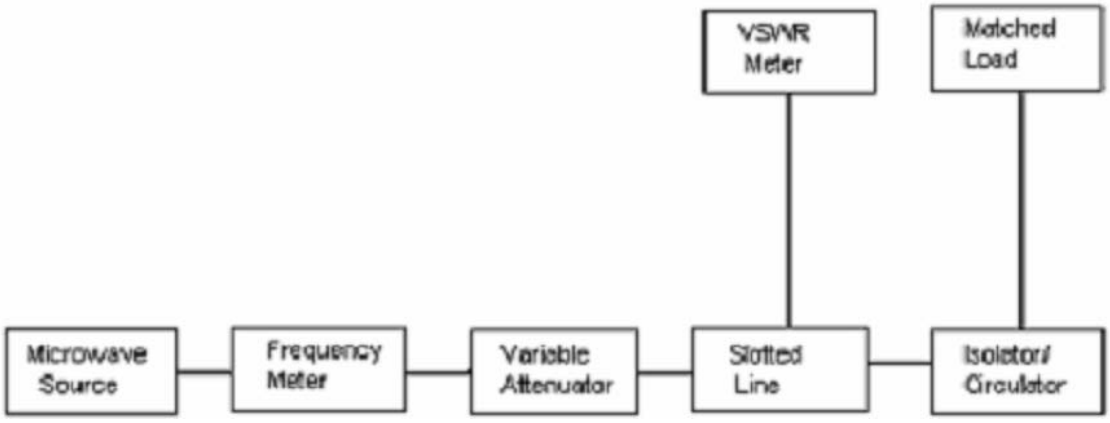
۱) افت عبوری: نسبت توان تولید شده توسط منبع در پورت ورودی و توان آشکار شده توسط آشکار ساز در بازوی کوپل یعنی بازوی خروجی، در حالی که پورت دیگر به بار تطبیق متصل شده است، افت عبوری یا افت مستقیم تعریف می‌شود.

۲) ایزولاسیون : نسبت توان داده شده به ورودی و توان آشکارشده در پورت غیر کوپل، در حالیکه پورت دیگر به بار تطبیق متصل نشده است.

۳) VSWR ورودی: نسبت ولتاژ ماکزیمم به ولتاژ مینیمم در موج ساکن موجود در خط، در حالیکه سایر پورت‌ها به بار تطبیق متصل شده اند.

اندازه‌گیری VSWR ورودی:

۱. تجهیزات را مطابق شکل بالا ببندید.



اندازه‌گیری VSWR برای سیرکولاتور یا ایزولاتور

۲. ایزولاتور و سیرکولاتور را در جهت جاری شدن انرژی ببندید. پورت ورودی به سمت Gunn و پورت خروجی را به یک بار تطبیق متصل نمایید.

۳. به منبع مایکروویو در فرکانس 10GHz انرژی دهید.

۴. به کمک خط شکاف دار، پروب و VSWRمتر، SWR خروجی ایزولاتور و سیرکولاتور که قبلا ذکرش رفت را برای SWR کوچک و متوسط اندازه‌گیری کنید.
۵. روند بالا می‌تواند برای فرکانس‌های دیگر هم تکرار شود.

اندازه‌گیری تلفات داخلی و ایزولاسیون

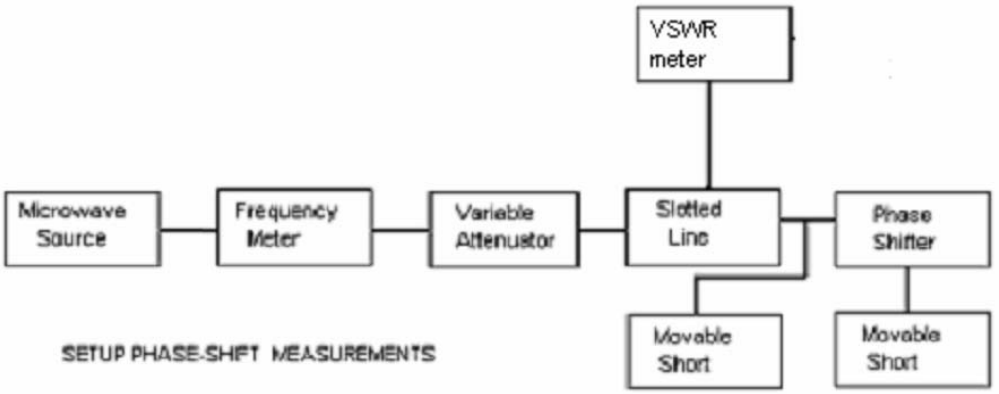
۱. ایزولاتور و سیرکولاتور را از خط شکاف‌دار جدا کنید. آشکار ساز را به انتهای خط شکاف‌دار متصل کرده و خروجی سنسور آشکار ساز را به VSWRمتر متصل نمایید.
۲. ولتاژ منبع مایکروویو برای حداکثر خروجی در فرکانس مشخص کاری ۱۰گیگاهرتزی، بالا برده و آشکار ساز را طوری تنظیم کنید که حداکثر خروجی در VSWRمتر نشان داده شود.
۳. به کمک تضعیف‌کننده متغیر، یک سطح دلخواه از توان را به عنوان مرجع به VSWRمتر اعمال کرده و آن را P_1 بنامید.
۴. با احتیاط سنسور آشکار ساز را از خط شکاف‌دار جدا کنید. مراقب باشید وضعیت سایر تجهیزات تغییر نکند. ایزولاتور یا سیرکولاتور را بین خط شکاف‌دار و سنسور آشکارساز قرار دهید. پورت ورودی را در جهت خط شکاف‌دار و سنسور آشکارساز نگه دارید.
۵. مقدار نشان داده شده توسط VSWRمتر را ثبت کرده و آن را P_2 بنامید.
۶. تلفات داخلی را با P_1-P_2 برحسب dB محاسبه کنید.
۷. برای اندازه‌گیری ایزولاسیون، ایزولاتور یا سیرکولاتور را به صورت معکوس ببندید. پورت خروجی به سمت خط شکاف دار، و آشکارساز به سمت پورت ورودی قرار می‌گیرند، در حالیکه سایر پورت‌ها به بار تطبیق متصل می‌شوند. این کار بعد از در نظر گرفتن یک سطح مرجع بدون ایزولاتور یا سیرکولاتور در تجهیز انجام می‌شود. مانند آنچه در بخش اندازه‌گیری تلفات داخلی گفته شده است. در اینجا سطح P_1 را به عنوان مرجع در نظر بگیرید.
۸. مقدار نشان داده شده توسط VSWRمتر را که وارد ایزولاتور یا سیرکولاتور می‌شود همانند آنچه در مرحله ۷ گفته شد، ثبت کنید.
۹. همین آزمایش می‌تواند با سایر پورت‌های سیرکولاتور می‌تواند انجام شود. همواره پورت‌های بدون استفاده سیرکولاتور را به بار تطبیق وصل کنید.
۱۰. در صورت نیاز، آزمایش بالا را با سایر فرکانس‌ها انجام دهید.

فصل چهارم: اندازه‌گیری شیفت فاز

یک شیفت دهنده فاز شامل یک قطعه موجبر و یک ماده دی الکتریک است که داخل موجبر به صورت موازی با بردار مولفه الکتریکی مد TE10 قرار گرفته است. با جابجایی ماده دی الکتریک از لبه تا مرکز موجبر، فاز تغییر می‌کند.

نحوه انجام آزمایش

تجهزات را مطابق شکل ببندید.



شکل ۰-۱

۱. در ابتدا صفحه اتصال کوتاه متحرک، در انتهای خط شکاف دار قرار دارد.

۲. منبع مایکروویو را روشن کنید تا حداکثر خروجی را در فرکانس کاری داشته باشد.

۳. به کمک پروب خط شکاف‌دار و VSWRمتر، λ_g را بیابید. که دوبرابر فاصله بین دو مینیمم متوالی درخط شکاف‌دار است.

۴. فرکانس کاری فرکانس متر را بوسیله روابط λ_g بدست آورید.

۵. λ را به شکل زیر بدست آورید:

$$\frac{1}{\lambda^2} = \frac{1}{\lambda_g^2} + \frac{1}{\lambda_c^2}$$

۶. مکان مینیمم‌ها در خط شکاف‌دار را یادداشت کرده و X بنامید.

۷. با دقت اتصال کوتاه متحرک را از خط شکاف‌دار جدا کنید.

۸. شیفت دهنده فاز را درحالی که میکرومترِ آن، مقدار صفر را نشان دهد، در خط شکاف‌دار قرار دهید. و اتصال کوتاهِ متحرک را به پورتِ دیگرِ شیفت دهنده فاز بزنید.

۹. مکان مینیمم‌های جدیدی را پیدا کرده و Y بنامید.

۱۰. مکان میکرومتر شیفت دهنده فاز را تغییر داده و مکان مینیمم‌های جدید مرتبط را پیدا کنید. و آن‌ها y_i بنامید.

محاسبات

از آنجا که مینیمم‌های جدید عبارتند از حاصلضرب نصف طول موج‌ها از صفحه اتصال کوتاه، باید طول الکتریکی دقیق شیفت دهنده فاز قابل محاسبه باشد.

برای مثال فرض کنید در 10GHz مینیمم‌های مرجع در X=16.08cm بدست آمد.

با فرض اینکه طول شیفت دهنده فاز دوبرابر طول موج باشد و روی خط مشخص شده در مرحله۹ باشد. مینیمم جدید در y=14.9cm بدست آمده است. صفحه اتصال کوتاه همان طور که می‌دانید، به میزان 16.08-14.9=1.18cm جابجا شده است. که می‌تواند به شکل زیر نوشته شود: $\lambda(0.393) = (1.18)\frac{\lambda}{3}$

جابجایی در جهتی است که صفحه اتصال کوتاه جابجا شده است. این مقدار به حدود نصف طول موج در شیفت دهنده فاز اضافه می‌شود. طول الکتریکی کل برابر 3.393 برابر طول موج‌ها است.

آن را در 2π یا ۳۶۰ درجه، ضرب کرده تا شیفت فاز به ترتیب برحسب رادیان و درجه بدست آید.

شیفت فاز در مثال بالا عبارت است از :

مشاهدات

مینیمم‌های ابتدایی	مینیمم‌های جدید	اختلاف بین مینیمم ها
۱.		
۲.		
۳.		

ثابت دی الکتریک:

نوشتن ثابت دی الکتریک نسبی به این صورت مفید خواهد بود:

$\varepsilon_r = \varepsilon(1 - jtan\delta)$

ثابت دی الکتریک به فرکانس وابسته نبوده و برای بخش کوچکی از طیف فرکانسی ثابت است.

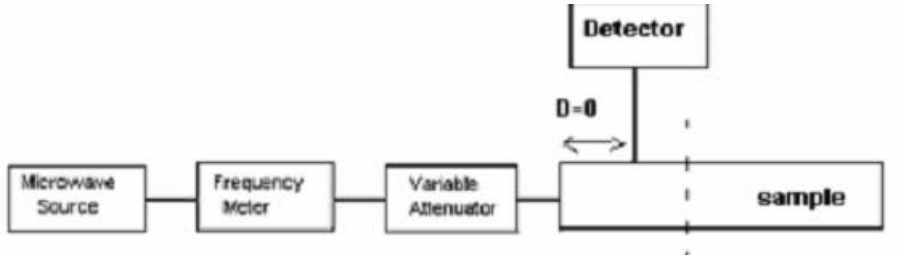
روش اندازه گیری دی الکتریک:

در شکل بالا یک موجبر اتصال کوتاه شده‌ی خالی به همراه یک پروب که در محل مینیمم ولتاژ Drقرار گرفته را می‌بینید. همان موجبر، حاوی نمونه با طول le را مشاهده می کنید که به همراه یک پروب در محل ولتاژ مینیمم جدید D واقع شده است. نمونه به اتصال کوتاه متصل شده است.

tanlk (DR - D - ie) / klE = tanlk Le Ke / Ke L

به طوری که بعد از اینکه یک بار اندازه گیری انجام شد، عدد مختلط Z= Le Ke می‌تواند بوسیله حل معادله غیر جبری بدست آید.

نحوه انجام آزمایش



اندازه گیری ثابت دی الکتریک

۱. سلول نمونه را در حالتی که خالی از نمونه است (هوا) در ست آپ قرار داده و مکان ولتاژ مینیمم یک مرجع دلخواه را پیدا کنید.

۲. به کمک بخش شکاف‌دار و پروب، طول موج درون موجبر را با اندازه گرفتن فاصله بین دو مینیمم متوالی در خط شکاف‌دار پیدا کنید.

۳. به وسیله سرنگ نمونه را داخل سلول وارد کنید.

۴. مکان مینیمم در خط شکاف دار (D_R) را اندازه بگیرید.

۵. $VSWR(r)$ را در خط شکاف‌دار اندازه بگیرید.

۶. Er را محاسبه کنید.

فصل پنجم: مباحث تکمیلی

در این بخش به موارد زیر می‌پردازیم:

با توجه به آن چه تا الان انجام شده، آمادگی داریم تا به برخی از آزمایش ها، جزئی تر بپردازیم:

- اندازه‌گیری مقادیر زیاد SWR
- اندازه‌گیری توان مزدوج و Z0
- اندازه‌گیری مقادیر کم تضعیف
- معرفی گان اسیلاتور و مشخصه آن
- اندازه‌گیری پاسخ فرکانسی
- معرفی پین مدولاتور و بررسی ویژگی‌های آن

بخش اول: اندازه‌گیری مقادیر زیاد SWR

به علت مساله square law ، اندازه‌گیری مقادیر زیاد SWR به روش مستقیم، با خطا همراه است. زیرا آشکار ساز کریستالی، تنها در محدوده خاصی از قانون مربع پیروی می کند. برای این مقادیر از روش زیر که به روش double minimum معروف است استفاده می‌کنیم.

۱. عمق پروب تنظیم‌کننده با پیچ لغزان را به حداکثر خودش برسانید. عمق زیاد پروب، VSWR فراهم می‌کند.
۲. پروب را در طول شکاف آن قدر جابجا کنید که حداقل Vmin روی صفحه VSWRمتر مشاهده شود.
۳. مقدار Vmin، VSWR را روی 3dB تنظیم کنید. در صورت نیاز، مقدار تضعیفِ تضعیف‌کننده متغیر را کاهش دهید.
۴. پروب را آن قدر در طول شکاف تغییر دهید تا مقدار Vmax برابر 0dB شود.

میزان نفوذ پروب	d1 [mm]	d2 [mm]	مینیمم نخست [mm]	مینیمم دوم [mm]	λ_g [mm]	SWR

جدول ۰-۱ثبت اندازه‌گیری‌های 3dB

۵. موقعیت پروب را در ستون d1 در جدول بالا یادداشت نمایید.
۶. مراحل بالا را تکرار کنید اما پروب را به سمت راست برده و موقعیت پروب را در ستون d2 یادداشت کنید.

۷. اندازه‌گیری را در سه عمق مختلف پروب تکرار کنید.

۸. تنظیم‌کننده با پیچ لغزان را با صفحه اتصال کوتاه جایگزین کنید. فاصله بین دو مینیمم متوالی را پیدا کنید. طول موج داخل موجبر ،λ_g ، دوبرابر این فاصله است.

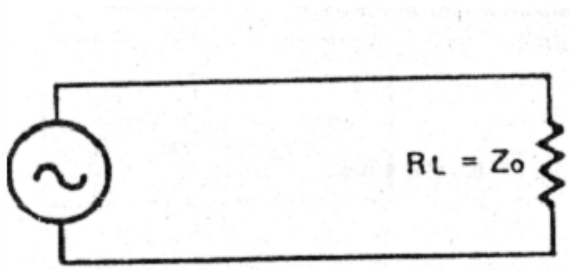
۹. SWR را با استفاده از فرمول زیر محاسبه کنید.

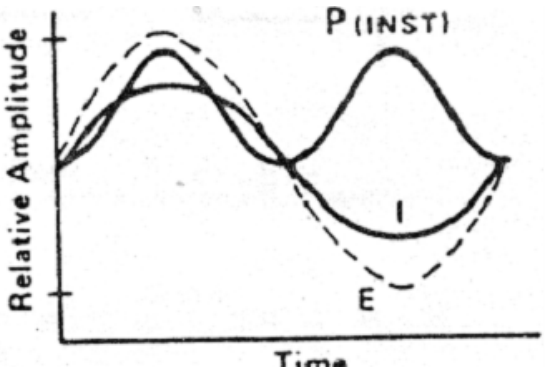
$$SWR = \left\{1 + \left(\frac{1}{sin^2\pi\frac{(d1-d2)}{\lambda_g}}\right)\right\}^2 \approx \frac{\lambda_g}{\pi(d1-d2)}$$

- سعی کنید روش را توجیه کرده ، فرمول بالا را اثبات کنید و تقریب‌های لازم برای رسیدن به تساوی دوم را بیان کتید. برای این کار می‌توانید از مراجع زیر استفاده کنید.
  - فصل هشتم کتاب *Microwave Engineering – V.S. Bagad*
  - فصل سوم کتاب *Microwaveand Radar Engineering – V.S. Bagad*
  - فصل دوم کتاب *Basic Microwave Techniques and Laboratory Manual – M. L. Sisodia, G. S. Raghuvanshi*

بخش دوم: اندازه‌گیری توان مزدوج و توان Z0

به طور معمول، توان به صورت نرخ زمانی تغییر انرژی تعریف می‌گردد. در کاربردهای مایکروویوی، انرژی به شکل‌های مختلفی به کار می‌رود. تبادل اطلاعات بین مسافت‌های طولانی، گرم کردن اجاق مایکروویو، یا شتاب دهنده ذرات در مهندسی هسته‌ای و ... . معمول ترین روش اندازه‌گیری توان در فرکانس‌های پایین، اندازه‌گیری ولتاژ و جریان قطعه مورد آزمایش و محاسبه توان از مقادیر پارامترهای فشرده مداری است. با این حال در فرکانس‌های مایکروویو، به دلیل طبیعت گسترده عناصر مداری، اندازه‌گیری توان دشوارتر می‌شود. عامل تاثیر گذار دیگر، بازتاب سیگنال از هرجایی که عدم تطبیق امپدانس وجود داشته باشد، است. دو شکل اندازه‌گیری توان در اندازه‌گیری توان‌های مایکروویو دخیل هستند. اندازه‌گیری توان متوسط یا اندازه‌گیری توان پیک. توان متوسط عبارت است از متوسط زمانی حاصلجمعِ ضربِ ولتاژ و جریان لحظه‌ای در یک دوره زمانی. که عبارات ریاضیاتی آن به شرح زیر است:





توان لحظه‌ای ظاهر شده در مقاومت بار:

$$P_{AVG} = \frac{1}{T}\int_{0}^{T} E.I\, dt$$

که در آن: T دوره تناوب است، e ولتاژ لحظه‌ای و I جریان لحظه‌ای است.

باتوجه به شکل، باید توجه داشت که فرکانس توان لحظه‌ای، دو برابر فرکانس E و I هستند. راه حل دیگر برای بدست آوردن توان متوسط مدار بالا عبارت است از:

$$P_{AVG} = E_{RMS}.I_{RMS}.Cos\theta$$

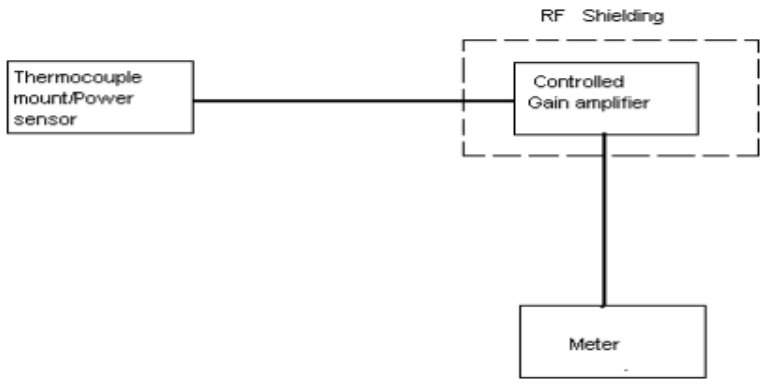
که θ زاویه فاز بین E و I است.

حال یک پالس با Duty Cyle مشخص را در نظر بگیرید. توان پیک در این پالس، با توان متوسط پالس تقسیم بر Duty Cycle متناسب است.

$$P_{peak} = \frac{P_{AVG}}{duty\ cycle}$$

$$duty\ cycle = \frac{\tau}{T}$$ که :

معمولا توان متوسطی در مدارهای مایکروویو اثر داده می‌شوند، که یک منبع پیوسته سیگنال دارند. در مقابل، آن جا که سیگنال‌ها به صورت یک منبع پالس هستند، توان پیک ، گزینه بهتری برای گزارش کردن توان است. حال نگاهی به جزئیات اندازه‌گیری توان به روش ترموکوپل می‌اندازیم. اصلی ترین مزیت استفاده از سیم‌های ترموکوپل این است که می‌توان توان را با اندازه‌گیری ولتاژ *DC* تولید شده در سیم‌های ترموکوپل اندازه گرفت. ولتاژ *DC* به این صورت تولید می‌شود که سیم‌ها جریان فرکانس بالا را عبور می‌دهند و گرما میان دو بخش تماسی فلزی تولید می‌شود. در مقابل، یک پاورمتر با اعمال ولتاژ به دستگاه، کار می‌کند و دستگاه طوری تنظیم شده که توان را نشان دهد. قابلیت استفاده از سیم‌های ترموکوپل، در فرکانس‌های پایین جوابگو نبود. با این حال، فناوری‌های اخیر در لایه نازک، این مشکل را حل کرد. گزینه‌های دیگری با خاصیت ترموکوپلی وجود دارند که برای کاربرد مایکرویوی مناسب هستند، مانند بیسموت و آنتیموان. این مواد با جذب توان ورودی، گرم شده و گرما را به صورت ولتاژ ظاهر می‌کنند. شکل قبل ساختار یک پاورمتر را نشان می‌دهد.

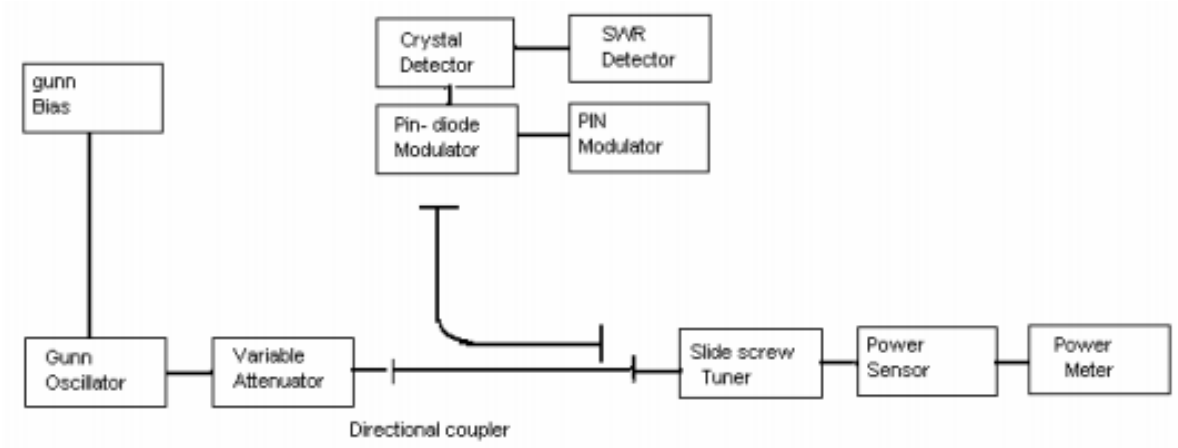


ساخمان یک پاورمتر ترموکوپلی

اندازه‌گیری توان مزدوج و Z_0

در بحث انتقال توان، با دو مسئله روبرو هستیم. نخست، انتقال حداکثر توان و دیگری تطبیق امپدانس. طبق تعریف، حداکثر توان زمانی اتفاق می افتد که امپدانس منبع برابر مختلط مزدوج امپدانس بار شود. اما در مدارهای گسترده، در اینجا مدارهای مایکروویو، با مسئله برگشت توان مواجه هستیم؛ که علت آن عدم تطبیق امپدانس منبع و بار می باشد. زمانی که امپدانس منبع و بار با هم برابر باشند، توان بازتاب شده از بار به منبع، حداقل خواهد بود.

۱. تجهیزات را مطابق شکل زیر ببندید.



تنظیمات برای اندازه‌گیری توان مزدوج و توان Z0

۲. خروجی کوپلر جهتی را با یک موج مربعی 100Hz مدوله کنید. فرکانس سیگنال را طوری تنظیم کنید که VSWR Vmaxمتر، حداکثر شود.

توان Z_0

۳. سطح توان سیگنال را تغییر ندهید. تنظیم‌کننده با پیچ لغزان را طوری تنظیم کنید که عدد نشان داده شده در SWRمتر، حداقل شود. مقداری که پاورمتر نشان می‌دهد را ثبت کنید.

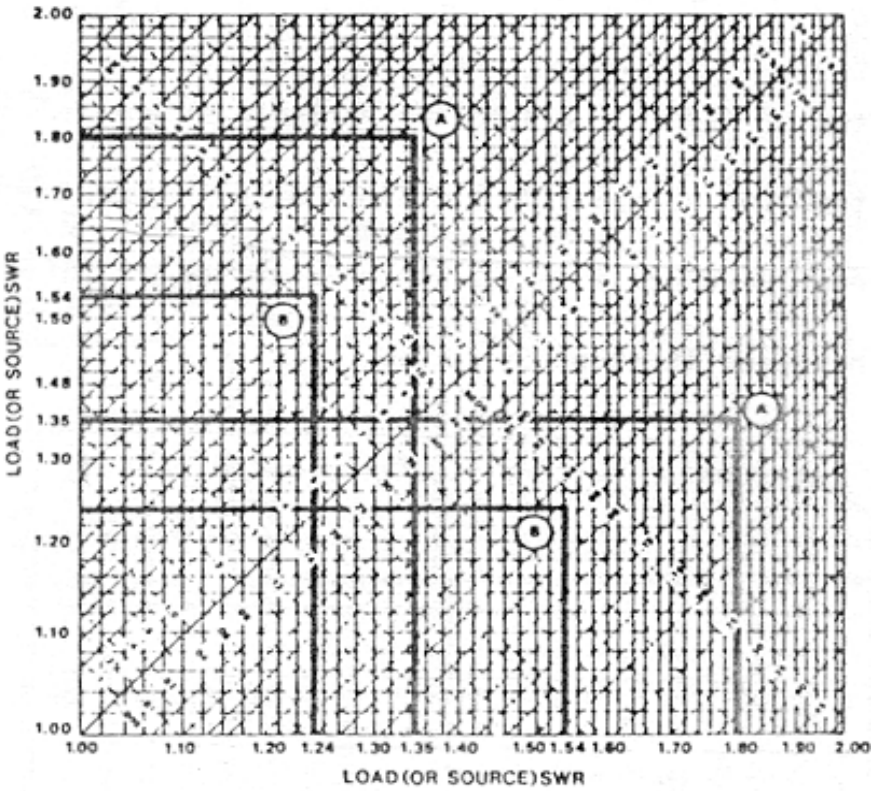
توان مزدوج

۴. تنظیم‌کننده با پیچ لغزان را طوری تنظیم کنید که بیشترین مقدار در پاورمتر نشان داده شود، سپس آن را ثبت نمایید.

تضعیف‌کننده را مطابق آن چه در جدول فوق آمده تغییر دهید. در هر زمان، مقدار پاورمتر را ثبت نمایید. هنگامی که پاورمتر روشن شد، مطمئن شوید که دقیقا مقدار صفر را نشان می‌دهد.

مفاهیم تلفات عدم تطبیق و حداکثر توان منتقل شده

تلفات عدم تطبیق در یک سیستم، به عنوان اتلاف توان که ناشی از بازتاب است، تعریف می‌شود. در حقیقت، عدم تطبیق امپدانس بین مولد و بار، باعث بازتاب هایی می‌شود که این بازتاب‌ها یک فاز تصادفی را تولید می‌کنند که متناسب است با طول موثر الکتریکی موجبر. این فاز تصادفی، اندازه‌گیری توان و تضعیف را به دلیل خطاهای رخ داده و تغییر سطح توان، مشکل می‌سازد. در حالی که SWR منبع و بار را بدانیم، حداکثر و حداقل تغییرات سطح سیگنال را می‌توانیم بیابیم؛ با این فرض که می‌توان از تضعیف در موجبر صرف نظر کرد. یک راه برای تعیین مقدار انحراف، استفاده از یک چارت مطابق شکل است.



حداکثر توان انتقالی وقتی رخ می‌دهد که امپدانس بار، مساوی مزدوج مختلط امپدانس منبع باشد. برای نمونه، منبعی با امپدانس $50 + j25$ اهم، حداکثر توان را به بار می‌رساند در صورتیکه امپدانس بار $50 - j25$ اهم باشد. اگر امپدانس بار مزدوج امپدانس منبع نباشد، تلفات عدم تطبیق مزدوج داریم که عبارت است از : $\frac{\text{توان در دسترس منبع}}{\text{توان رسیده به بار}}$

رابطه بالا می‌تواند به صورت خلاصه بوسیله ضرایب بازتاب بیان شود:

$$\text{تلفات عدم تطبیق} = \frac{(1-\rho_s\rho_L)^2}{(1-\rho_s^2)(1-\rho_L^2)}$$

که ρ_s، ضریب بازتاب منبع و ρ_L ضریب بازتاب بار می‌باشد.

با اینکه ρ_s و ρ_L در بسیاری موارد به طور مستقیم شناخته شده نیستند، اما معادله بالا برای تعیین حداکثر و حداقل توان تلفاتی ناشی از عدم تطبیق مفید است.

الف) حداکثر تلف عدم تطبیق وقتی رخ می‌دهد که آرگومان $\rho_s + \rho_L$ مساوی ۱۸۰درجه شود.

$$\text{حداکثر عدم تطبیق} = \frac{(1+\rho_s\rho_L)^2}{(1-\rho_s^2)(1-\rho_L^2)} = 1 + \frac{(SWR_s \times SWR_L - 1)^2}{4 \times SWR_s \times SWR_L}$$

ب) حداقل تلف عدم تطبیق وقتی رخ می‌دهد که آرگومان $\rho_s + \rho_L$ مساوی ۰ درجه شود.

$$\text{حداقل عدم تطبیق} = \frac{(1-\rho_s\rho_L)^2}{(1-\rho_s^2)(1-\rho_L^2)}$$

مثال: برای $SWR_s = 1.5 \quad SWR_L = 1.25$ حداکثر و حداقل عدم تطبیق را حساب کنید:

$$\text{حداکثر تلف عدم تطبیق} = 1 + \frac{(1.5 \times 1.25 - 1)^2}{4 \times 1.5 \times 1.25} = 1.102$$

$$\text{حداقل تلف عدم تطبیق} = 1 + \frac{(1.5 - 1.25)^2}{4 \times 1.5 \times 1.25} = 1.009$$

برای اطلاعات بیشتر به سایت TPUB مراجعه نمایید.

بخش سوم: اندازه‌گیری مقادیر اندک تضعیف

اگرچه در حالت کلی تضعیف به معنی کاهش یا تقلیل چیزی است، اما در مایکروویو به طور خاص به نسبت بین توان ورودی و خروجی اطلاق می‌شود.

$$A(dB) = 10log\frac{P_1}{P_2}$$

که در آن P_1 توان ورودی و P_2 توان خروجی است.

تلفات عبوری، اگرچه به لحاظ ریاضی همان است، اما مفهومش کاملا متفاوت است. تضعیف در سیستم عمدا و با هدف قبلی تعریف می‌شود، در حالی که تلفات عبوری یک موقعیت نامطلوب است. تلفات در سیستم به خاطر قطعات فیزیکی غیر ایده آل اتفاق می‌افتد.

در موجبرهای مایکروویو دو روش مشهور اندازه‌گیری عبارتند از: نسبت توان و جایگزینی RF

الف) روش نسبت توان

در این روش به سادگی، توان اندازه‌گیری می‌شود و چون آشکارساز مایکروویو در هر مورد، در سطح توان متفاوتی کار می‌کند، با توجه به غیرخطی بودن دستگاه خطا ایجاد می‌شود. بنابراین نتایج اندازه‌گیری باید جبرانسازی شود. برای مثال وقتی توان خروجی آشکارساز در سطح کمتر از ۱ میلی وات بیان شده، حدودا ۰,۳ دسی بل جبرانسازی برای تضعیف تا ۲۰ دسی بل لازم است.

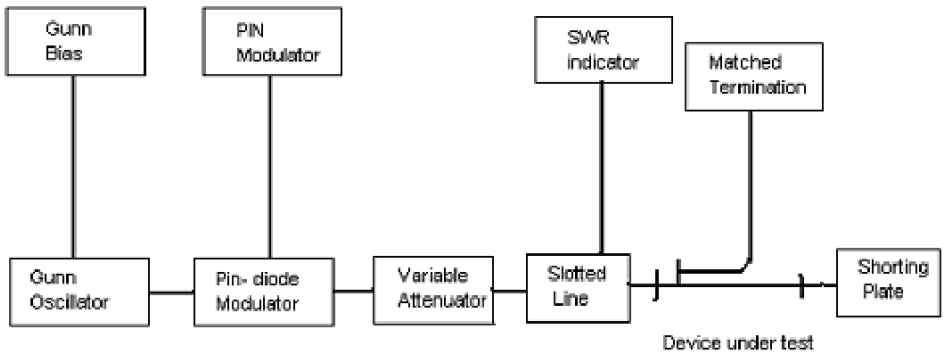
ب) روش جایگزینی RF

خطاهای مرتبط با روش بالا در این روش حذف می‌شوند. به این صورت که ابتدا توان خروجی با DUT اندازه‌گیری می‌شود. سپس DUT با تضعیف‌کننده متغیر کالیبره جایگزین می‌شود. تنظیم دقیق تضعیف‌کننده متغیر را تا جایی که سطح توان با قبل یکی شود، انجام می‌دهیم. حال مقدار تضعیف DUT به سادگی با تضعیف‌کننده متغیر برابر است. در هر دو روش فرض می‌کنیم خطاهای ناشی از عدم تطبیق امپدانس غیرقابل ملاحظه اند. گاهی اوقات خود SWR مقدار کمی خطا را تعریف می‌کند.

قطعات MWL با نرخ خطای زیر ±۰,۵dB طراحی شده اند.

مراحل

۱. تجهیزات را مطابق شکل ببندید.



دیاگرام تجهیزات برای اندازه‌گیری مقادیر اندک تضعیف

۲. تضعیف‌کننده متغیر را روی 20dB بگذارید.

۳. SWR ورودی قطعه زیرِ تست را اندازه‌گیری کنید. (در این جا یک کوپلر جهتی)

۴. تضعیف را با استفاده از رابطه زیر تعیین کنید.

$$A = 10\log(\frac{SWR+1}{SWR-1})$$

رابطه بالا را اثبات نمایید.

بخش چهارم: آشنایی با گان اسیلاتور:

اثر gunn یا اثر الکترون‌های جابجا شده در سال ۱۹۶۳ توسط GUNN کشف شد. بر اساس این تئوری، وقتی که ولتاژ dc بسیار کمی در عرض یک تکه باریک از یک ماده نیمه هادی اعمال شود، در شرایط خاصی، مقاومت منفی از خود نشان می‌دهد. گان در نمونه مورد آزمایش خود گالیوم ارسنایدو و ایندیوم فسفید را به کار برد.

پس از کشف مقاومت منفی، به راحتی با اضافه کردن یک عنصر دارای مقاومت منفی به یک مدار تیون، می‌توان نوسان نولید کرد.

یکی از شرایط برای حفظ شرایط مقاومت منفی در مواد نیمه هادی ، نگه داشتن گرادیان ولتاژ در مواد نیمه هادی به میزان ۳۰۰۰ v/cm یا بالاتر است.

مناسب ترین مدار تیون برای اتصال به نیمه هادی ها، برای فرکانس‌های مایکروویو، حفره‌های تیون شده هستند.

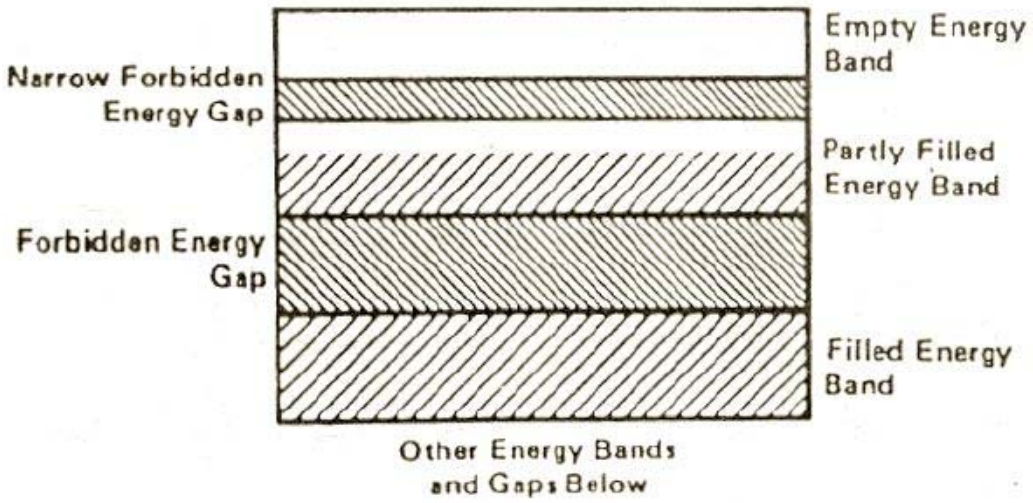
The Side view of an epitaxial GaAs Gunn Semiconductor

اثر gunn که فقط در نیمه هادی‌های نوع n اتفاق می‌افتد، حاصل خاصیت خود نیمه هادی است. هیچ پارامتری که مرتبط با پیوند یا ویژگی‌های تماسی نیمه هادی باشد و نیز ولتاژ و جریان تاثیری بر رفتار gunn ندارد. و برای حفظ نوسانات فقط کافی است میدان الکتریکی بیشتر از مقدار آستانه باشد.

دیود gunn به میدان مغناطیسی حساس نیست بنابراین میدان‌های مغناطیسی تاثیری بر روی آن ندارد و فرکانس نوسان هم بسته به زمان انتقال دسته‌های الکترون در قطعه تعیین می‌شود.

اثر مقاومت منفی و الکترون منتقل شده

نوار انرژی و سطح انرژی GaAs در شکل زیر نشان داده شده است .



دقت شود که این ماده در بالاترین سطح انرژی خود دارای نوار انرژی خالی است. سطح نیمه پر انرژی در پایین آن قرار گرفته است. زمانی که ماده توسط مواد نوع n مورد نفوذ قرار می گیرند، دارای الکترون‌های اضافی می‌شود که این الکترون‌ها آمادگی دارند تا با اعمال ولتاژ به دیود جاری شوند.

جهت جریان به وجود آمده در دیود، با ولتاژ متناسب است و جریان، به سمت سر مثبت GaAs است. هنگامی که با افزایش ولتاژ، افزایش جریان داشته باشیم، مقاومت مثبت است.

هرچند با افزایش ولتاژ به میزان کافی، الکترون‌ها به جای این که با سرعت بالاتر حرکت کنند، به نوار بالای انرژی که خالی است و کم تحرک تر است منتقل می‌شوند، درنتیجه جریان کاهش می‌یابد که نشان دهنده ی پدیده مقاومت منفی است.

انتقال الکترون از لایه ی پایین تر به لایه انرژی بالاتر را، اثر الکترون منتقل شده می‌نامند. اگر ولتاژ باز هم بیشتر شود، باعث تحرک بیشتر الکترون‌ها در نوار انرژی بالاتر می‌شود و در نتیجه جریان افزایش می‌یابد.

حوزه‌های gunn

فرکانس نوسانات در GaAs متناسب با شکل گیری و زمان حمل و نقل از الکترون ها، که شکل آن به صورت "خوشه الکترون" است.

برای درک گان اسیلاتور اثر مقاومت منفی عامل مهمی است، با این حال اثر مقاومت منفی هر آنچه که در داخل اسیلاتور اتفاق می‌افتد را توجیه نمی‌کند.. عنصر مهم دیگر، شکل گیری حوزه‌ها یا gunn domains است. مقدار الکترون‌های آزاد موجود در GaAs بستگی به چگالی ماده نوع n نقوذ داده شده در آن دارد. اما چگالی نفوذ در سراسر GaAs لزوما یکسان نیست و جایی که چگالی نفوذ کمتر باشد، الکترون‌های آزاد کمتری وجود دارد.

الکترون‌های آزاد کمتر به معنای هدایت کمتر و در نتیجه، اختلاف پتانسیل نسبت به منطقه‌ای که الکترون‌های آزاد بیشتری دارد بیشتر می‌شود. از این رو هرچه ولتاژ اعمالی افزایش می‌یابد، در نهایت اول به دلیل گرادیان ولتاژ کافی، اثر الکترون منتقل شده در این منطقه رخ می دهد و در نتیجه مقاومت منفی ایجاد می‌شود..

حوزه‌ها همان‌طور که در بالا شرح داده شد ناپایدار در نظر گرفته می‌شوند. آنچه در این حوزه ها اتفاق می‌افتد این است که از الکترون‌ها در چرخش با سرعت بالا استفاده می‌شود. الکترون‌های جلویی به سرعت رو به جلو حرکت می‌کنند و آنهایی که پشت هستند به شکل خوشه در می‌آیند. به این ترتیب، تمام حوزه درطول قطعه و به سمت سر مثبت با سرعت متوسطی در حدود ۱۰۷ سانتی متر در ثانیه حرکت می‌کند.

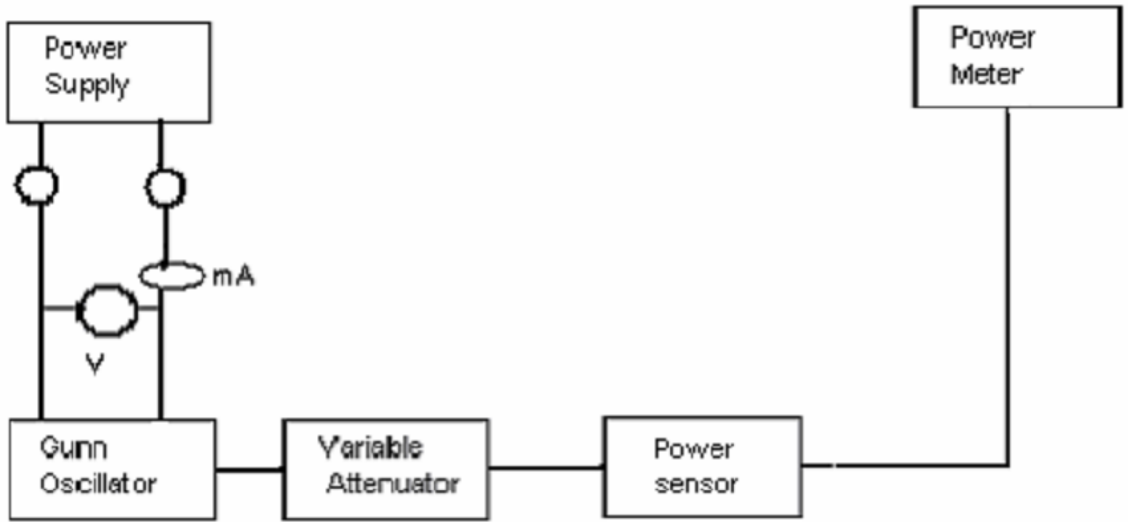
وقتی اثر الکترون منتقل شده در یک حوزه اتفاق می‌افتد، حرکت الکترون‌ها به سمت باند با انرژی بالاتر و رسانایی کمتر حرکت می‌کنند، لذا کم بودن تعداد الکترون‌هایی که در باند هدایت باقی می‌مانند باعث کم شدن رسانایی این ناحیه می‌شود. همانطور که در بخش قبلی توضیح داده شد، این فرآیند باعث افزایش گرادیان پتانسیل می‌شود که سبب حرکت حوزه‌هامی‌شود. این فرآیند انتقال الکترون و حرکت حوزه‌ها خودش را تکرار می‌کند که به آن "خویش دوام " می‌گویند.

هنگامی که حوزها به سر آند دیود می‌رسند، یک پالس به مدار تشدید مربوطه اعمال می‌شود و در نتیجه نوسان ایجاد می‌شود. در واقع این پالس جدا از خاصیت مقاومت منفی دیود، باعث نوسانات می‌شود..

گان اسیلاتور

با وجود اینکه گان اسیلاتور طوری طراحی شده که از مدهای نوسان ناخواسته جلوگیری می‌کند، اما قابلیت تیون نیز برای شرایطی که تنظیم دقیق لازم است، در اسیلاتور فراهم شده است.

ستاپ اندازه‌گیری را مطابق با بلوک دیاگرام شکل زیر ببندید:

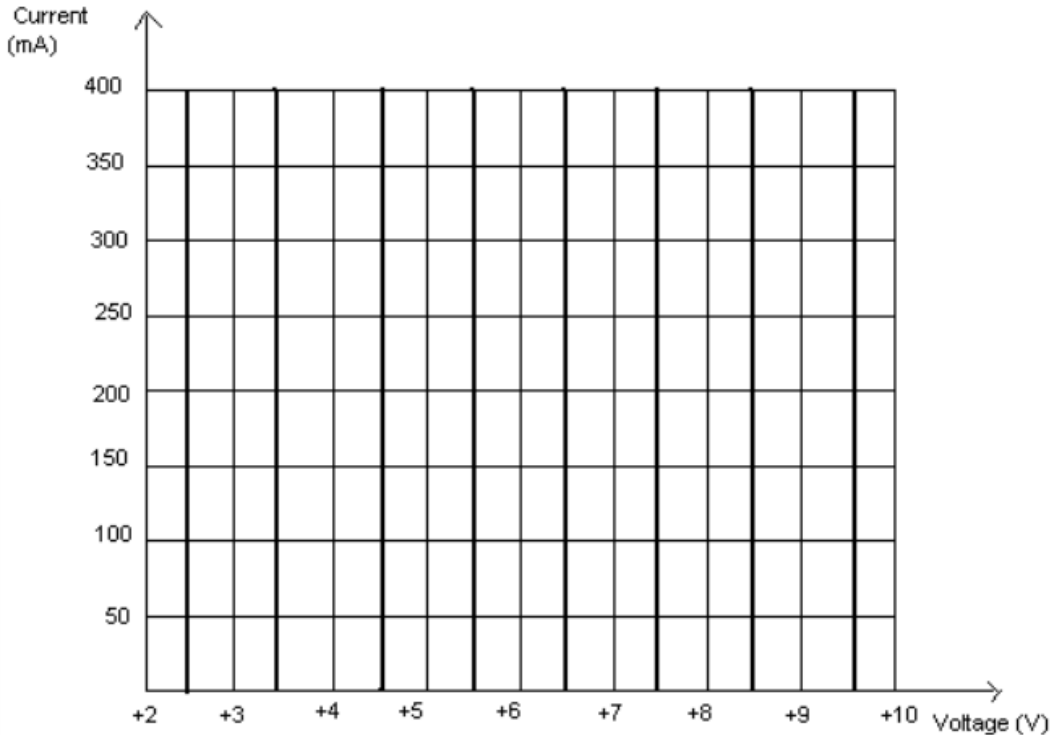


نحوه تنظیم تجهیزات برای اندازه‌گیری مشخصه ولتاژ بر حسب جریان دیود Gunn

رسم منحنی جریان–ولتاژ

- ولتاژ را روی ۴ ولت و تضعیف‌کننده متغیر را روی 10dB تنظیم کنید. سپس جدول زیر را تکمیل کنید:

ولتاژ منبع (V)	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0
جریان منبع (mA)													



شکل ۰-۱مشخصه جریا-ولتاژ دیود Gunn

با کاهش ولتاژ به 0V منحنی جریان- ولتاژ را رسم کنید.

اندازه‌گیری توان خروجی اسیلاتور بر حسب ولتاژ تغذیه

-پاور متر را روشن کنید و منتظر باشید که ۰ آن تنظیم شود.

- با افزایش میزان ولتاژ با پله‌های 0.5 ولتی، نتایج پاور متر و تضعیف‌کننده متغیر را ثبت کنید.

- میزان پاور قرائت شده به mw را به dBm تبدیل کنید و اثر تضعیف‌کننده متغیر را با آن جمع کنید. مثلا اگر پاور 6.3mw خوانده شد و تضعیف‌کننده هم 3dB بوده است، مجموع توان برابر است با 10log(6.3)+3 = 11 dBm . اکنون با تبدیل مجدد این 11dBm به میلی وات خواهیم داشت: 12.6 mw که توان خروجی اسیلاتور است. (در ولتاژ ۸،۵ ولت).

-جدول زیر را کامل کنید:

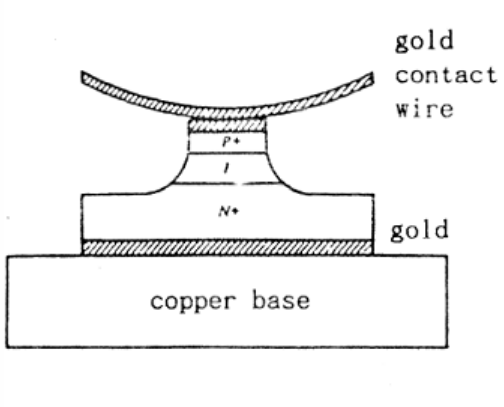
ولتاژ منبع (V)	+4.5V +4
مقدار خوانده شده از پاورمتر (mW)	
توان تبدیل شده (dBm)	
تنظیمات تضعیف‌کننده (dB)	
خروجی دیود Gunn (dBm)	
خروجی دیود Gunn (mW)	

بخش پنجم: آشنایی با پین مدولاتور و آشکارسازهای کریستالی:

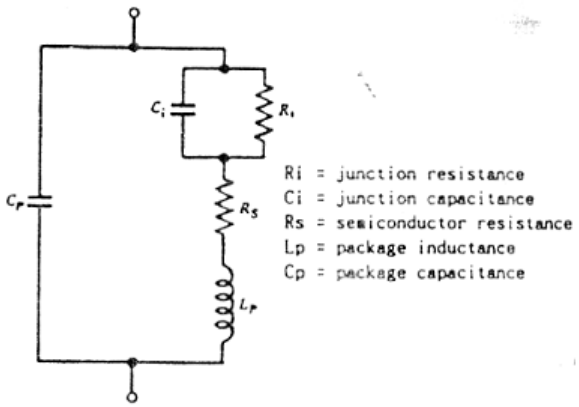
همانطور که در شکل زیر مشاهده می‌کنید، پین دیود با قرار دادن یک عایق نازک بین مواد N وP ، ساخته شده، که از این رو PIN دیود نامیده می‌شود.

ضخامت مواد P وN به مراتب از عایق بین آنها بیشتر می‌باشد. درحالت بایاس معکوس، پین دیود در فرکانس‌های مایکروویوی یک قطعه به شدت خازنی و مقاومتی است.

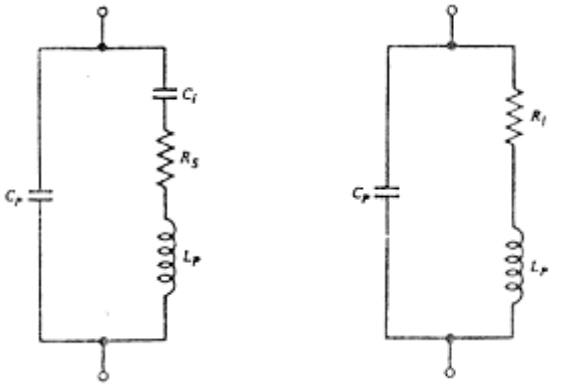
پین دیود یک قطعه با اثر بهمنی است، به این معنی که تحت بایاس مستقیم، یک اثر بهمنی در عایق اتفاق میافتد، که اجازه می‌دهد حفره‌ها از عنصر P و الکترون‌ها از عنصر N جریان یابند. بنابراین عایق به طور موثری رسانا می‌شود.



ساختمان پین دیود



مدار معادل



بایاس مستقیم پین دیود **بایاس معکوس پین دیود**

ساختمان و مدار معادل های پین دیود

یک پین دیود مدولاتور، دارای یک دیود متصل در میان یک موجبر است. وقتی شرایط بایاس با اعمال یک سیگنال موج مربعی به اندازه کافی بزرگ (و فرکانس پایین) در حضور سیگنال مایکروویو درون موجبر، تفییر

کند، دیود همانند یک مدولاتور عمل می‌کند. هنگامی که دیود بایاس معکوس است روی جریان انرژی تاثیر نمی‌گذارد. اما برداشتن کامل یا جزئی بایاس معکوس به دیود اجازه کنترل جریان انرژی را می‌دهد.

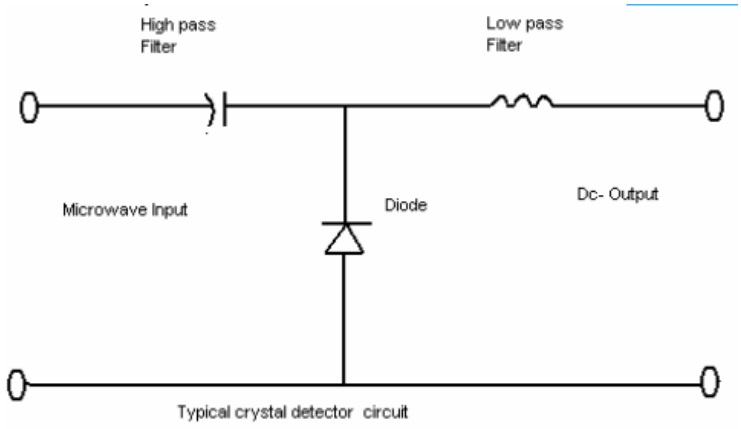
این نوع از مدولاتورها که با استفاده از یک اتصال عایقی بین P وN ساخته شده اند، مشخصه‌های مدولاسیون خوبی را به خاطر به حداقل رساندن فعالیت‌های یکسوسازی و تولید هارمونیک‌ها در فرآیند مدولاسیون، عرضه می‌کند.

ب) آشکارساز کریستالی

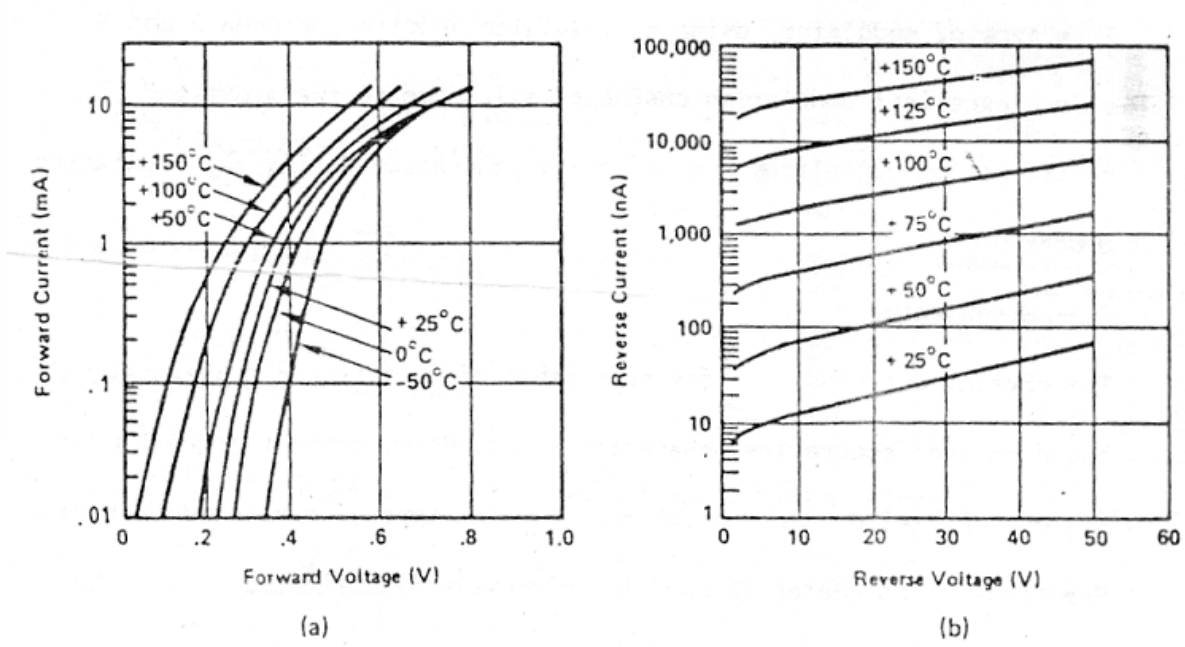
آشکارساز کریستالی قطعه‌ای است که قادر است سیگنال‌های مایکروویو را براساس ویژگی قانون مربع شناسایی کند. دیودهای کریستال سیلیکونی یا ژرمانیومی با اتصال نقطه ای+ محبوب ترین نوع آشکارسازهای کریستالی هستند.

منحنی‌های مشخصه و مدار یک آشکارساز معمولی را در زیر مشاهده می‌کنید.

دو فیلتر (بالاگذر در ورودی و پایین گذر در خروجی) برای جدا کردن فرکانس مایکروویو از ولتاژ DC



Typical crystal detector circuit



خروجی تعبیه شده‌اند.

در شکل بالا می‌خواهیم رابطه بین جریان دیود و ولتاژ دیود را بیابیم . عموما منحنی هایی مانند شکل را می‌توان با استفاده از بسط تیلور بر حسب توان‌های ولتاژ تقریب زد. $\mathrm{i} = a_0 + a_1 V^2 + a_3 V^3$

سه جمله اول برای تقریب زدن کامل ولتاژی به صورت زیر کافیست. V=A cos(ωt)

که در آن A، دامنه و ω=2πf. با جایگذاری این معادله در معادله اول داریم:

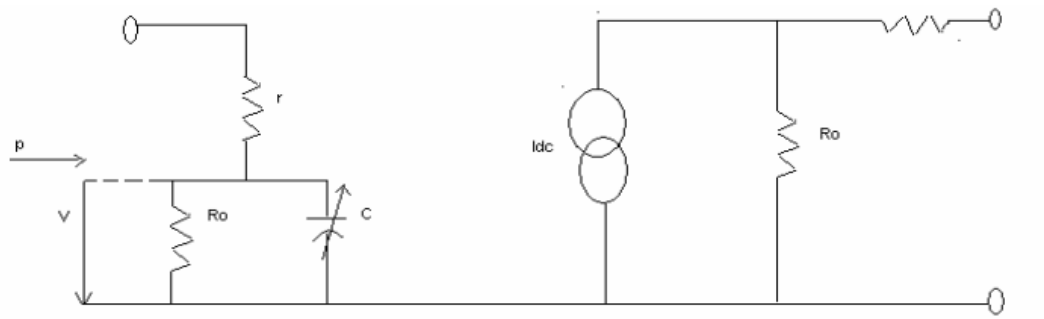
$$\mathrm{i} = a_0 + a_1 (A\, cos\omega t)^2 + a_2 (A\, cos\omega t)^2$$

$$\cos^2 \omega t = \frac{1}{2}(1 + cos2\omega t)$$

حالا مشخصه‌های قانون مربع واضح تر می‌شود . مولفه DC هم در جملات آورده شده است. هارمونیک دوم به اینگونه بیان می‌شود:

$$\mathrm{I} = a_0 + a_1 (A\, coswt)^2 + a_2 A^2 (1 + \ cos2wt)^2$$

در این حالت میتوان گفت جریان در آشکارساز متناسب است با مربع دامنه ولتاژ موج مایکروویو. این مفهوم تنها تا سطوح مشخصی از سیگنال معتبر است. علاوه بر مدار آشکارساز در شکل بالا، خود دیود را نیز میتوان به عنوان یک مدار معادل بیان کرد. در شکل زیر مدار معادل کامل یک آشکارساز ارائه شده است.



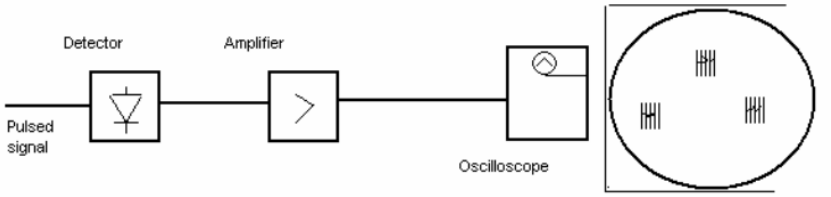
R_0 و C نشان دهنده‌ی امپدانس اتصال و r مقاومت داخلی دیود است. معیار شایستگی یک آشکارساز و حساسیت جریان عملکرد آشکارسازی به این صورت بیان می‌شود:

$$\text{حساسیت ولتاژ} = \frac{\text{ولتاژ مدار باز}}{\text{توان ورودی}} = \frac{R_0\, I_{dc}}{P_{in}}$$

$$\text{حساسیت جریان} = \frac{\text{جریان اتصال کوتاه}}{\text{توان ورودی}} = \frac{\frac{R_0}{r+R_0}}{P_{in}}$$

برای بیشینه کردن توان خروجی لازم است تا امپدانس مایکروویو دیود با امپدانس مشخصه موجبر هماهنگ باشد. دلیل دیگر برای تطبیق امپدانس این است که بازتاب از آشکارساز، حداقل شود زیرا که دقت اندازه‌گیری با بازتابش تحت تاثیر قرار می‌گیرد.

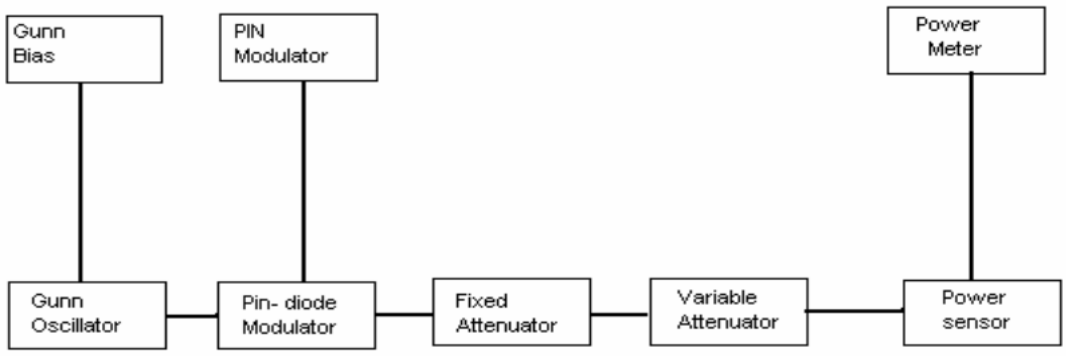
کمترین مقدار سیگنال قابل آشکارسازی توسط دیود بستگی به نویز در دیود دارد . توانایی آشکارسازی یک سیگنال توسط دیود در حضور نویز را حساسیت مماسی نامند.



در شکل بالا سیگنال مایکروویو که بصورت پالسی مدوله شده است، آشکارسازی و تقویت شده و در اسیلسکوپ نمایش داده شده است. مفهوم واقعی TTS این است که باید یک حداقل سطح توان مایکروویو وجود داشته باشد تا پالسی قویتر از نویز ایجاد شود. TTS یک آشکارساز، به شذت به پهنای باند تقویت کننده‌ای که بعد از آشکارساز قرار می‌گیرد وابسته است. زیرا که دامنه نویزِ روی اسکوپ، توسط پهنای باند تعیین می‌شود. مقادیر معمول برای یک آشکارساز مایکروویو عبارت است از: یک مگاهرتز پهنای باند و ۵۰- dBm برای TTS .

با پین مدولاتور، توان خوانده شده در پاورمتر، کمتر از زمانی است که منبع توان Gunn بر روی مد موج پیوسته قرار دارد. این، به دلیل برش دادن توان اسیلاتور Gunn بوسیله مدولاتور PIN می‌باشد.

ویژگی‌های قانون مربع در آشکار ساز کریستالی

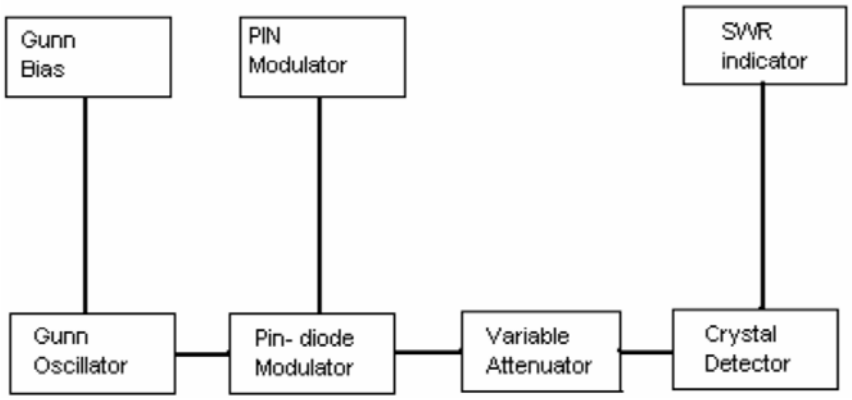


شکل ۰-۲دیاگرام تجهیزات برای تنظیم سطح توان خروجی

(۱) تجهیزات را مطابق شکل فوق، ببندید. پاورمتر را روشن کنید. دستگاه را برای چند دقیقه بادقت مشاهده کرده، مطمئن شوید که کالیبراسیون انجام شده است.

(۲) ولتاژ را به اسیلاتور Gunn و به مدولاتور PIN اعمال نموده، موج مربعی 1 kHz را به مدولاتور PIN اعمال **ننمایید.** در اینجا مرحله) [اثر] مدولاسیون نباید دخالت داشته باشد.

(۳) تضعیف‌کننده متغیر را روی 0 dB تنظیم نمایید. صفحه نمایش را برای خواندن برحسب dBm تغییر دهید. همانند شکل زیر، مبدل موجبری به کابل کواکسیال، سنسور پاورمتر ترموکوپل‌دار و پاورمتر را با یک آشکار ساز کریستالی و یک نشانگر SWR تعویض کرده و سیگنال 1kHz را به مدولاتور PIN اعمال نمایید.



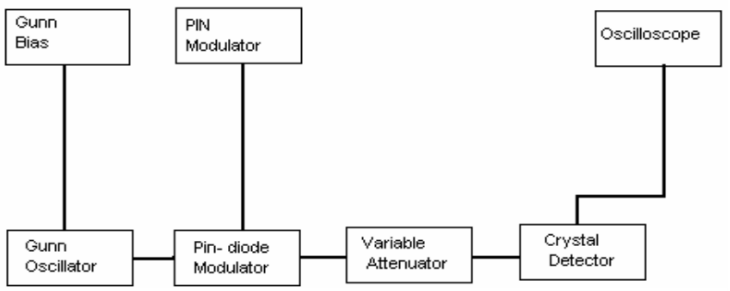
دیاگرام تجهیزات برای اندازه‌گیری مشخصات قانون مربع در یک آشکار ساز کریستالی

(۴) تضعیف‌کننده را با گام 1dB افزایش داده و به 20 dB برسانید. در هر گام، مقدار خوانده شده از SWRمتر را در جدول زیر بر حسب dB ثبت نمایید.

VSWR متر		توان ورودی	A dB
Vmin	Vmax		
dB	dB	dBm	

بررسی بیشتر پین مدولاتور:

در این قسمت می خواهیم سایر رفتارهای پین مدولاتور را بررسی کنیم. ست آپ زیر را ببندید:



دیاگرام ست آپ برای مدولاسیون موج مربعی

۱. گان اسیلاتور را روشن کنید.
۲. پین مدولاتور را هم روشن کنید.
۳. کابل BNC را از SWRمتر جدا کرده و به یک سیگنال ژنراتور بزنید.
۴. سیگنال ژنراتور را روی موج مربعی با فرکانس 1KHz و دامنه 2vp-p و آفست 1v بگذارید.
۵. سیگنال را اعمال کنید. چه مشاهده می کنید؟
۶. حالا سیگنال ژنراتور را روی موج سینوسی با همان تنظیمات قبلی تنظیم کنید.
۷. در خروجی چه مشاهده می کنید؟
۸. آفست را صفر کنید. چه مشاهده می کنید؟ این پدیده را چطور توجیه می کنید؟

بخش ششم: پاسخ فرکانسی

با استفاده از قابلیت جاروب فرکانس دستگاه پاورمتر، می توان پاسخ فرکانس را اندازه گرفت. در منوی اصلی، گزینه **sweep frequency** را انتخاب کرده، در این قسمت می توان فرکانس شروع، فرکانس پایان، گام های افزایش فرکانس و مدت زمان هر گام را تنظیم کرد. پس از تنظیمات با فشردن دکمه **start sweep**، جاروب فرکانسی آغاز می شود. به منوی اصلی بازگشته، به قسمت **power meter** رفته و می توان در این قسمت فرکانس لحظه ای و توان لحظه ای را مشاهده کرد. پس از تنظیمات اولیه **memory** و با انتخاب گزینه **Int.Trig** و گزینه **Auto Freq** مقادیر فرکانس و توان، در حافظه دستگاه ذخیره می شود. در نهایت در قسمت تنظیمات **memory** و انتخاب گزینه **dump memory** می توان اطلاعات را به کامپیوتر منتقل کرد. فایل منتقل شده، با فرمت **csv** است که بوسیله نرم افزار **excel** قابل رویت می‌باشد.

با استفاده از مبدل کواکس به موجبر، می توان سیگنال دستگاه را بوسیله کابل کواکس، از سر **SMA** دستگاه به موجبر انتقال داد و بوسیله پاور متر، توان را اندازه گرفت.

برای این کار، پاسخ فرکانسی قطعه فرکانس متر را اندازه گیری کنید...

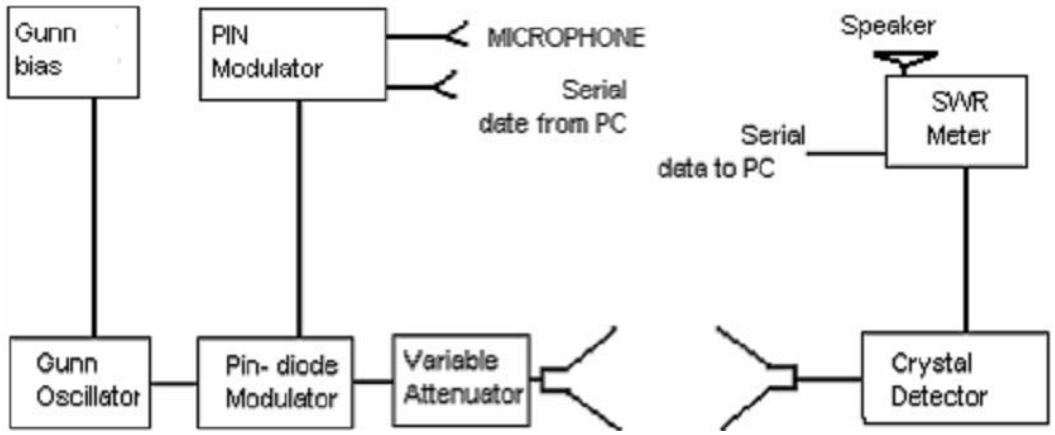
نکته قابل توجه این است که اغلب مشخصات اندازه گیری شده برای قطعات، از جمله تضعیف، **SWR**، امپدانس و... به ازای فرکانس های مختلف، ممکن است متفاوت باشند. با روش جاروب فرکانسی، می توانید این مشخصات را در فرکانس های مختلف اندازه گیری نمایید.

فصل ششم: لینک مایکروویو

لینک مایکروویو کاربردهای فراوانی برای انتقال بی سیم انواع اطلاعات از جمله صوت، تصویر، داده‌های رایانه ای و... دارد. در این آزمایش، مختصری با این سیستم آشنا می‌شویم:

۱. ست آپ را مطابق شکل ببندید.

۲. با اعمال هرنوع سیگنال به پین مدولاتور، سیگنال مایکروویو، مطابق نیاز مدوله شده و در گیرنده، پس از دریافت آشکار می‌شود.



۳. در منوی دستگاه، به بخش MOD.Signal بروید. ۴گزینه وجود دارد.

a. گزینه Mic: با استفاده از میکروفن تعبیه شده بر روی پنل دستگاه، می‌توان سیگنال مدولاتور را اعمال کرد.

b. گزینه CW: با استفاده از کانکتور BNC موجود روی پنل، می‌توان یک سیگنال موج پیوست را به مدولاتور اعمال کرد.

c. گزینه USB: دیتای دریافتی از پورت USB دستگاه را به پین مدولاتور اعمال می‌کند.