دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی برق

گروه مخابرات

دستور کار آزمایشگاه مایکروویو-۱

فهرست مطالب

موضوع.....صفحه

مقدمه.....۱

علامت‌های مشخصه‌ی عناصر مداری مایکروویو.....۲

فصل اول: آشنایی با ادوات، تجهیزات و وسایل اندازه‌گیری مورداستفاده در آزمایشگاه مایکروویو.....۴

لامپ کلایسترون بازتابی.....۵

نوسان‌ساز گان ۸

ابعاد سطح مقطع موج‌برهای مستطیلی و فرکانس قطع آن‌ها ۱۴

تضعیف‌کننده‌ها ۱۵

فرکانس سنج.....۱۶

خط شکافدار.....۱۷

اتصالات انتهایی.....۱۷

دیود آشکارساز.....۱۸

فصل دوم: آشنایی با لامپ کلایسترون، اندازه‌گیری پارامترهای مختلف موج و بررسی انتشار موج، اندازه‌گیری ضریب موج ساکن و امپدانس نرمالیزه.....۲۰

آزمایش اول:آشنایی با لامپ کلایسترون و مشاهده مُدهای مختلف آن.....۲۱

آزمایش دوم:اندازه‌گیری عبور و بازتاب امواج مایکروویو در فضا و اجسام مختلف، اندازه‌گیری فرکانس و طول‌موج λg داخل موج‌بر.....۲۴

آزمایش سوم: اندازه‌گیری ضریب موج ساکن بارهای مایکروویوی مختلف.....۲۸

آزمایش چهارم: برقراری تطبیق بین خط انتقال و مصرف‌کننده (بار).....۳۲

آزمایش پنجم: اندازه‌گیری امپدانس نرمالیزه و ضریب بازتاب بارهای مختلف.....۳۳

آزمایش ششم: اندازه‌گیری امپدانس نرمالیزه بارهای راکتیو.....۳۷

فصل سوم: کوپلرهای مایکروویوی و ماتریس پراکندگی.....۴۲

آزمایش هفتم: اندازه‌گیری مشخصات کوپلرهای مایکروویوی و افت بازگشتی و افت عبوری.....۴۳

آزمایش هشتم: اندازه‌گیری ماتریس پراکندگی(S).....۴۹

فصل چهارم: اندازه‌گیری مشخصات برخی از عناصر مداری غیرفعال مایکروویو.....۵۳

آزمایش نهم: اندازه‌گیری ماتریس پراکندگی اتصالات T سه‌دهنه (صفحه E و صفحه H) و T جادویی.....۵۴

آزمایش دهم: اندازه‌گیری مشخصات برخی از قطعات مداری ناهم‌پاسخِ مایکروویو.....۵۷

فصل پنجم: اندازه‌گیری قدرت خروجی قطعات فعال مایکروویوی.....۶۲

آزمایش یازدهم: اندازه‌گیری قدرت خروجی نوسان‌سازهای مایکروویو.....۶۳

فصل ششم: بررسی و کاربرد آنتن‌ها و برخی دیگر از عناصر مداری در یک ارتباط فرستنده و گیرنده مایکروویو.....۷۱

آزمایش دوازدهم: اندازه‌گیری مشخصات عناصر مداری در یک ارتباط فرستنده و گیرنده رادیویی.....۷۲

آزمایش سیزدهم: ترکیب دو سیگنال مایکروویو با استفاده از T جادویی.....۷۵

ضمیمه.....۷۷

مقدمه

دستور کار آزمایشگاه مایکروویو حاوی مطالبی در مورد آزمایش‌های مقدماتی و اصولی است و جمعاً شامل شش فصل و سیزده آزمایش است که در هر قسمت اصول و عملکرد بعضی از عناصر مداری مایکروویو موجود در آزمایشگاه، مورد مطالعه و آزمایش قرار می‌گیرند.

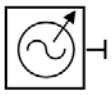
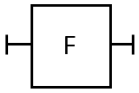
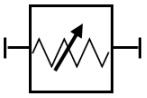
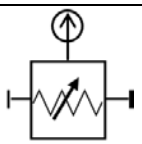
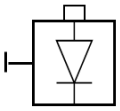
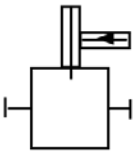
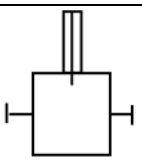
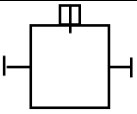
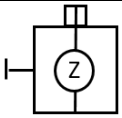
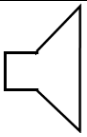
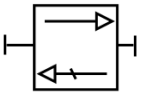
در تهیه این دستور کار، فرض بر آن بوده که آزمایش‌کننده اطلاعات لازم را درباره انتشار و هدایت امواج الکترومغناطیسی در موج‌برها و نیز محفظه‌های تشدید دارا بوده و همچنین آشنایی اولیه با عناصر مداری مایکروویو را داشته باشد. فصل اول نحوه عملکرد تعدادی از تجهیزات و وسایل اندازه‌گیری موجود در آزمایشگاه نظیر لامپ کلایستررون، دیود گان، دیود آشکارساز و ... را که همواره در تمامی آزمایش‌ها استفاده می‌شوند، شرح می‌دهد.

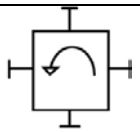
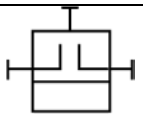
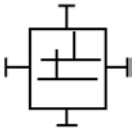
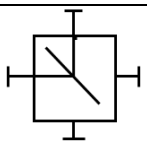
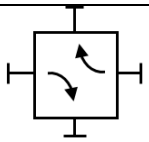
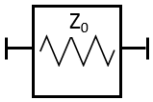
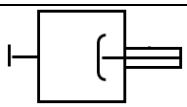
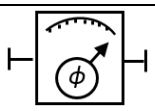
در فصل‌های بعد آزمایش‌هایی متناسب با مطالب درس مایکروویو ۱ طراحی و بیان شده است. علاوه براینکه فرض شده است آزمایش‌کننده اطلاعات کافی در مورد مطالب هر آزمایش را داراست، در ابتدای هر آزمایش در قسمت تئوری، توضیحات مختصری در مورد آزمایش و نحوه عملکرد قطعات داده شده است. بنابراین برای افزایش بازدهی و هم‌چنین به منظور بالا بردن سرعت انجام آزمایش‌ها لازم است دانشجویان قبل از هر جلسه آزمایشگاه، مطالب تئوری مربوط به آزمایش را مطالعه و سپس در کلاس حاضر شوند.

در مورد مشخصات دستگاه‌های اندازه‌گیری مورداستفاده در آزمایشگاه، در ضمیمه آخر این دستور کار، توضیح مختصری داده‌شده است.

قادری-فاضل-پاکیزه

علامت‌های مشخصه‌ی عناصر مداری مایکروویو

NAME	علامت مشخصه	نام
KLYSTRON MOUNT		لامپ کلایسترون
KLYSTRON POWER SUPPLY		منبع تغذیه کلایسترون
OSCILOSCOPE		اسیلوسکوپ
FREQUENCY METER		فرکانس متر
VARIABLE ATTENUATOR		تضعیف‌کننده متغیر
CALIBRATED VARIABLE ATTENUATOR		تضعیف‌کننده متغیر مدرج
CRYSTAL MOUNT		قطعه نگهدارنده دیود کریستال
VSWR METER		اندازه‌گیر ضریب موج ساکن
MOVABLE STUB TUNNER		موج‌بر تطبیق امپدانس
COAX TO WAVEGUIDE ADAPTER		مبدل کابل به موج‌بر
TERMISTOR		ترمیستور
HORN ANTENNA		آنتن بوقی
ISOLATOR		ایزولاتور

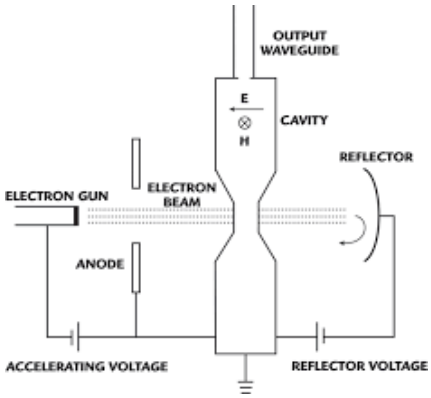
CIRCULATOR		سیرکولاتور
SERIES TEE		T(سه‌راهی) سری
SHUNT TEE		T(سه‌راهی) موازی
MAGIEC TEE (HYBRID TEE)		Tماژیک (هایبرید)
DIRECTIONAL COUPLER		نمونه‌بردار توجیهی
DUMMY LOAD		بار تطبیق شده
VARIABLE SHORT		اتصال کوتاه متغیر
POWER METER		قدرت سنج
ROTARY PHASE CHANGER		تغییردهنده فاز چرخان

فصل اول

آشنایی با ادوات، تجهیزات و وسایل اندازه‌گیری مورداستفاده در آزمایشگاه مایکروویو

لامپ کلایسترون بازتابی[1]

این لامپ یک نوسان‌ساز مایکروویو است که قدرت خروجی نسبتاً کمی دارد. به عبارت دیگر این لامپ، نوسان‌ساز قدرت با راندمان کم است و به همین دلیل اغلب در گیرنده‌های مایکروویو به‌عنوان نوسان‌ساز محلی مورداستفاده قرار می‌گرفته است. در حال حاضر از آن بیشتر به‌عنوان منبع نوسان در آزمایشگاه‌های مایکروویو استفاده می‌شود. شکل زیر عملکرد و نیز اجزای مدار آن را مشخص می‌کند:



شکل (۱-۱) لامپ کلایسترون بازتابی

اصول کار لامپ:

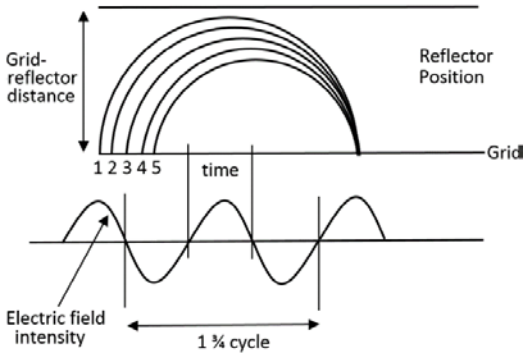
فیلامان باعث گرم شدن کاتد شده و درنتیجه از کاتد، الکترون صادر می‌شود. این الکترون‌ها به‌وسیله کانونی کننده در یک خط باریک متمرکز می‌شوند سپس با سرعت یکنواخت $v_0 = \sqrt{2\eta V_a}$ به‌طرف محفظه حرکت می‌کنند. آنگاه در آن $\left(\eta = \frac{q}{m}\right)$ از شبکه‌ای که بر سر راهشان است عبور کرده و به‌طرف الکترود دفع‌کننده می‌روند اما چون این الکترود به ولتاژ منفی وصل شده است، الکترون‌ها برمی‌گردند و به‌طرف محفظه رانده می‌شوند. به علت وجود نوسان در شبکه، حرکت الکترون‌ها از حالت یکنواخت خارج‌شده و به‌صورت تجمع و خوشه درمی‌آید. این خوشه‌های الکترون هر بار هنگام بازگشت به محفظه، انرژی خود را به آن منتقل کرده و باعث تشدید نوسان می‌شوند.

چگونگی تشکیل خوشه‌های الکترون (مدولاسیون سرعت) در لامپ کلایسترون بازتابی :

ابتدا محفظه نوسان در اثر عبور الکترون‌ها دارای نوسانات بسیار ضعیفی خواهد شد. این نوسانات بین دو شبکه محفظه، یک میدان الکتریکی متغیر در جهت یا خلاف جهت حرکت الکترون‌ها به وجود می‌آورد که باعث کم و زیاد شدن سرعت حرکت الکترون‌ها در لحظات مختلف می‌شود. درنتیجه هنگام عبور الکترون‌ها از بین شبکه‌های محفظه، به سرعت بعضی از آن‌ها افزوده و از سرعت بعضی نیز کاسته می‌شود. آن دسته از الکترون‌ها که سرعتشان زیاد شده، در رفت و برگشت مسافت بیشتری طی می‌کنند و آن‌ها که از سرعتشان کاسته شده مسافت کمتری می‌پیمایند. درنتیجه تعدادی از الکترون‌ها هنگام بازگشت به هم می‌رسند و از حالت توزیع یکنواخت خارج‌شده و به‌صورت خوشه در می‌آیند. این عمل همچنان تکرار می‌شود و دسته‌های الکترون به ترتیب به محفظه رسیده و انرژی خود را به‌صورت فیدبک به محفظه می‌دهند تا نوسانات با دامنه مشخص در محفظه پایدار بمانند.

برای توضیح بیشتر در مورد مدولاسیون سرعت شکل (۱–۲) را در نظر گرفته و در لحظات مختلف سرعت الکترون‌ها را بررسی می‌کنیم:

[1] Reflex Klystron



شکل (۱–۲) نمایش تجمع الکترون‌ها

در لحظه اول، ولتاژ شکاف محفظه حداکثر مقدار مثبت خود را داراست و باعث می‌شود که الکترون‌هایی که در این لحظه از شکاف عبور می‌کنند، حداکثر سرعت خود را داشته باشند و لذا مسافت بیشتری طی نموده و به محفظه برسند. در لحظه دوم، ولتاژ شکاف صفر است و تأثیری بر سرعت الکترون‌ها نمی‌گذارد. در لحظه پنجم، ولتاژ شکاف حداکثر مقدار منفی خود را دارد و باعث می‌شود سرعت الکترون‌هایی که در این لحظه از شکاف عبور می‌کنند، به حداقل رسیده و مسافت کمتری طی نمایند.

حال اگر دو لحظه اول و پنجم را در نظر بگیریم، ملاحظه می‌کنیم که الکترون‌های لحظه پنجم باآنکه دیرتر شروع به حرکت کرده‌اند، چون مسافت کمتری می‌پیمایند هنگام بازگشت در یک نقطه به الکترون‌های لحظه اول می‌رسند. لذا در فاصله زمانی بین ماکزیمم تا مینیمم شدن ولتاژ شکاف، الکترون‌هایی که از شکاف عبور می‌کنند، می‌توانند هنگام بازگشت در یک نقطه به هم برسند و این عمل در هر سیکل تکرار می‌شود. اگر ولتاژ منفی رفلکتور را طوری تنظیم کنیم که این دسته‌های الکترون در لحظه‌های مناسبی به محفظه وارد شوند، موجب تشدید نوسان در محفظه خواهند شد. به این ترتیب به ازای مقادیری از ولتاژ منفی رفلکتور، محفظه نوسان نخواهد کرد. زمانی که طول می‌کشد تا الکترون‌ها از شکاف محفظه به سمت رفلکتور رفته و دوباره به محفظه بازگردند، با τ نشان داده می‌شود.

مبنا را الکترونی فرض می‌کنیم که در لحظه سوم از شکاف به‌طرف رفلکتور حرکت می‌کند. (در این لامپ، زمان عبور الکترون بین دو شبکه محفظه اهمیت خاصی دارد زیرا برای پایداری نوسانات، لازم است که مقدار آن، نسبت به پریود نوسان خیلی کوچک باشد.)

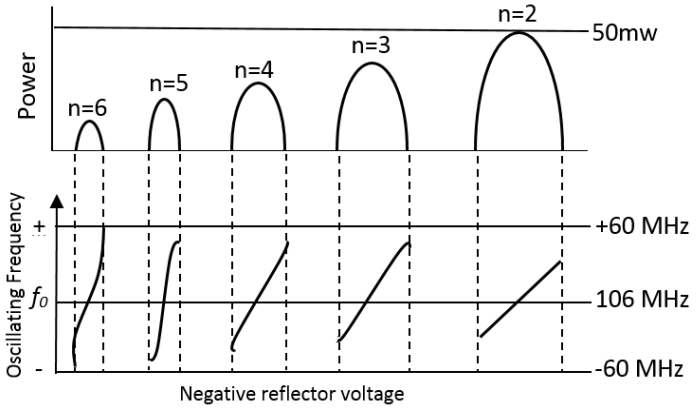
اگر زمان τ را طوری تنظیم کنیم که موقع رسیدن دسته‌های الکترون به شکاف، دقیقاً لحظه‌ای باشد که ولتاژ ac در آن حداکثر مقدار منفی خود را داشته باشد، باعث ایست الکترون‌ها می‌شود. درنتیجه الکترون‌ها مقدار قابل‌ملاحظه‌ای از انرژی خود را به نوسان محفظه داده و باعث تقویت آن می‌شوند.

مقدار τ بر حسب پریود نوسان (T) از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\tau = \left(N + \frac{3}{4} \right) T$$

در رابطه بالا N عددی صحیح است که شماره مد نوسانی را مشخص می‌کند و مقدار آن معمولاً ۵ و گاهی به ۶ هم می‌رسد. در شکل (۱-۲) مقدار آن ۱ انتخاب شده است.

اگر ولتاژ آند را در یک مقدار معین ثابت نگه‌داشته و ولتاژ رفلکتور را تغییر دهیم، دامنه نوسانات و فرکانس کلایسترون تغییر خواهد کرد و چنان چه این مقادیر دامنه و فرکانس را بر حسب تغییرات ولتاژ رفلکتور رسم نماییم، منحنی‌های شکل (۱-۳) حاصل می‌شود:



شکل (۱-۳) مُدهای خروجی کلایسترون

در منحنی‌های فوق مشاهده می‌شود که با تغییر ولتاژ رفلکتور، فرکانس نوسانات نیز تغییر می‌کند.

مقدار τ را همچنین می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$\tau = 2\frac{v}{\eta E_r}$$

که در آن η نسبت بار الکتریکی الکترون به جرم آن است. E_r شدت میدان الکتریکی یکنواخت حاصل از ولتاژ منفی رفلکتور در D است. D فاصله بین شبکه محفظه و صفحه رفلکتور و v سرعت حرکت الکترون به ازای یک مقدار ثابت از ولتاژ اشعه V_a است. اگر N را برای الکترون، مبنا در نظر بگیریم، رابطه بالا را می‌توان چنین نوشت:

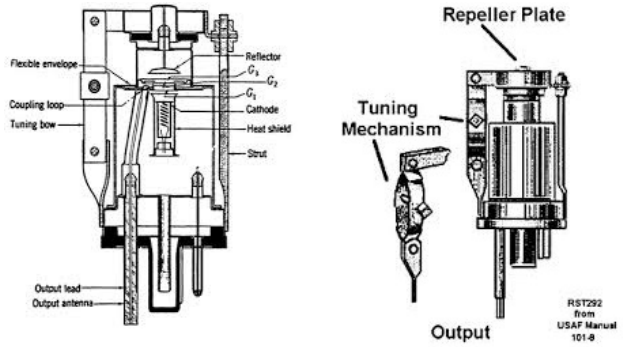
$$\tau = 2\frac{v_0}{\eta V_r}D = \left(N + \frac{3}{4}\right)T$$

از رابطه بالا چنین برمی‌آید که اولاً: هر اندازه مقدار V_r بیشتر باشد، مقدار τ کمتر خواهد بود و درنتیجه عدد N نیز کوچک می‌شود. ثانیاً: به ازای آن مقدار از V_r که در آن N نتواند عدد صحیح باشد، عمل فیدبک با فاز مناسب صورت نگرفته و کلایسترون خروجی نخواهد داشت.

فرکانس کلایسترون توسط محفظه‌ی تشدید که در آن تعبیه شده، مشخص می‌شود که یک محفظه مکعب مستطیلی است و در مد اصلی خود نوسان می‌کند. همان‌گونه که گفته شد، برای این‌که عمل تجمع الکترون‌ها و فیدبک در آن با فاز مناسب صورت گیرد، لازم است که زمان عبور الکترون نسبت به پریود نوسان کمتر باشد. لذا در یک قسمت از محفظه، فاصله بین دو دیواره مقابل را تا حد ممکن کم می‌کنند و نیز برای این‌که الکترون‌ها به‌راحتی از آن‌ها عبور کنند، دیواره‌ها را مشبک می‌نمایند. این تغییر شکل محفظه را، کم کردن اثر زمان عبور می‌نامند.

دیگر آن‌که بدنه محفظه کمی خاصیت کششی دارد و با کم و زیاد کردن فشار وارد بر آن، حجم و ابعادش تغییر کرده و درنتیجه فرکانس تشدید کلایسترون تغییر می‌کند. این کار با یک آچار مخصوص و پیچی که روی کلایسترون سوار است، صورت می‌گیرد. با این روش، فرکانس کلایسترون تا حد زیادی می‌تواند تغییر کند.

در شکل زیر شمای ظاهری و همراه با آن اجزای یک کلایسترون بازتابی مشاهده می‌شود:



شکل (۱-۴) ساختمان لامپ کلایستروون بازتابی

نوسان‌ساز گان(Gunn Oscillator)

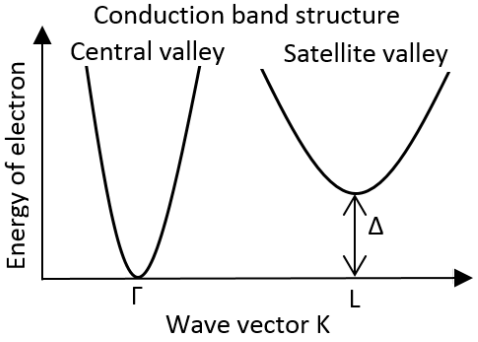
نوسان‌ساز گان یک نوسان‌ساز مایکروویو است که قدرت خروجی نسبتاً کمی دارد و در آزمایشگاه‌های مایکروویو به‌عنوان منبع نوسان و نیز در سیستم‌های ارتباطی مایکروویو به‌صورت نوسان‌ساز محلی مورداستفاده قرار می‌گیرد.

قسمت اصلی در این نوسان‌ساز یک دیود است که معمولاً از جنس گالیم آرسناید و از نوع (n) است که به نام کاشف آن، دیود گان نامگذاری شده است. گان ملاحظه نمود که وقتی مقدار ولتاژ بایاس در این دیود، به حد آستانه می‌رسد، دیود شروع به نوسان می‌کند. مقدار این ولتاژ در حدود ۳/۵ kV/cm است اما لایه فعال در این دیود بسیار نازک است و از چند میکرون تجاوز نمی‌کند. لذا مقدار ولتاژ بایاس دیود در باند فرکانسی X عملاً در حدود ۱۰ V خواهد بود.

برای آشنایی با اثر گان بهتر است قبلاً مروری به رفتار الکترون‌ها در شبکه بلوری نیمه‌رساناها داشته باشیم:

۱- بررسی سطوح انرژی و انرژی مربوط به هر یک از این سطوح در گالیم آرسناید

برای بررسی حرکت الکترون‌ها در شبکه بلوری گالیم آرسناید کافی است دو سطح از این سطوح انرژی را که مربوط به پایین‌ترین سطوح در باند هدایت بوده و به شکل سهمی است، در نظر گرفت که در شکل (۱-۵) به نام‌های L و Γ مشخص‌شده‌اند. سهمی (Γ) که سهمی مرکزی نیز نامیده می‌شود، پایین‌ترین سطح انرژی در باند هدایت است.



شکل (۱-۵) انرژی الکترون در هر یک از سطوح انرژی بر حسب بردار موج

لذا با فرض سیمی بودن سطوح انرژی در باند هدایت، انرژی الکترون در هر یک از این سطوح برابراست با :

$$E = \frac{\hbar^2 K^2}{2m^*}$$

در رابطه بالا k دامنه بردار موج، m^* جرم مؤثر الکترون مربوط به هر یک از سطوح انرژی در نیمه‌رسانا و $\hbar$ ثابت پلانک است که به 2π تقسیم شده است.

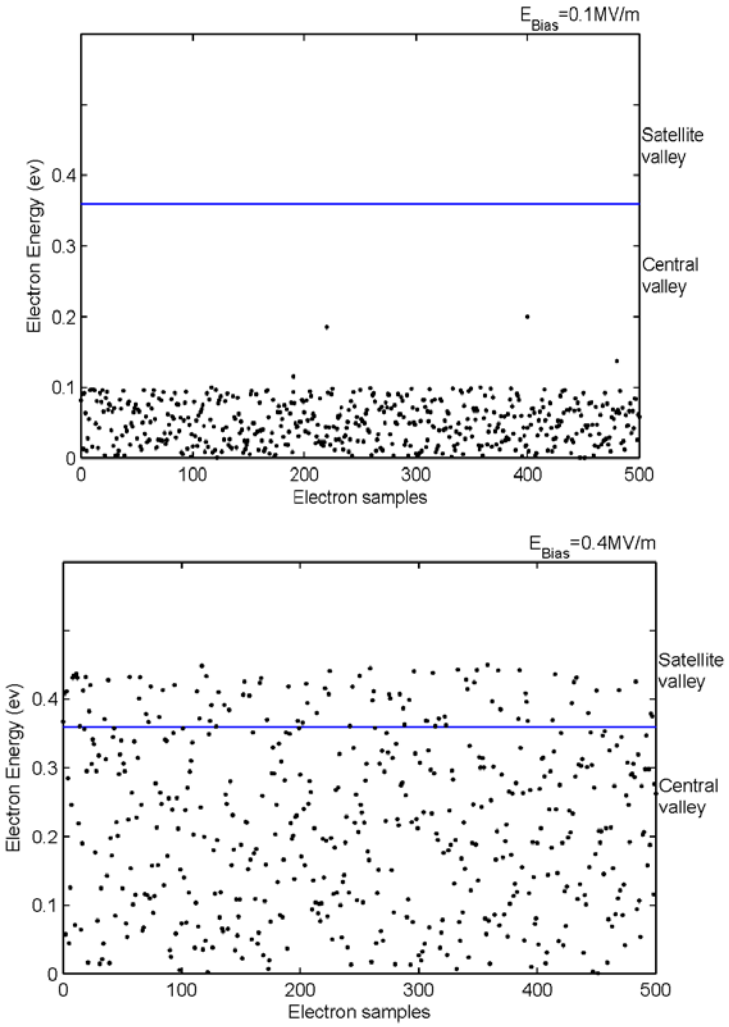
در اثر برخورد الکترون با اتم‌های کریستال، جرم الکترون آزاد در داخل نیمه‌رسانا بیشتر از جرم الکترون آزاد در فضای آزاد است. بر این اساس جرم مؤثر الکترون در سهمی مرکزی خیلی کمتر از جرم الکترون در سهمی کناری است به‌طوری‌که $(m_L^* = 5m_\Gamma^*)$ و این پدیده اساس اثر گان در دیود گان به شمار می‌رود.

انرژی لازم برای صعود الکترون از سهمی مرکزی (Γ) به سهمی کناری (L) که در شکل با Δ نمایش داده‌شده، برای گالیم آرسناید $\Delta = 0.36eV$ است.

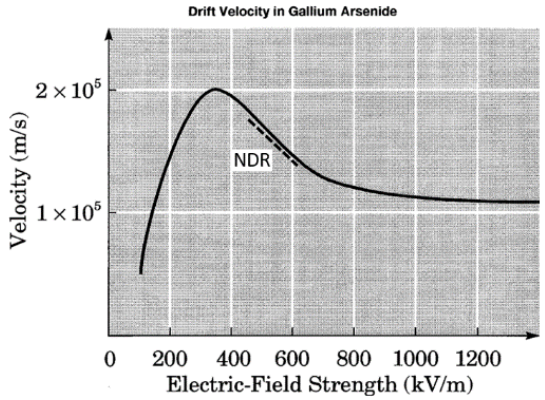
۲- نحوه جابجایی الکترون در نیمه‌رسانای بایاس شده

درحالی‌که هیچ ولتاژی به نیمه‌رسانا اعمال نشود، تقریباً تمامی الکترون‌ها در سهمی مرکزی (Γ) قرار خواهند گرفت زیرا انرژی حرارتی آن‌ها به مراتب کمتر از (Δ) انرژی شکاف است. زمانی که قطعه بایاس شده الکترون‌ها، تحت تأثیر شدت میدان الکتریکی حاصل از ولتاژ بایاس شتاب می‌گیرند و درصورتی‌که انرژی آن‌ها کافی باشد، می‌توانند خود را به سهمی کناری (L) برسانند. این پدیده توسط مونت کارلو بررسی و شبیه‌سازی‌شده و در شکل(۱-۶) نمایش داده‌شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که با زیاد شدن ولتاژ بایاس، انرژی متوسط الکترون‌ها هم زیاد می‌شود. در نتیجه تعداد الکترون‌هایی که انرژی کافی برای پرش به سطح انرژی بالا (از سطح Γ به سطح L) به دست آورده‌اند، به‌طور فزاینده افزایش می‌یابد.در گالیم آرسناید، زمانی که ولتاژ بایاس به مقدار (۰/۴ MV/m)برسد، تجمع قابل‌ملاحظه‌ای از الکترون‌ها در سهمی کناری به وقوع می‌پیوندد.

الکترون‌هایی که به سطح انرژی (L) رسیده‌اند، به علت افزایش جرم مؤثرشان، سرعت حرکت‌شان کند می‌شود، لذا زیاد شدن ولتاژ بایاس، باعث کند شدن حرکت الکترون‌ها در سطح انرژی (L) شده و در نتیجه کاهش جریان الکتریکی دیود را دربر خواهد داشت. این کاهش جریان با زیاد شدن ولتاژ یا ازدیاد شدت میدان الکتریکی حاصل از آن، نشان‌دهنده‌یک مقاومت منفی در ناحیه‌ای از منحنی دیود است که در شکل (۱-۷) با (NDR) مشخص‌شده است



شکل (۱-۶) نمایش تجمع الکترون‌ها در سطح انرژی (L)



شکل (۱-۷) نمایش مقاومت منفی دیود گان

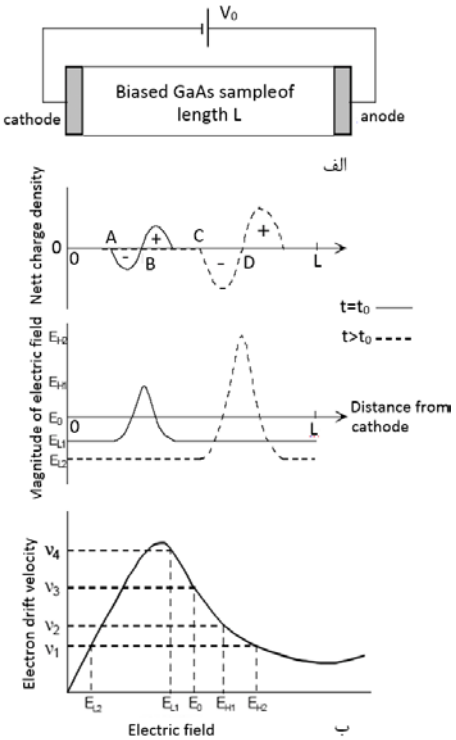
۳- نحوه تشکیل و نمایش حوزه گان

برای بررسی پدیده مقاومت منفی در گالیم آرسناید که منجر به پدیده نوسان‌ساز گان می‌شود، ابتدا یک قطعه از گالیم آرسناید به طول (L) را که به‌طور یکنواخت ناخالصی(n) در آن توزیع شده و طبق شکل (۱-۸الف) با ولتاژ V_0 بایاس شده است، در نظر می‌گیریم. ابتدا شدت میدان الکتریکی در طول قطعه به‌طور یکنواخت بوده و برابر $\left(E = \frac{V_0}{L}\right)$ است. در این حالت باید الکترون‌ها با سرعت ثابت v_3 از کاتد به سمت آند حرکت کنند. حال اگر در زمان $t = t_0$ یک اختلال

کوچک در مقدار بار به وجود آید، این وضع می‌تواند ناشی از نویز حرارتی باشد که در شکل (۱-۸ب) مشاهده می‌شود و شدت میدان الکتریکی حاصل از آن نیز در شکل (۱-۸ب) با خط پر نشان داده‌شده است.

الکترون‌ها در نقطه A با شدت میدان الکتریکی E_{L1} مواجه هستند و با سرعت v_4 به سمت آند حرکت می‌کنند. در نقطه B الکترون‌ها تحت تأثیر شدت میدان E_{H1} قرار گرفته و با سرعت v_2 که کوچک‌تر از v_4 است، به سمت آند می‌روند. در نتیجه یک تجمع الکترونی بین نقاط A و B به وجود آمده و باعث زیاد شدن بار منفی خالص بین نقاط A و B می‌شود. به علت سرعت زیاد الکترون‌ها در ناحیه سمت راست نقطه A ، انباشتگی الکترون‌ها در آن ناحیه نسبت به نقطه B به مرور کم می‌شود. بدین ترتیب اختلال اولیه به وجود آمده در بار الکتریکی، به‌صورت حوزه دی پل الکتریکی درمی‌آید و حوزه گان نامیده می‌شود که به سمت آند حرکت می‌کند و در شکل (۱-۸ب) در زمان t_0 <t به‌صورت منحنی خط‌چین نمایش داده‌شده است. در حالت پایدار وقتی حوزه گان به‌طور مؤثر شکل گرفت، سرعت الکترون‌هایی که به سمت آند در حرکت هستند، در نقاط C و D باهم مساوی و برابر v_1 می‌شود.

قابل‌ذکر است که برای شکل‌گیری حوزه گان لازم است نمونه مورد آزمایش در ناحیه NDR بایاس شود. وقتی یک بار حوزه گان تشکیل شد، شدت میدان الکتریکی در قسمت باقیمانده نمونه، به زیر ناحیه NDR افت می‌کند تا حوزه بعدی شکل گیرد و به محض این‌که حوزه در ناحیه آند جذب شد، مقدار متوسط شدت میدان الکتریکی در نمونه، به حالت قبل می‌رسد و لذا حوزه‌های بعدی می‌توانند تشکیل شوند.



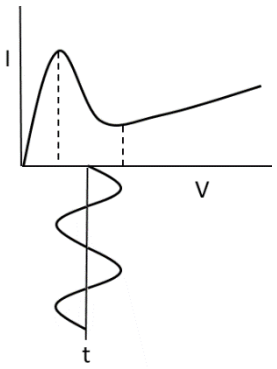
شکل(۱-۸) نمایش الف) یک نمونه گالیم آرسناید بایاس شده ب) تشکیل حوزه گان در گالیم آرسناید

تشکیل پشت سرهم حوزه‌ها و ریزش آن‌ها به ناحیه آند، منجر به ایجاد یک جریان ac می‌شود که در فرکانس معینی نوسان می‌کند. در این مد نوسانی که مد گان نامیده می‌شود، فرکانس نوسانات بستگی به فاصله‌ای دارد که حوزه باید طی کند تا در آند جذب شود. این فاصله تقریباً برابر طول ناحیه فعال در نمونه است. این مد نوسانی را مُد گذار هم

می‌گویند. مقدار ولتاژ بایاس روی سرعت ریزش و در نتیجه فرکانس نوسانات اثر خواهد گذاشت. در این مُد نوسانی رفتار دیود گان تا حدی شبیه نوسان‌ساز لامپ کلایسترون بازتابی است.

دومین مُد نوسانی دیود گان مُد (LSA) نامیده می‌شود که مربوط به تجمع بار در یک نقطه بین کاتد و آند دیود است. در این مُد نوسان، دیود گان به‌صورت جزئی از مدار نوسان به حساب می‌آید. در این حالت معمولاً مدار نوسان‌ساز طوری طراحی می‌شود که فرکانس تشدید آن، چند برابر فرکانس اصلی دیود (مُد گان) باشد. در نتیجه حوزه دی‌پل، فرصت کافی برای تولید و کامل شدن ندارد. لذا دیود صرفاً به‌صورت یک مقاومت منفی در مدار ظاهر می‌شود. در این مُد قدرت خروجی نوسان‌ساز نسبت به مُد اول، بیشتر است.

مقدار ولتاژ بایاس معمولاً کمی بیشتر از ولتاژ آستانه انتخاب می‌شود. دامنه پیک تا پیک نوسانات تقریباً برابر آن مقدار از افزایش ولتاژ بایاس است که به ازای آن، دیود از خود مقاومت منفی نشان می‌دهد مطابق شکل(۱-۹). درهرحال حداکثر بازده این نوسان‌ساز، بیشتر از دو درصد نیست. مقدار مقاومت مدار نوسانی R معمولاً به اندازه ۲۰ درصد بیشتر از مقدار حداکثر مقاومت منفی دیود انتخاب می‌شود. با این انتخاب می‌توان مطمئن بود که نوسان در مدار شروع خواهد شد. دامنه نوسانات تا حدی می‌تواند افزایش پیدا کند که مقدار مقاومت منفی دیود R_d مساوی مقدار مقاومت مدار نوسانی (R) باشد.



شکل (۱-۹) نمایش نوسانات خروجی از دو سر دیود گان

مدارهای نوسان‌ساز گان

دیود گان زمانی که در مُد نوسانی (LSA) مورداستفاده قرار می‌گیرد، دارای مدار معادلی به‌صورت یک مقاومت R_d موازی با یک خازن C_d است. مقدار مقاومت منفی دیود بین ۵- تا ۲۰- اهم است. لذا مقدار مقاومت محفظه تشدید با بار خارجی R ، باید در حدود ۲۰ درصد بیشتر از مقاومت منفی دیود انتخاب شود تا مقدار مقاومت معادل $\frac{-R_dR}{R-R_d}$ منفی باشد. همچنین محفظه تشدید مورداستفاده، باید خاصیت تبدیل امپدانس داشته باشد تا بتواند امپدانس موج‌بر خروجی را که دارای مقدار نسبتاً زیادی است، طوری تغییر دهد که با امپدانس کم دیود به حالت تطبیق درآید.

در شکل (۱-۱۰) یک محفظه تشدید موج‌بری مشاهده می‌شود. دیود گان در داخل موج‌بر زیر یک میله فلزی قرار گرفته و قسمت بالای میله فلزی، از موج‌بر ایزوله شده است. ولتاژ بایاس dc از طریق میله فلزی به دیود اعمال می‌شود. برای جلوگیری از ورود انرژی مایکروویو به داخل ولتاژ بایاس، از یک فیلتر میان‌گذر که به‌صورت دو قطعه کابل هم‌محور $\frac{\lambda}{4}$ با امپدانس‌های متفاوت است، استفاده‌شده است. میله فلزی به‌صورت یک هیت سینک هم برای دیود عمل می‌کند. به‌طوری‌که حرارت دیود از آن طریق وارد فضای خالی محفظه می‌شود. با تغییر محل اتصال کوتاه انتهایی، محفظه در

فرکانس موردنظر نوسان خواهد کرد. مقدار تزویج انرژی از محفظه به موجبر، با تغییر مقدار مقاومت سلفی پنجره سلفی که در جلو محفظه تشدید قرار گرفته، صورت می‌پذیرد. برای تطبیق ظریف امپدانس محفظه تشدید، از یک پیچ تنظیم استفاده‌شده است.

در شکل (۱-۱۰الف) یک محفظه تشدید موجبری همراه با پیچ تنظیم جهت نوسان‌ساز گان مشاهده می‌شود.

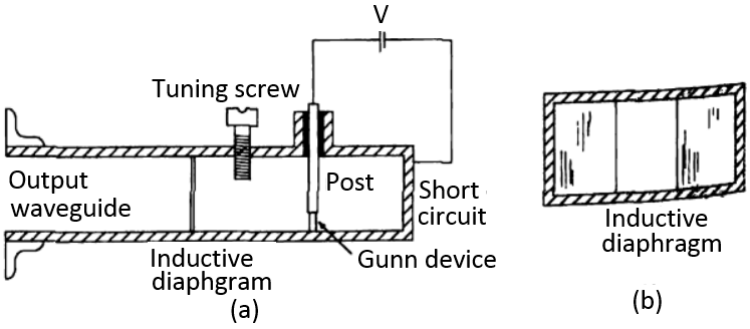
شکل (۱-۱۰ب) نیز یک پنجره سلفی برای تزویج انرژی از محفظه به موجبر خروجی را نشان می‌دهد.

همچنین در شکل (۱-۱۱) یک محفظه تشدید ساده دیگر، همراه با یک دیود گان ملاحظه می‌شود. در این شکل، برای تطبیق امپدانس کم محفظه تشدید به امپدانس نسبتاً زیاد موجبر خروجی و در محل قرار گرفتن دیود گان، از یک مبدل امپدانس $\frac{\lambda}{4}$ استفاده‌شده است.

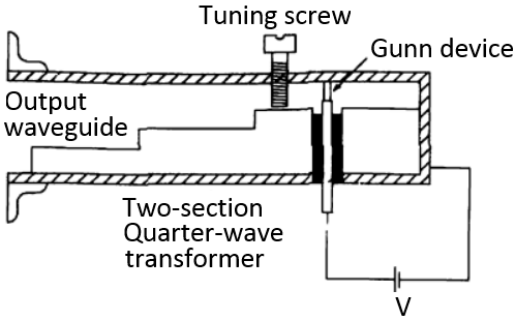
فرکانس تشدید محفظه مکعب مستطیلی را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$f_r = f_{nml} = \frac{ck_{nml}}{2\pi}$$

فرکانس تشدید را می‌توان با جابجایی محل اتصال کوتاه صفحه انتهایی محفظه، تنظیم نمود. برای تطبیق ظریف محفظه در این حالت نیز از یک پیچ تنظیم استفاده‌شده است.



شکل (۱-۱۰الف) یک محفظه تشدید موجبری همراه نوسان‌ساز گان(۱-۱۰ب) پنجره‌ی سلفی برای تزویج انرژی از محفظه به موجبر



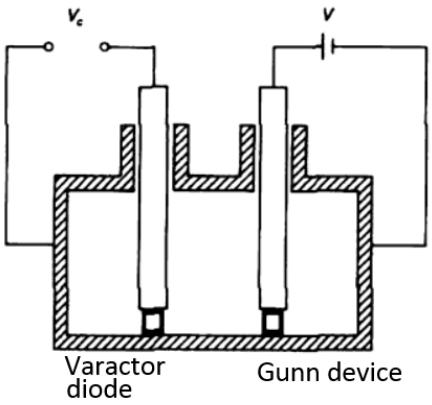
شکل(۱-۱۱) یک محفظه نوسان همراه با دیود گان و یک مبدل امپدانس $\frac{\lambda}{4}$ دو قسمتی با پیچ تنظیم را نشان می‌دهد.

برای تنظیم فرکانس تشدید محفظه، می‌توان از یک دیود ورکتور که همراه با دیود گان در داخل محفظه تشدید گرفته باشد، استفاده کرد. در این حالت با تغییر ولتاژ بایاس دیود ورکتور، می‌توان فرکانس تشدید محفظه را تغییر داد. اگر یک

ولتاژ سوییپ دندانه اره‌ای به دیود ورکتور اعمال شود، خروجی نوسان‌ساز به‌صورت یک موج مدوله‌شده فرکانس، ظاهر خواهد شد. همچنین می‌توان برای تنظیم و تغییر فرکانس تشدید محفظه نوسان، از یک میله دی‌الکتریک استوانه‌ای با طول متغیر در داخل محفظه استفاده کرد.

گاهی دیود ورکتور داخل یک قطعه موجبر، به‌طور جداگانه وصل شده و بایاس می‌شود. در این حالت، قطعه موجبری که دیود ورکتور داخل آن سوار شده، بلافاصله قبل از نوسان‌ساز قرار می‌گیرد.

برای این‌که خروجی نوسان‌ساز به‌صورت پالس باشد، باید ولتاژ بایاس dc دیود گان را به‌صورت پالس‌هایی با زمان ادامه کم انتخاب نمود. شکل (۱-۱۲) یک محفظه نوسان‌ساز گان همراه با یک دیود ورکتور را نشان می‌دهد:



شکل (۱-۱۲) یک محفظه نوسان‌ساز گان همراه با یک دیود ورکتور

ابعاد سطح مقطع موجبرهای مستطیلی و فرکانس قطع آن‌ها

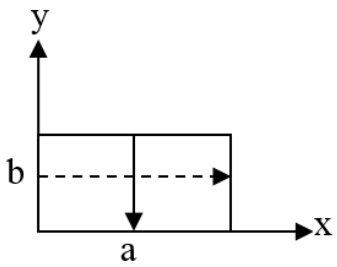
در فرکانس‌های زیاد، کابل‌های هم‌محور نسبت به خطوط دوسیمه متعادل، کارایی بهتری دارند. انتقال انرژی توسط آن‌ها از فرکانس صفر تا حد بالایی- که اصطلاحاً فرکانس قطع کابل هم‌محور نامیده می‌شود- امکان‌پذیر است. مقدار این فرکانس $f_c = \frac{c}{(a+b)\pi\sqrt{\varepsilon_r}}$ است که در آن a شعاع رسانا داخلی، b شعاع داخلی رسانا بیرونی، ε_r ضریب نسبی دی‌الکتریک کابل هم‌محور و c سرعت حرکت موج در فضای آزاد است. اگر فرکانس از این حد تجاوز کند، باعث به وجود آمدن مُدهای بالا، X پلاریزه شدن اتم‌های دی‌الکتریک، زیاد شدن اثر پوستی و افت ناشی از آن‌ها شده و درنتیجه اشکالاتی در انتقال موج به وجود می‌آورد. لذا معمولاً از فرکانس‌های UHF به بالا، برای انتقال انرژی، از موجبر استفاده می‌کنند. برعکس، در خطوط انتقال دوسیمه برای هدایت موج توسط موجبر، باید فرکانس موج از فرکانس قطع موجبر بیشتر باشد.

فرکانس قطع موجبرها به ابعاد سطح مقطع آن‌ها بستگی دارد. ابعاد موجبر با مقطع مستطیلی، با a و b مشخص می‌شوند و معمولاً هدایت موج به‌صورت مُد اصلی TE انجام می‌پذیرد. در این صورت، فرکانس قطع و یا طول‌موج قطع موجبر، از رابطه $\lambda_c = \frac{2\pi}{\kappa_c} = 2a$ به دست می‌آید که در موجبرهای استاندارد $b = a/2$ است.

طیف فرکانس‌های رادیویی بین ۱ تا ۳۰۰ گیگاهرتز را مایکروویو می‌نامند. این طیف فرکانسی مایکروویو، خود به باندهای متعددی تقسیم‌بندی شده است. برای هدایت موج در هر باند فرکانسی، از موجبر همان باند استفاده می‌شود که در

جداول مربوطه ابعاد آن‌ها ذکر شده است. برای جلوگیری از انعکاس در اثر تغییرات بیشتر امپدانس، معمولاً عرض باند فرکانسی هر موجبر از ۱/۲۵ الی ۱/۹ فرکانس قطع آن موجبر، انتخاب می‌شود.

برای تحریک مُد اصلی (TE) در موجبرها از یک پروب که در داخل موجبر به فاصله یک‌چهارم طول‌موج از انتهای اتصال کوتاه شده موجبر- که در فاصله a/2 عمود بر بعد a و موازی با بعد b قرار گرفته باشد- استفاده می‌شود. در بررسی موجبرها معمولاً بعد a به‌صورت افقی منطبق بر محور x ها و بعد b به‌صورت عمودی منطبق بر محور y ها و محور موجبر منطبق بر محور z ها و در امتداد حرکت موج قرار می‌گیرد. مؤلفه الکتریکی موج E_y موازی با پروب بوده لذا موج دارای پلاریزاسیون عمودی است. مؤلفه مغناطیسی H_x به حالت افقی و منطبق بر محور x ها است.



تضعیف‌کننده‌ها

تضعیف‌کننده‌های پد (Pad) صفحات مقاومتی هستند و چون مقدار تضعیف مشخصی در سیستم ایجاد می‌کنند، در اندازه‌گیری‌ها برای مقایسه مورداستفاده قرار می‌گیرند. مقدار تضعیف آن‌ها ممکن است ثابت یا قابل‌تغییر باشد. نوع ثابت زمانی به کار می‌رود که فقط به مقدار معینی تضعیف در مدار نیاز باشد. معمولاً مقدار تضعیف در اکثر تضعیف‌کننده‌ها قابل‌تغییر و تنظیم است. در مدارهای کابل هم‌محور، اغلب مجموعه‌ای از تضعیف‌کننده‌های ثابت تشکیل یک تضعیف‌کننده متغیر به نام تضعیف‌کننده پله‌ای می‌دهند.

تضعیف‌کننده‌های متغیر موجبری از نظر ساختمان دارای انواع متفاوتی هستند که قسمت اصلی همه‌ی آن‌ها را تیغه‌های جاذب تشکیل می‌دهند. ضخامت این تیغه‌ها در حدود دو میلی‌متر، طول آن‌ها در داخل موجبر کمی بیشتر از یک طول‌موج و ارتفاع آن‌ها به اندازه بعد b دهانه موجبر است که برای جلوگیری از بازتاب، به‌صورت شیب، بریده‌شده است. در ساختمان آن‌ها از انواع کربن و گرافیت استفاده‌شده که انرژی را جذب و تبدیل به حرارت می‌نماید. این تیغه‌ها زمانی به‌صورت جاذب عمل می‌کنند که صفحه آن‌ها موازی با شدت میدان الکتریکی موج قرار گیرد. مقدار جذب انرژی توسط آن‌ها، متناسب با دامنه شدت میدان الکتریکی موج در محل قرار گرفتن تیغه است به‌طوری‌که اگر تیغه به دیواره موجبر چسبیده باشد، تضعیف ناچیز و اگر در a/2 وسط دهانه موجبر قرار گیرد، مقدار تضعیفی که ایجاد می‌کند، حداکثر خواهد بود. لذا تیغه در داخل موجبر و در عرض آن باید قابل جابجایی باشد. مقدار این جابجایی بین x=0 تا x=a/2 است.

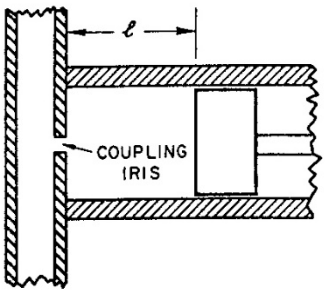
در تضعیف‌کننده‌های دقیق، حرکت تیغه در داخل موجبر توسط عقربه و صفحات مدرج کنترل می‌شود. مقداری که عقربه نشان می دهد، به کمک منحنی تبدیل، بر حسب دسی بل می‌شود یا این‌که مقدار تضعیف، متناسب با موقعیت تیغه، مستقیما به‌صورت دیجیتال و بر حسب (dB) مشخص می‌شود.

فرکانس سنج

برای اندازه‌گیری فرکانس مایکروویو در آزمایشگاه معمولاً از محفظه‌ای تشدیدی[۲] استفاده می‌شود. ضریب کیفیت محفظه‌های تشدید استوانه‌ای نسبت به محفظه‌های مکعبی خیلی بیشتر است و لذا به همان نسبت، پهنای باند محفظه استوانه‌ای کمتر شده و در نتیجه دقت اندازه‌گیری بیشتر می‌شود. به همین دلیل در فرکانس سنج‌ها از محفظه‌های تشدید استوانه‌ای استفاده می‌شود. تزویج انرژی از موجبر به محفظه، با یک شیار که در فصل مشترک انتهای بسته محفظه با موجبر تعبیه شده است، انجام می‌گیرد. اگر در محفظه از مُدی استفاده شود که جریان سطحی داخلی- که در امتداد محور محفظه است - صفر باشد، در این صورت، انرژی تلف شده در محفظه، کم شده و ضریب کیفیت محفظه زیاد می‌شود. در نتیجه دقت اندازه‌گیری فرکانس بالا می‌رود. درصورتی‌که محفظه در مُد اصلی خود نوسان کند، فرکانس تشدید آن از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$f_{111}=\frac{c}{2\pi}\left[\left(\frac{p'_{11}}{a}\right)^2+\left(\frac{\pi}{d}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

در رابطه فوق p'_{11}=۱/۸۴ ، c سرعت نور در خلأ، a شعاع داخلی استوانه و d طول محفظه استوانه‌ای است. داخل استوانه یک قطعه اتصال کوتاه کننده وجود دارد که به یک میکرومتر متصل است. با چرخاندن گردونه میکرومتر، قطعه اتصال کوتاه کننده در طول استوانه حرکت کرده و طول محفظه را تغییر می‌دهد تا محفظه بتواند برای فرکانس‌های مختلف به تشدید دربیاید. مقدار فرکانس از روی درجه‌بندی میکرومتر و به کمک یک منحنی و یا مستقیماً به‌صورت دیجیتال مشخص می‌شود.

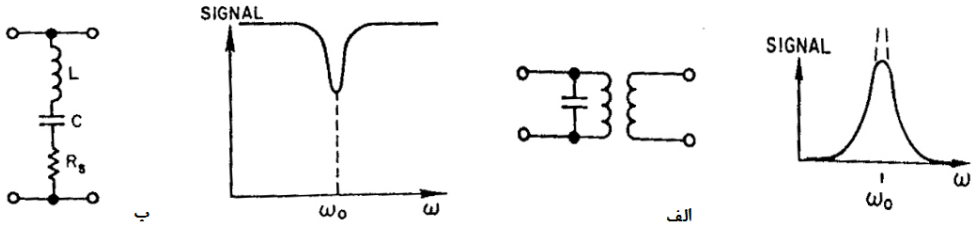


شکل (۱-۱۳) فرکانس سنج محفظه‌ای تشدیدی برای مُد TE_{111}

دو نوع تزویج انرژی بین محفظه و موجبر معمول است: نوع اول انتقالی (transmission) است. در این حالت، یک موجبر کمکی (یا کابل هم‌محور) به موجبر اصلی متصل است و انتهای دیگر آن به دستگاه اندازه‌گیری وصل می‌شود.

نوع دوم جذبی است و همان‌طور که گفته شد تزویج انرژی از موجبر اصلی با یک شیار مشترک صورت می‌گیرد. مدار معادل هر دو نوع تزویج، در شکل (۱-۱۴) مشاهده می‌شود. همان‌طور که در شکل پیدا است، در حالت تشدید در نوع انتقالی یک پیک و در نوع جذبی یک دیپ دیده خواهد شد.

[۲] Resonator



شکل (۱-۱۴) مدار معادل تزویج انرژی الف- انتقالی ب- جذبی

خط شکافدار (slotted line)

خط شکافدار، موجبری تشکیل‌شده از یک قطعه موجبر است که دقیقاً در وسط دیواره بالایی آن یک شیار طولی که طول آن سه برابر طول‌موج داخل موجبر یا کمی بیش از آن است، تعبیه شده است. از آن طریق یک پروب (میله کوچک) نازک با طول متغیر (۰/۵ الی ۵ میلی‌متر) وارد موجبر می‌شود به‌طوری‌که بتواند در تمام طول شیار حرکت کند. یک خط کش مدرج میلی‌متری دقیق نیز در جلوی آن نصب‌شده است که در هر حالت، محل دقیق پروب را در طول خط مشخص می‌کند. در هر نقطه از داخل موجبر متناسب با دامنه موج داخل آن، جریانی در پروب به وجود می‌آید. خروجی پروب اغلب همراه با یک تطبیق کننده به یک دیود مایکروویو وصل می‌شود و خروجی دیود نیز از طریق یک کابل هم‌محور به دستگاه اندازه‌گیری (نشان‌دهنده VSWR) منتقل می‌شود.

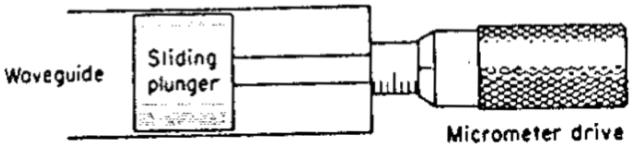
اغلب بین خط انتقال و مصرف‌کننده‌ی نهایی، تطبیق کامل وجود ندارد لذا همواره در طول خط، یک موج ساکن وجود دارد. با حرکت دادن پروب در طول خط و به کمک خط کش مدرج می‌توان فواصل نقاط مینیمم و ماکزیمم را از هم تشخیص داد. در نتیجه می‌توان طول‌موج داخل موجبر را به دست آورد.

در استفاده از خط شکافدار باید دقت شود که طول پروب داخل موجبر از یک حدی بیشتر نباشد زیرا ممکن است در نقاط ماکزیمم، ایجاد اخلال نموده و اندازه‌گیری را با اشکال مواجه سازد.

اتصالات انتهایی: دو نوع اتصال انتهایی موجبری در مدار مایکروویو مورداستفاده قرار می‌گیرند. بار مصنوعی یا بار تطبیق که تشکیل‌شده از یک تیغه جاذب (یا یک قطعه جاذب به اندازه عرض موجبر) و به‌صورت شیب‌دار که در وسط (a/2) یک قطعه موجبر اتصال کوتاه شده ، به‌طوری‌که صفحه آن موازی با بردار میدان الکتریکی E باشد، قرار گرفته است. تمامی قدرت موج تابش را که به آن برسد، جذب می‌نماید و مانند این است که خط به امپدانس مشخصه، ختم شده باشد(هیچ موج بازتابش در خط وجود نخواهد داشت).

اتصال کوتاه یا اتصال کوتاه متغیر که یک قطعه خط اتصال کوتاه شده با طول قابل‌تغییر است و تمام قدرت تابشی را که به آن برسد، بازتاب می‌کند. تغییر فاز موج منعکس‌شده، به علت تغییر محل اتصال کوتاه، باعث می‌شود که مقدار راکتانس این اتصال، تغییر نماید و این قطعه به‌صورت یک بار راکتیو قابل تنظیم، مورداستفاده قرار گیرد.

شکل (۱-۱۵) بار موجبری تطبیق شده الف- نوع گوه‌ای پر، ب- نوع تیغه‌ای



شکل (۱-۱۶) اتصال کوتاه موج‌بری متغیر

دیود آشکارساز

در آشکارسازی سیگنال‌های مایکروویو و همچنین در میکسرها، از دیودهایی با مقاومت متغیر (غیرخطی) استفاده می‌شود که دیود مایکروویو یا کریستال نامیده می‌شوند. از خصوصیات این آشکارسازها این است که مقدار ظرفیت خازنی اتصالی (C_J) و همچنین مقدار مقاومت سری (R_S) در آن‌ها کمتر است. از نظر ساختمان، دیود دارای یک اتصال فلزی است که روی یک نیمه‌رسانا پرس شده است. نیمه‌رسانا معمولاً سیلیکون یا گالیم آرسناید است و رسانا، فلزی از جنس تنگستن با قطر حدود یک‌چهلم میلی‌متر است. لذا اتصال دیود بسیار کوچک می‌شود.

موج RF که قبلاً مدولاسیون دامنه روی آن انجام‌گرفته، به دیود وارد می‌شود. در خروجی جریانی که تغییرات آن کاملاً متناظر با پوش مدولاسیون باشد، ظاهر می‌شود. لذا دیود موج مدوله‌شده مایکروویو را به سیگنال اطلاعات در فرکانس پایین تبدیل می‌نماید ولی اگر موج RF که قبلاً مدوله نشده باشد، وارد دیود شود، در خروجی دیود جریان dc که مقدار آن متناسب با مجذور دامنه ورودی باشد، ظاهر می‌شود که به‌وسیله میلی‌آمپر متر قابل‌اندازه‌گیری است. همچنین می‌توان دامنه آن را روی اسیلوسکوپ مشاهده نمود که به قانون مجذور آشکارسازی معروف است. مشخصه (IV) این دیود از رابطه زیر تبعیت می‌کند:

$$i = I(v) = I_S(e^{qv/nkt} - 1)$$

در رابطه بالا، q بار الکتریکی الکترون، v ولتاژی که به دو سر دیود اعمال می‌شود، k عدد بولتزمن، t درجه حرارت مطلق و n عددی مساوی یک یا کمی بیشتر از یک است. رابطه بالا را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$i = I(v) = I_S(e^{av} - 1)$$

مطابق رابطه بالا، $a = 1/nV_t$ ، V_t ولتاژ آستانه و مقدار آن تقریباً برابر ۲۵ میلی ولت، I_s جریان اشباع معکوس دیود بوده و مقدار آن در حدود 10 میکرو آمپر است. حال رابطه بالا را طبق سری تیلور بسط می‌دهیم و v را یک موج RF به‌صورت $v = V\cos\omega t$ منظور می‌کنیم. چون در این سری، ضرایب جملات پیش‌رونده، به سرعت کم می‌شوند، ازجمله های درجه دوم به بالا صرف‌نظر می‌شود، لذا جریان خروجی دیود به‌صورت رابطه زیر درمی‌آید که در آن فرکانس‌های بالا توسط خازن اتصالی دیود، به زمین بای پس شده است.

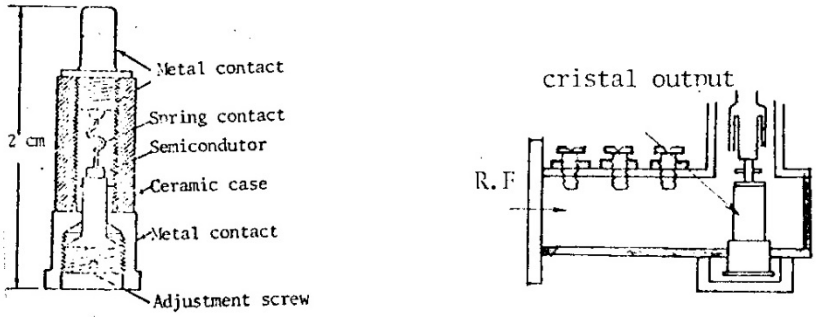
$$i = I_S(a/2)^2 V^2$$

در رابطه فوق V دامنه موج ورودی است که به دو سر دیود اعمال می‌شود.

در مورد میکسر v را مجموع دو موج به‌صورت $v = (V_1\cos\omega_1 t + V_2\cos\omega_2 t)$ منظور می‌کنیم. وقتی این ولتاژ به دیود اعمال شود، جریان خروجی دیود طبق رابطه فوق با صرف‌نظر کردن از توان‌های بالاتر از درجه دوم و فرکانس‌های مایکروویو، به‌صورت رابطه زیر درمی‌آید:

$$i = I_S(a/2)^2\left[\left(V_1^2 + V_2^2\right) + 2V_1V_2\cos(\omega_1 - \omega_2)t\right]$$

در تجزیه‌وتحلیل رابطه بالا دیود یک وریستور کامل فرض شده است که به‌صورت یک مقاومت خالص غیرخطی عمل می‌نماید. اما در عمل، برای این‌که دیود در مدار مایکروویو مورداستفاده قرار گیرد، باید در داخل کپسول قرارداده شود. در نتیجه وجود کپسول سبب می‌شود که یک سلف به‌صورت سری و یک خازن پارازیت یک به آن اضافه شود. دیود کپسول شده را در فاصله حدود یک‌چهارم طول‌موج از اتصال کوتاه، به‌طوری‌که موازی با بردار میدان الکتریکی باشد، داخل موجبر قرار می‌دهند. قطعه حاصل، کریستال مانت یا نگهدارنده دیود نامیده می‌شود. برای تطبیق دیود به موجبر، معمولاً از سه عدد پروب به‌صورت پیچ با طول قابل تنظیم که طبق شکل به فاصله حدود 3/8 طول‌موج از هم قرارگرفته‌اند، استفاده می‌شود.



شکل (۱-۱۷)شکل کلی و اجزای دیود آشکارساز

فصل دوم

آشنایی با لامپ کلایستررون بازتابی

۱- اندازه‌گیری عبور و بازتاب موج مایکروویو در فضا و اجسام مختلف، اندازه‌گیری فرکانس و طول‌موج داخل موج‌بر

۲-اندازه‌گیری ضریب موج ساکن

۳- اندازه‌گیری امپدانس

آزمایش اول

موضوع:**آشنایی با لامپ کلایسترون و مُدهای مختلف آن**

اهداف: آشنایی اجمالی با ادوات مایکروویوی موجود در آزمایشگاه، معرفی ست-آپ آزمایشگاه، آشنایی با لامپ کلایسترون و نحوه خروجی گرفتن و کنترل آن.

توجه: در تمام آزمایش‌ها در حالتی که قطعه‌ای را از انتهای موجبر باز و یا به آن اضافه می‌نمایید، هیچ‌گاه به داخل موجبری که انتهای آن باز است یا به داخل آنتن که تشعشع می‌کند، نگاه نکنید زیرا روی چشم اثر سوء می‌گذارد و در صورت تکرار و ادامه، در درازمدت باعث به وجود آمدن اختلال در بینایی خواهد شد.

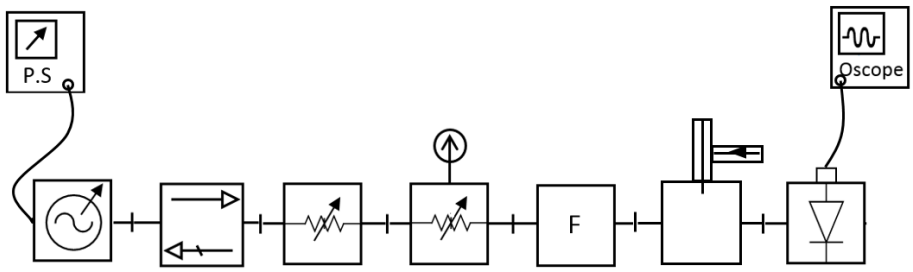
تئوری: نحوه عملکرد لامپ کلایسترون به‌طور مفصل در فصل اول توضیح داده‌شده است.

شرح آزمایش:

مشاهده خروجی از لامپ کلایسترون

ابتدا برای مشاهده دامنه نوسانات، مداری مطابق شکل(۲-۱)، شامل یک لامپ رفلکس کلایسترون به همراه منبع تغذیه آن به‌عنوان نوسان‌ساز مایکروویو، تضعیف‌کننده‌ها، فرکانس سنج، خط شکافدار، دیود آشکارساز و یک اسیلوسکوپ که نشان‌دهنده خروجی است، در نظر بگیرید.

توجه: بعد از نوسان‌ساز باید بلافاصله یک ایزولاتور برای جداسازی منبع نوسان از موج برگشتی، در مدار قرارداده شود.



شکل(۲-۱)ست-آپ مربوط به خروجی گرفتن از کلایسترون

کلید سه‌حالته منبع تغذیه کلایسترون را برای گرم شدن کاتد لامپ جهت الکترون زایی حداقل به مدت یک دقیقه روی Heater قرار دهید. در این حالت نوسانی وجود نخواهد داشت. برای شروع نوسان کلید، سه‌حالته منبع تغذیه را روی (ON) قرار دهید. کلید قسمت بالای مربوط به ولتاژ و جریان را در حالت جریان قرارداده و در صورت لزوم، جریان اشعه الکترون را بین ۲۰ تا ۲۲ میلی‌آمپر تنظیم نمایید. حال اگر ولتاژ رفلکتور مقداری مناسب انتخاب شود، کلایسترون شروع به نوسان می‌کند.

نوسانات لامپ از داخل محفظه نوسان، به یک پروب اعمال می‌شود. این پروب در فاصله $\lambda_g / 4$ از انتهای اتصال کوتاه شده یک قطعه موجبر، وارد آن شده و در فاصله a/2 (a طول موجبر) به‌عنوان پروب تحریک موجبر، به‌صورت عمودی قرار می‌گیرد و ازآنجا انرژی توسط موجبر هدایت می‌شود.

با اسیلوسکوپ‌های معمولی نمی‌توان شکل موج چنین فرکانس‌هایی را مشاهده نمود ولی می‌توان با استفاده از دیود آشکارساز، دامنه نسبی آن‌ها را با هر اسیلوسکوپ موردبررسی قرارداد.

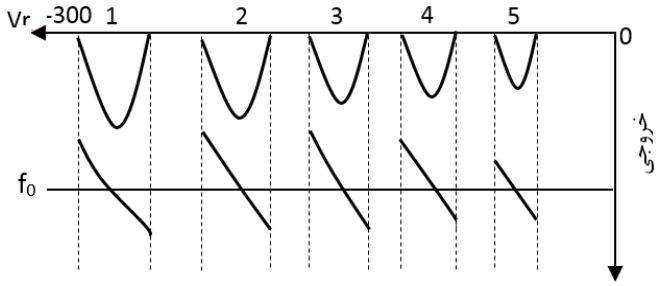
چون در حال حاضر هدف، بررسی موج مدوله نشده است، لذا کلید مدولاسیون منبع تغذیه را به حالت EXT و اسیلوسکوپ را در حالت DC قرار دهید.

ولتاژ رفلکتور را تغییر دهید. دامنه خروجی در اسیلوسکوپ به‌صورت ولتاژ DC منفی مشاهده می‌شود. با تغییر ولتاژ رفلکتور، دامنه خروجی کم و زیاد و گاهی هم صفر می‌شود. این نکته مشخص می‌کند که دامنه نوسان کلایسترون به مقدار ولتاژ رفلکتور بستگی دارد.

توجه- برای آشکارسازی مایکروویو اگر خروجی آشکارساز را با اسیلواسکوپ موردبررسی قرار دهیم، موج RF را می‌توان با هر فرکانس صوتی، مدوله نمود و یا بدون مدوله به‌صورت dc آن را موردبررسی قرارداد. ولی اگر خروجی آشکارساز به VSWR metter وصل شود، به علت این‌که تقویت‌کننده VSWR تقویت‌کننده‌ای با باند باریک و تنظیم‌شده برای یک کیلوسیکل است، باید موج RF با یک موج مربعی با فرکانس یک کیلوسیکل که دارای قابلیت تنظیم فرکانس و دامنه کافی است، مدوله‌شده باشد، تا تقویت‌کننده بتواند خروجی کافی داشته باشد.

رسم منحنی تغییرات دامنه و فرکانس نوسانات کلایسترون بر حسب تغییرات V_r

اگر ولتاژ رفلکتور را از ۳۰۰- ولت تا صفر تغییر دهیم دامنه نوسانات کلایسترون چندین بار از صفر به یک مقدار حداکثر رسیده مجدداً صفر می‌شود. منحنی این تغییرات دامنه و نیز همراه با آن تغییرات فرکانس را مشخص کرده و طبق شکل (۲-۲) رسم نمایید، برای رسم کافی است که از هر منحنی فقط مشخصات سه نقطه(ماکزیمم و دو نقطه طرفین ماکزیمم) را به دست آورید.



شکل (۲-۲) منحنی تغییرات دامنه و فرکانس لامپ کلایسترون بازتابی

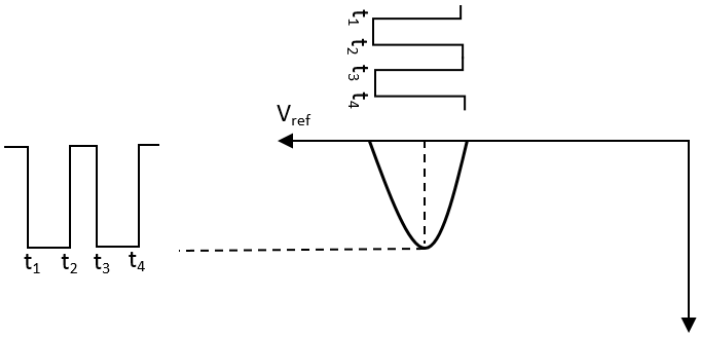
برای رسم از بزرگ‌ترین منحنی شروع کرده و ابتدا برای هر یک از منحنی‌ها دامنه نسبی سه نقطه را به دست آورده در جدول (۲-۱) ثبت نمایید.

جدول (۲-۱) مشخصات مُدهای مختلف کلایسترون

شماره مدها	ولتاژ رفلکتور (V)			دامنه نسبی نوسان (mv)			عدد میکرومتر(تضعیف-کننده)		
۱									
۲									
۳									
۴									

مدولاسیون در کلایسترون بازتابی

تئوری- در آزمایش قبلی مشخص شد که کلایسترون بازتابی دارای چندین منحنی خروجی است. اگر یکی از این منحنی‌ها را مطابق شکل(۲-۳) در نظر بگیریم دیده می‌شود که برای یک مقدار از ولتاژ رفلکتور مثلاً ۱۷۵- ولت دامنه خروجی حداکثر مقدار خود را داراست. چنانچه قدر مطلق ولتاژ رفلکتور را کم کنیم دامنه نوسانات نیز کم می‌شود تا اینکه به ازای ۱۵۵- ولت از ولتاژ رفلکتور دامنه خروجی به صفر می‌رسد. حال اگر به رفلکتور این لامپ مجموعه‌ای از یک ولتاژ ۱۵۵- ولت و پالس‌های مربعی با دامنه ۲۰- ولت وصل نماییم ولتاژ رفلکتور در مدت‌زمانی که دامنه پالس صفر است همان ۱۵۵- ولت بوده دامنه نوسانات صفر خواهد بود و در مدت‌زمانی که پالس دارای دامنه ۲۰- ولت است مقدار ولتاژ رفلکتور برابر ۱۷۵- ولت می‌شود و درنتیجه لامپ با دامنه حداکثر نوسان خواهد کرد.



شکل(۲-۳) نمایش دامنه‌ی یک مُد خروجی کلایسترون در حضور پالس مربعی

بنابراین متناسب با پریود پالس‌ها دامنه نوسانات در فواصل زمانی(t_1 t_2) و (t_3 t_4) حداکثر بوده و در فاصله زمانی (t_2 t_3) صفر خواهد بود و موج به شکل پالس مدوله‌شده است.

-آزمایش:

الف- ولتاژ رفلکتور را برای نقاط ماکزیمم بزرگ‌ترین منحنی خروجی کلایسترون تنظیم کنید و با استفاده از یک فانکشن ژنراتور خروجی کلایسترون را توسط موج مربعی با فرکانس یک کیلوهرتز و دامنه مناسب مدوله نمایید. در این حالت کلید مدولاسیون منبع تغذیه کلایسترون در وضعیت Ext باشد. خروجی دیود آشکارساز را برای رسم به کانال یک اسیلوسکوپ وصل کنید و با شکل موج سیگنال مدوله‌کننده که به کانال ۲ اسیلوسکوپ وصل کرده‌اید مقایسه نمایید. همین عمل را در حالتی که ولتاژ رفلکتور را برای نقاط صفر منحنی خروجی تنظیم کرده‌اید تکرار نمایید.

ب- سیگنال مدوله‌کننده را یک موج سینوسی با فرکانس یک کیلوهرتز و دامنه مناسب انتخاب نمایید و ولتاژ رفلکتور طوری تنظیم نمایید که خروجی آشکارساز تقریباً سینوسی باشد.

سؤال:

۱- در آزمایش‌ها فوق در کدام حالات و تحت چه شرایطی پس از آشکارسازی دامنه، شکل موج به‌دست‌آمده بیشتر شبیه به سیگنال مدوله‌کننده است؟

۲- با توجه به آزمایش انجام‌شده و توضیحات ذکر شده، چه مواقعی سیگنال خروجی کلایسترون را مدوله می‌کنیم؟

آزمایش دوم

موضوع: اندازه‌گیری عبور و بازتاب امواج مایکروویو در فضا و اجسام مختلف، اندازه‌گیری فرکانس و طول‌موج λ_g داخل موجبر

اهداف: آشنایی با آنتن بوقی و اندازه‌گیری نسبت توان ارسالی و دریافتی، آشنایی با فرکانس متر مایکروویوی و نحوه اندازه‌گیری فرکانس کار در آزمایشگاه، بیان مفهوم طول‌موج در داخل موجبر و نحوه اندازه‌گیری آن و مقایسه با مقدار تئوری.

تئوری:

آنتن‌هایی که در باند فرکانسی مایکروویو مورداستفاده قرار می‌گیرند، عمدتاً توجیهی بوده و دارای بهره توجیهی نسبتاً زیادی هستند. علت این امر این است که اولاً فرستنده‌های صداوسیما معمولاً برای خبرپراکنی، مستقیماً از ردیف فرکانس‌های مایکروویو استفاده نمی‌کنند، بلکه با به‌کارگیری فرکانس‌های پایین‌تر، از آنتن‌های غیر توجیهی با پرتو تشعشعی تقریباهمه جهته استفاده می‌نمایند. ثانیاً در فرکانس‌های مایکروویو، کوچک شدن طول‌موج امکان داشتن آنتن با بهره توجیهی زیاد را فراهم می‌سازد.

یکی از انواع مختلف آنتن‌های مایکروویو، آنتن بوقی[۳] است که هم مستقیماً در ارتباطات مایکروویو مورداستفاده قرار می‌گیرد و هم از نوع کوچک آن در تغذیه آنتن‌های بازتابی استفاده می‌شود. از آنتن بوقی معمولاً به‌عنوان آنتن استاندارد هم استفاده می‌شود.

اگر انتهای یک موجبر حامل انرژی باز گذاشته شود، امواج الکترومغناطیسی داخل موجبر به فضای خارج تشعشع خواهد کرد ولی به علت عدم تطبیق امپدانس داخل موجبر با فضای خارج، تشعشع کامل نخواهد بود. مقداری از این انرژی به داخل موجبر بازگشته و تولید موج ساکن می‌نماید. قسمتی هم از این انرژی در دهانه موجبر، در اثر تغییر ناگهانی امپدانس، تغییر مسیر می‌دهد که باعث پراکندگی و هدر رفتن انرژی می‌شود.

برای رفع این اشکال، دهانه موجبر را به‌تدریج به فضای خارج باز می‌کنند تا امپدانس داخل موجبر نیز به‌تدریج به امپدانس فضای خارج نزدیک شده و با آن مساوی شود. قطعه حاصل به‌صورت هورن یا بوقی خواهد بود که در آزمایشگاه هم از این آنتن استفاده می‌شود.

شرح آزمایش:

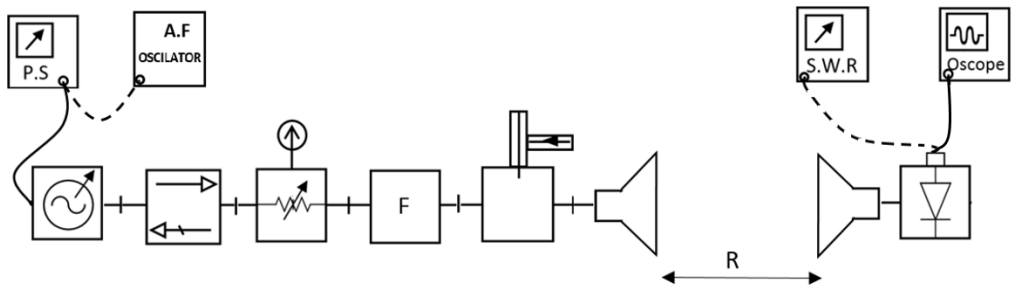
بررسی عبور و بازتاب امواج مایکروویو در فضا و اجسام مختلف

ابتدا مداری مانند شکل(۲-۱) در آزمایش اول ببندید و پس از خروجی گرفتن از لامپ کلایسترون و اطمینان از اینکه ولتاژ رفلکتور به‌گونه‌ای تنظیم‌شده که خروجی مدار حداکثر است، مداری مطابق شکل (۲-۴) ترتیب دهید. با قرارداد یک آنتن در انتهای خط شکافدار، سمت چپ مدار به‌صورت یک فرستنده عمل می‌کند. در فاصله R از این آنتن، یک آنتن دیگر هم‌راستای آنتن فرستنده که به دیود آشکارساز متصل است، قرار دهید. مقدار R فاصله دو آنتن فرستنده و گیرنده را طوری انتخاب کنید که حوزه‌های نزدیک و القایی از بین رفته و فقط حوزه‌های تشعشعی، توسط آنتن گیرنده دریافت شود. با توجه به فرکانس و ابعاد دهانه آنتن‌ها، حداقل مقدار R حدود ۶۵ سانتی‌متر خواهد بود. دیود آشکارساز

---

[۳] Horn

را به اسیلوسکوپ وصل نمایید. برای مشاهده شکل موج در اسیلوسکوپ، کلید منبع تغذیه را به حالت INT قرار دهید یا آن را از خارج با یک موج مربعی با فرکانس یک کیلوهرتز مدوله نمایید.



شکل (۲-۴) ست-آپ مربوط به ارسال و دریافت امواج مایکروویو توسط آنتن بوقی

حال، آنتن گیرنده را روی یک‌پایه چرخان قرار دهید. آن را به‌طور منظم ۵ درجه به ۵ درجه بچرخانید و در هر بار با تغییر تضعیف‌کننده مدرج، عقربه دستگاه نشان‌دهنده را روی مبنای قبلی بیاورید. مقدار تضعیف به‌دست‌آمده را در جدول شماره (۲-۲) یادداشت نمایید. دقت کنید که آنتن گیرنده و فرستنده کاملاً در یک امتداد قرار گیرند.

جدول (۲-۲) توان دریافتی توسط آنتن گیرنده در شکل(۲-۴) در زوایای مختلف

زاویه آنتن گیرنده	درجه تضعیف کننده مدرج	مقدار تضعیف dB	تضعیف نسبت به زاویه صفر

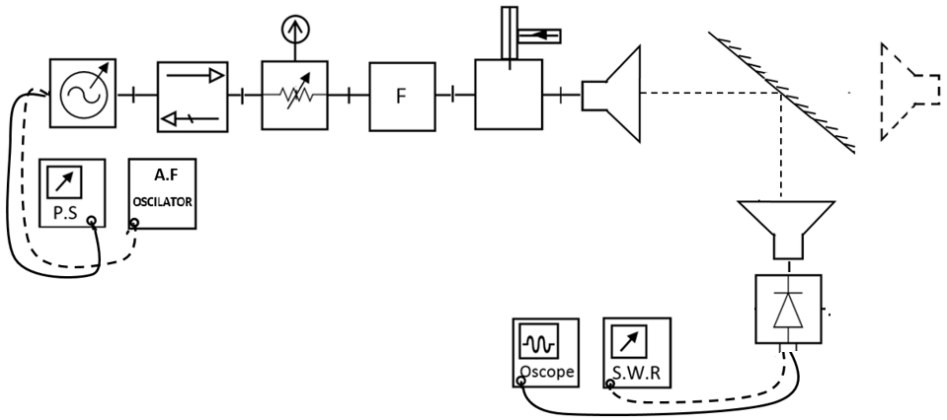
مقادیر ستون ۳ را از مقدار تضعیف در زاویه صفر (30dB) کم نموده و در ستون ۴ ثبت کنید. با استفاده از ستون‌های ۱ و۴ پرتو نسبی آنتن را (در دو صفحه افقی و قائم) رسم نمایید.

الف-صفحه فلزی را بین دو آنتن قرار دهید. در این حالت، سیگنالی دریافت می‌شود یا نه؟ چرا؟

ب- رفلکتور شبکه‌ای را به‌جای رفلکتور صفحه‌ای طوری قرار دهید که خطوط رسانای آن به‌صورت عمودی قرار گیرند. سپس صفحه مشبک را طوری قرار دهید که خطوط رسانای آن به‌طور افقی قرار گیرند. چگونگی تغییرات سیگنال دریافتی را در دو حالت، موردبحث قرار دهید.

ج- به‌جای رفلکتور شبکه‌ای، ابتدا یک عایق خوب نظیر پلاستوفوم (یونولیت) و بعد یک عایق معمولی مانند شیشه قرار دهید و درباره نتیجه آن بحث نمایید.

حال آنتن‌ها را عمود بر هم قرار دهید. واضح است که در این حالت سیگنالی دریافت نخواهد شد.
الف- رفلکتور صفحه‌ای را مطابق شکل (۲-۵) بین دو آنتن طوری قرار دهید که امواج فرستنده را به گیرنده هدایت کند. سپس آن را طوری بچرخانید تا حداکثر دریافت را داشته باشید. در این حالت زاویه بین صفحه رفلکتور با امتداد محور هر یک از آنتن‌ها چقدر خواهد بود؟



شکل (۲-۵) ست-آپِ مربوط به ارسال و دریافت امواج مایکروویو توسط آنتن بوقی در حضور رفلکتور

ب-رفلکتور صفحه‌ای را بردارید. رفلکتور شبکه‌ای را در دو حالت: ۱) خطوط شبکه افقی ۲) خطوط شبکه به حالت عمودی قرار دهید و سیگنال دریافتی را بررسی نمایید. در کدام حالت صفحه مشبک به‌صورت رفلکتور عمل می‌کند؟
ج- جسم عایق را به‌جای رفلکتور شبکه‌ای قرار دهید و میزان بازتاب را بررسی نمایید.
د- در حالتی که آنتن‌های فرستنده و گیرنده روبروی هم قرار گرفته و دریافت حداکثر است، یکی از آنتن‌ها را با دست (یا با استفاده از تویبست) ۹۰ درجه حول محور خود بچرخانید و علت عدم دریافت موج را در این حالت توسط گیرنده توضیح دهید.
ه- آنتن‌ها را مقابل هم و به فاصله ۵۰ سانتی‌متر از هم قرار دهید. خروجی دیود آشکارساز را از اسیلوسکوپ جدا نموده و به تقویت‌کننده VSWR وصل نمایید. آن را برای یک مبنای مشخص تنظیم کنید و در این حالت مقدار تضعیف تضعیف‌کننده مدرج را یادداشت نمایید. حال فاصله آنتن‌ها را دو برابر کنید و پس از تنظیم مبنای قبلی، دوباره مقدار تضعیف تضعیف‌کننده مدرج را به دست آورده و از مقدار تضعیف قبلی کسر نمایید. بدین ترتیب معلوم می‌شود که با دو برابر شدن فاصله، قدرت دریافتی طبق رابطه $p_r \propto \frac{1}{R^2}$ چند dB ضعیف شده است.

اندازه‌گیری فرکانس:

-شرح آزمایش:

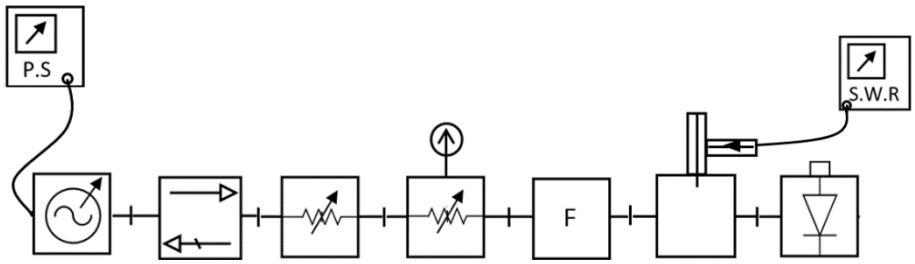
باند فرکانسی که در آزمایشگاه مورداستفاده قرار می‌گیرد معمولاً در محدوده ۹/۱ الی ۹/۶ گیگاهرتز است و به‌ندرت از این محدوده خارج می‌شود. برای اندازه‌گیری فرکانس (بدون مدولاسیون) ابتدا مداری مطابق شکل (۲-۱) ترتیب دهید.
الف - ولتاژ رفلکتور کلایسترون را طوری تنظیم نمایید که دامنه نوسانات حداکثر باشد.

ب- گردونه فرکانس‌متر را آهسته بچرخانید تا در حالتی قرار گیرد که فرکانس‌متر حداکثر انرژی را به‌صورت فیدبک از مدار جذب نماید (دامنه خروجی نشان داده‌شده به حداقل برسد). در این حالت مقداری را که ورنیه فرکانس‌متر نشان می‌دهد، یادداشت نمایید و با استفاده از منحنی مربوطه، فرکانس موج RF را به دست بیاورید.

اندازه‌گیری طول‌موج λ_g:

-شرح آزمایش:

ابتدا مداری مطابق شکل (۲-۶) ترتیب دهید. توجه داشته باشید که در موج ساکن، فاصله بین دو مینیمم (یا دو ماکزیمم) متوالی برابر نصف طول‌موج است.



شکل (۲-۶) ست-آپِ مربوط به اندازه‌گیری طول‌موج

الف- به کمک پروب خط شکافدار و خط‌کش درجه‌بندی‌شده کنار آن، فاصله بین دو مینیمم متوالی داخل موجبر را به دست آورید و ازآنجا مقدار طول‌موج داخل موجبر(λ_g) را مشخص نمایید.

ب- λ_g را با استفاده از رابطه $\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1-\left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2}}$ از طریق محاسبه به دست آورید و با مقدار اندازه‌گیری شده مقایسه نمایید.

در رابطه بالا λ طول‌موج فضای آزاد بوده و مساوی c/f است. λ_c طول‌موج قطع موجبر و مقدار آن برابر 2a است. مقدار a برای موجبر مورداستفاده در آزمایشگاه (باند x) برابر ۲/۲۸ سانتیمتر است. c سرعت نور و f فرکانس موج است.

سؤال

۱- دقت اندازه‌گیری طول‌موج با استفاده از دو مینیمم متوالی بیشتر است یا دو ماکزیمم متوالی؟

۲- اندازه طول‌موج به بار انتهایی بستگی دارد یا نه؟

۳- با کدام بار انتهایی، دقت اندازه‌گیری طول‌موج بیشتر است؟

آزمایش سوم

موضوع: اندازه‌گیری ضریب موج ساکن بارهای مایکروویوی مختلف

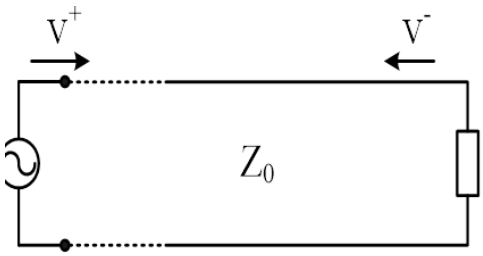
اهداف: آشنایی با مفهوم VSWR و نحوه اندازه‌گیری آن، اندازه‌گیری VSWR های زیاد.

اندازه‌گیری ضریب موج ساکن STANDING WAVE RATIO (SWR)

تئوری:

(SWR) یکی از پارامترهای مهمی است که مستقیماً قابل‌اندازه‌گیری است و با معلوم بودن آن می‌توان پارامترهای دیگر نظیر ضریب بازتاب و افت برگشتی را محاسبه نمود.

چنانچه در انتهای موجبر (خط انتقال) باری مساوی با امپدانس مشخصه موجبر قرار دهیم، تمام قدرت رفت، جذب بار می‌شود و در داخل موجبر فقط موج رفت، وجود خواهد داشت (حالت تطبیق). اما اگر امپدانس بار با امپدانس موج داخل موجبر متفاوت باشد، مقداری از موج رفت، از بار منعکس‌شده و به سمت منبع برمی‌گردد. موج رفت و برگشت باهم تداخل نموده و سبب می‌شود که در داخل موجبر(خط انتقال)، موج ساکن به وجود بیاید. لذا دامنه موج در نقاط مختلف خط، متفاوت خواهد بود. در نقاطی که امواج رفت و برگشت هم‌فاز هستند، دامنه‌ها باهم جمع شده و نقاط ماکزیمم را تشکیل می‌دهند و در نقاطی که در فاز مخالف هستند، دامنه‌ها از هم کم می‌شوند و نقاط مینیمم به وجود می‌آیند. در یک فرکانس ثابت، این نقاط، در طول خط از نظر مکانی، ثابت و از نظر دامنه، بستگی به امپدانس مشخصه موجبر و امپدانس بار دارد.



شکل(۲-۷) نمایش موج رفت(V^+) و برگشت(V^-) در یک خط انتقال

نسبت دامنه موج در نقطه ماکزیمم به دامنه آن در نقطه مینیمم، ضریب موج ساکن نامیده می‌شود (شکل (۲-۷)) که طبق روابط زیر به مقدار ضریب بازتاب بار بستگی پیدا می‌کند. معمولاً در بررسی این روابط از مؤلفه ولتاژ استفاده می‌شود. لذا می‌توان چنین نوشت:

$$VSWR = \frac{|V^+| + |V^-|}{|V^+| - |V^-|} = \frac{1+\rho}{1-\rho}$$

بنابراین با اندازه‌گیری ضریب موج ساکن، می‌توان ضریب بازتاب را محاسبه نمود:

$$\rho = \frac{|V^-|}{|V^+|} = \frac{VSWR-1}{VSWR+1}$$

برای اندازه‌گیری ضریب موج، لازم نیست که مقادیر V_{max} و V_{min} را جداگانه اندازه‌گیری و مشخص کرد، بلکه کافی است که اندازه‌گیری را طوری انجام دهیم که فقط نسبت دامنه ماکزیمم ولتاژ به دامنه مینیمم آن مشخص شود. لذا

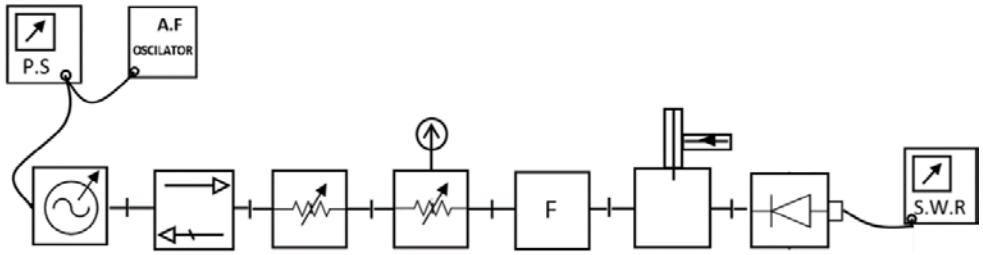
بدین منظور از دستگاه نشان‌دهنده ضریب موج ساکن همراه با آشکارساز VSWR و خط شکافدار استفاده می‌کنیم. طول پروب خط شکافدار تا آنجا که ممکن است باید کوتاه انتخاب شود تا تأثیر قابل ملاحظه‌ای در شکل و دامنه موج به وجود نیاورد. دامنه موجی که توسط پروب دریافت شده است، توسط یک کریستال (دیود آشکارساز) آشکارسازی می‌شود و خروجی آن به‌وسیله دستگاه نشان‌دهنده VSWR دریافت می‌شود.

در آزمایش‌های قبلی برای بررسی دامنه موج از اسیلوسکوپ استفاده کردیم اما در مواردی که موج خیلی ضعیف باشد، دقت و حساسیت اسیلوسکوپ برای نشان دادن دامنه موج کافی نخواهد بود. لذا خروجی آشکارشده به دستگاه نشان‌دهنده‌ی VSWR که دارای چند طبقه تقویت‌کننده است، وصل می‌شود تا سیگنال به‌وسیله آن تقویت شود. ضمناً اختلاف دامنه‌ها را می‌توان هم به‌صورت عددی و هم به‌صورت لگاریتمی توسط این دستگاه مشاهده نمود.

شرح آزمایش:

الف-مداری مطابق شکل(۲-۸)ترتیب دهید. منبع تغذیه نوسان‌ساز و دستگاه تقویت‌کننده VSWR را روشن نمایید. دقت کنید که خروجی نوسان‌ساز مایکروویو توسط یک موج یا پالس یک کیلوسیکل مربعی، مدوله‌شده باشد و ولتاژ رفلکتور یا بایاس نوسان‌ساز را طوری تنظیم نمایید که دامنه خروجی قابل‌ملاحظه‌ای داشته باشد.

ابتدا برای تنظیم دستگاه نشان‌دهنده VSWR ، خروجی کریستال را به انتهای خط شکافدار وصل کنید. با تغییر دامنه و فرکانس موج مدوله‌کننده، سعی کنید بیشترین خروجی را از دستگاه دریافت کنید. اگر انحراف عقربه دستگاه بیش‌ازحد ممکن باشد (عقربه از درجه‌بندی خارج شد)، به کمک تضعیف‌کننده ورودی دستگاه (INPUT ADJ_1) که یک تضعیف‌کننده پله‌ای است، سیگنال ورودی را تضعیف نمایید تا عقربه دستگاه داخل درجه‌بندی صفحه قرار گیرد. به کمک ولوم تغییردهنده بهره تقویت‌کننده دستگاه (INPUT ADJ_2)، هم می‌توانید عقربه را در صفحه جابجا نمایید. در صورت نیاز می‌توانید به کمک تضعیف‌کننده‌های موج‌بری دامنه موج ورودی را تضعیف نمایید.



شکل (۲-۸)ست-آپ لازم برای خروجی گرفتن از لامپ کلایسترون

پس از وصل بار موردنظر به انتهای خط، برای شروع آزمایش کابل را از کریستال انتهای مدار جدا کرده و به کریستال مربوط به پروب اندازه‌گیری ضریب موج ساکن وصل نمایید. طول پروب خط شکافدار را بین یک تا سه میلی‌متر تنظیم نمایید. لازم به ذکر است که طول پروب بستگی به مقدار موج بازتاب دارد. چنان چه عقربه دستگاه انحراف قابل‌ملاحظه‌ای نداشت، تضعیف ورودی دستگاه را کاهش دهید. درعین‌حال اگر پروب آشکارساز مجهز به تطبیق کننده باشد، با استفاده از آن نیز می‌توان پروب را به کریستال آشکارساز VSWR تطبیق کرده و حداکثر خروجی را دریافت نمود.

حال با حرکت قسمت متحرک پروب، یکی از ماکزیمم‌ها را در طول خط پیدا کنید و با استفاده از ولوم بهره تقویت‌کننده (INPUT ADJ_2) ، عقربه دستگاه تقویت‌کننده VSWR را روی 0dB بیاورید. سپس درحالی‌که همه شرایط ثابت است، فقط قسمت متحرک پروب را به سمت راست یا چپ در طول خط شکافدار حرکت دهید تا نقطه

مینیمم موج ساکن در خط پیدا شود. در این حالت اگر عقربه دستگاه از سمت چپ درجه‌بندی آن خارج نشده باشد، می‌توان مقدار عددی ضریب موج ساکن ولتاژ (VSWR) را روی درجه‌بندی ۱ تا ۴ دستگاه، مستقیماً تعیین نمود.

در تعیین مکان نقطه مینیمم، هرگاه عقربه دستگاه از ردیف درجه‌بندی ۱-۴ خارج شود، مشخص‌کننده این است که مقدار عددی (VSWR) از ۴ بیشتر است. در این حالت از مقدار تضعیف ورودی دستگاه (INPUT ADJ_1) ، به اندازه ۱۰ dB کم کرده و مقدار عددی ضریب موج ساکن ولتاژ را پس از تنظیم نقطه مینیمم، از ردیف درجه‌بندی ۳/۲ تا ۱۰ یادداشت نمایید.

چنانچه باز هم انحراف عقربه بیشتر بوده و از صفحه درجه‌بندی خارج شد، تضعیف ورودی را به مقدار ۱۰ dB دیگر کم نمایید. در این حالت مقدار VSWR را از همان ردیف ۱-۴ خوانده و عدد به‌دست‌آمده را در ۱۰ ضرب نمایید.

بدین طریق می‌توان ضریب موج ساکن ولتاژ بارهای مختلف را که مقدار عددی آن‌ها زیر ۴۰ باشد، اندازه‌گیری کرد.

اگر مقدار عددی (VSWR) بار به حدود ۴۰ برسد، به دلایلی که بعداً توضیح داده خواهد شد، دیگر با این روش قابل‌اندازه‌گیری نخواهد بود و باید از روش‌های دیگر اندازه‌گیری ضریب موج ساکن استفاده کرد.

توجه کنید هر چقدر تضعیف ورودی را به میزان ۱۰dB کم کنیم، در حقیقت مقدار مینیمم را به اندازه ۱۰ dB تقویت می‌کنیم. لذا باید موقع خواندن ضریب موج ساکن، مقدار آن را تصحیح نمود.

-بارهای مختلف جدول زیر را به انتهای مدار ببندید و مقدار VSWR هر کدام را اندازه‌گیری کرده و در جدول زیر یادداشت نمایید.

جدول شماره(۲-۳) مقادیر VSWR مربوط به بارهای مختلف

موجبر انتها باز	بار تطبیق	دیود آشکارساز	فیبر استخوانی با بار تطبیق شیب دارمکعبی	آنتن بوقی	قطعه
					VSWR

- **اندازه‌گیری VSWR های زیاد**

دیود مورداستفاده در خط شکافدار نظیر انواع مختلف آن، دارای مشخصه VI غیرخطی است. زمانی مقایسه و سنجش دستگاه نشان‌دهنده VSWR صحیح خواهد بود که مشخصه VI دیود، درجه دوم باشد. در عمل فقط قسمتی از منحنی مشخصه دیود درجه دوم است. لذا در مقایسه دامنه‌های بسیار متفاوت (نظیر اندازه‌گیری VSWR های زیاد)، دیود در نقاطی از منحنی مشخصه کار می‌کند که درجه دوم نیست. لذا دستگاه نمی‌تواند مقایسه درستی بین دامنه‌های حداکثر و حداقل انجام دهد. برای اجتناب از این خطا، روش‌هایی برای اندازه‌گیری VSWR های زیاد مورداستفاده قرار می‌گیرند که ازجمله، استفاده از تضعیف‌کننده موجبری مدرج است.

-بار مورد آزمایش (از بارهای جدول ۲-۴) را به انتهای موجبر ببندید. تنظیمات لازم را برای داشتن خروجی کافی از خط شکاف دار انجام دهید. حال قسمت متحرک خط شکاف دار را حرکت دهید تا یک مینیمم پیدا شود. در این حالت محل عقربه دستگاه نشان‌دهنده را، در جای مناسبی (در صورت امکان۳ dB) قرار دهید.

قسمت متحرک خط شکاف دار را حرکت دهید تا نقطه ماکزیمم موج ساکن پیدا شود. حال به کمک تضعیف‌کننده مدرج، عقربه دستگاه را روی مبنای قبلی بیاورید و مقدار درجه تضعیف‌کننده مدرج یادداشت نمایید. با استفاده از منحنی

مربوط به تضعیف‌کننده مدرج، مقدار تضعیف را بر حسب dB مشخص نمایید. مقدار این تضعیف نشان می‌دهد که دامنه ماکزیمم چند dB قوی‌تر از دامنه مینیمم است.

$$20\log\frac{V_{\max}}{V_{\min}} = 20\log VSWR = \alpha$$

برای تعیین مقدار عددی VSWR می‌توان نوشت

$$VSWR = ANTILOG\frac{\alpha(dB)}{20}$$

در این روش، خطای ناشی از مشخصه دیود آشکارساز، از بین می‌رود. ولی خطای دوم باقی می‌ماند. چون تقویت‌کننده-های VSWR موجود در آزمایشگاه حساسیت لازم را ندارند، این روش عاری از خطا نخواهد بود. حال قطعات جدول (۲-۴) را به انتهای مدار ببندید و VSWR آن‌ها را با این روش اندازه‌گیری کرده و مقادیر به‌دست‌آمده را در جدول یادداشت نمایید. در یک روش دیگر از نقاطی که میدان dB ۳ بیشتر از نقطه مینیمم است، استفاده می‌کنند (ضمیمه۱). بعد از پیدا کردن یک مینیمم، به کمک تضعیف‌کننده خط یا "INPUT ADJ_2"، عقربه دستگاه اندازه‌گیری را روی dB ۳ بیاورید. قسمت متحرک خط شکافدار را طوری به سمت راست حرکت دهید که میدان به اندازه dB ۳ زیاد شود (عقربه روی 0dB قرار گیرد). عدد روی خط‌کش خط شکافدار را به‌دقت خوانده و آن را با d_1 مشخص نمایید. حال قسمت متحرک خط شکافدار را به سمت چپ حرکت دهید تا بعد از مینیمم، دوباره میدان dB ۳ اضافه شود. این بار نیز عدد خط‌کش مدرج را بخوانید و آن را با d_2 مشخص کنید. با استفاده از رابطه زیر مقدار VSWR را محاسبه نمایید:

$$VSWR = \frac{\lambda_g}{\pi d}$$

رابطه بالا با فرض کوچک بودن $d = d_2 - d_1$ از رابطه زیر به‌دست‌آمده است.

$$VSWR = \sqrt{1 + \frac{1}{\sin^2(\frac{\beta d}{2})}}$$

حال قطعات جدول(۲-۴) را مجدداً به انتهای مدار ببندید و VSWR آن‌ها را با این روش اندازه‌گیری نمایید و مقادیر به‌دست‌آمده را در جدول (۲-۵) یادداشت نمایید. آن‌ها را با مقادیر ثبت‌شده در جدول(۲-۴) مقایسه کنید.

جدول شماره(۲-۴) مقادیر VSWR مربوط به بارهای مختلف

قطعه	نگهدارنده دیود	مبدل موجبر به کابل هم‌محور	پنجره دایروی
VSWR			

جدول شماره(۲-۵) مقادیر VSWR مربوط به بارهای مختلف

قطعه	نگهدارنده دیود	مبدل موجبر به کابل هم‌محور	پنجره دایروی
VSWR			

آزمایش چهارم

موضوع: برقراری تطبیق بین خط انتقال و مصرف‌کننده (بار)

اهداف: آشنایی با تطبیق‌کننده موج‌بری(استاب تیونر)[۴] و تطبیق بار به خط انتقال با استفاده از آن.

-تطبیق با استفاده از تطبیق‌کننده موج‌بری:

تئوری:

تطبیق کننده موج‌بری (استاب تیونر) یک پروب با طول متغیر است که توسط یک شیار طولی در موج‌بر، قابل جابجایی در طول خط است که بین بار و انتهای خط قرار می‌گیرد. با استفاده از آن تقریباً هر باری را می‌توان به خط انتقال موج‌بری، تطبیق کرد.

شرح آزمایش:

با توجه به روش‌های اندازه‌گیری VSWR که در آزمایش سوم گفته شد، ابتدا مقادیر VSWR بارهای مشخص شده در جدول (۲-۶) را بدست آورید و در سطر اول جدول یادداشت کنید. سپس تطبیق کننده موجبری را در مدار قبل از بار قرار داده و هر بار طول پروب را یک الی دو میلی‌متر وارد موج‌بر نموده و محل آن را نیز جابجا نمایید. دوباره مقدار VSWR را اندازه بگیرید. این عمل را آن‌قدر ادامه دهید تا مقدار VSWR بار به کمترین مقدار ممکن برسد. آن را در ردیف دوم جدول (۲-۶) یادداشت نمایید. این عمل را در مورد همه قطعات جدول (۲-۶) تکرار کنید.

مقدار VSWR های قبل از تطبیق (ردیف اول جدول) را با مقادیر VSWR های بعد از تطبیق (ردیف دوم جدول) مقایسه نمایید.

جدول شماره (۲-۶) مقادیر VSWR بارهای مختلف بدون استفاده از تطبیق کننده موجبری و با استفاده از تطبیق کننده موجبری

پنجره دایروی	نگهدارنده دیود	فیبر استخوانی	موج‌بر انتها باز	قطعه
				VSWRبدون استفاده از تطبیق کننده
				VSWR با استفاده از تطبیق کننده

سؤال:

۱- اصول علمیِ عملکرد تطبیق‌کننده موجبری را شرح دهید.

---

[۴] Stub Tuner

آزمایش پنجم

موضوع:اندازه‌گیری امپدانس نرمالیزه و ضریب بازتاب بارهای مایکروویوی مختلف

اهداف آزمایش:آشنایی با مفهوم امپدانس و نحوه اندازه‌گیری آن برای بارهای مختلف، فاز ضریب بازتاب، استفاده از دیاگرام اسمیت به‌منظور مشخص کردن امپدانس نرمالیزه

-تئوری:

امپدانس مشخصه خطوط انتقال

خطی به امپدانس مشخصه Z_0 در نظر بگیرید. در خطوط انتقال دوسیمه موازی یکنواخت، در فرکانس‌های پایین مقدار امپدانس مشخصه، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + jL\omega}{G + jC\omega}}$$

که در آن R مقاومت اهمی سری، L سلف اندوکتانس، G هدایت موازی وC ظرفیت خازنی بین دو سیم در واحد طول خط است. با زیاد شدن فرکانس مقادیر R و G قابل اغماض بوده و رابطه امپدانس مشخصه به‌صورت زیر درمی‌آید:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

که در نتیجه مستقل از فرکانس می‌شود. با جایگزینی مقادیر L و C خطوط دوسیمه موازی متعادل، مقدار امپدانس مشخصه از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{120}{\sqrt{\varepsilon_r}} \ln\frac{S}{a} = \frac{276}{\sqrt{\varepsilon_r}} \log\frac{S}{a}$$

و امپدانس مشخصه کابل هم‌محور نیز رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_r}} \ln\frac{b}{a} = \frac{138}{\sqrt{\varepsilon r}} \log\frac{b}{a}$$

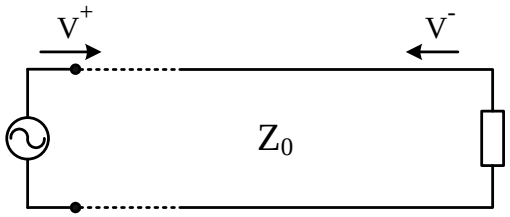
S فاصله دو سیم موازی متعادل و a وb شعاع‌های داخلی و بیرونی کابل هم‌محور هستند. همان‌طور که از رابطه ملاحظه می‌شود، امپدانس مشخصه به ابعاد خطوط انتقال بستگی دارد.

در موجبرها به‌جای امپدانس مشخصه، امپدانس موج (امپدانسی که موج در داخل موجبر با آن مواجه است) مطرح است که علاوه بر ابعاد سطح مقطع موجبرها، به فرکانس و مد انتشار نیز بستگی دارد و مقدار آن برای امواج TE به‌صورت زیر است:

$$Z_{TE} = \frac{\eta_0}{\sqrt{1-(\frac{f_c}{f})^2}} = \frac{\eta_0}{\sqrt{1-(\frac{\lambda}{\lambda_c})^2}}$$

که در مُد اصلی، مقدار آن از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Z_{TE10} = \frac{120\pi}{\sqrt{1-(\frac{\lambda_0}{2a})^2}}$$



شکل(۲-۹) مشاهده موج رفت(V^+) و موج برگشت(V^-) در طول خط انتقال

خطی به امپدانس مشخصه Z_0 را که به امپدانس بار Z_L منتهی شده باشد، در نظر بگیرید. مؤلفه ولتاژ موج رفت را با V^+ نمایش می‌دهیم و مؤلفه ولتاژ موج برگشتی از بار را با V^- مشخص می‌کنیم. در فاصله D از بار داریم:

$$v^- = v_L^- e^{-j\beta D}$$

$$v^+ = v_L^+ e^{+j\beta D}$$

Z=V/I

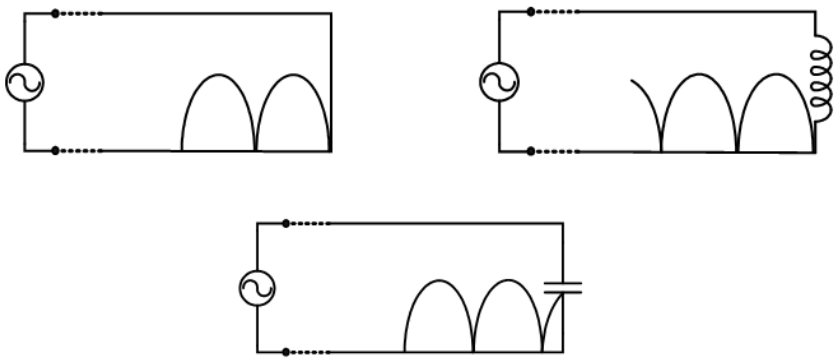
$$V = (v^+ + v^-)I = (i^+ - i^-)$$

و ازآنجا، مقدار امپدانس نرمالیزه بار به‌صورت زیر به دست می‌آید:

$$z_n = \frac{1+\rho e^{j(\theta-2\beta D)}}{1-\rho e^{j(\theta-2\beta D)}}$$

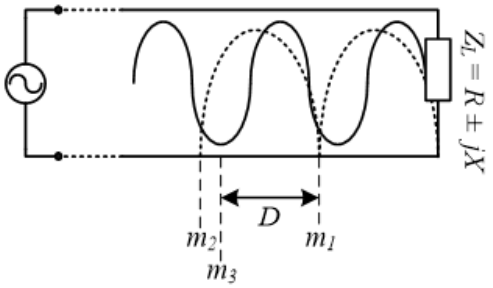
برای به دست آوردن دامنه ضریب انعکاس، می‌توان VSWR بار را اندازه‌گیری و با استفاده از آن، مقدار ρ را محاسبه کرد یا می‌توان به کمک نمودار اسمیت، مقدار آن را مشخص کرد.

فاز ضریب انعکاس(θ) را می‌توان با توجه به محل نقاط مینیمم یا ماکزیمم موج ساکن، تشخیص داد، زیرا محل این نقاط، بستگی به فاز ضریب انعکاس و طول‌موج موج‌بر دارد، به‌طوری‌که در مورد بار اتصال کوتاه، اولین مینیمم در محل اتصال کوتاه و مینیمم‌های بعدی به فاصله $\frac{\lambda_g}{2}$ از هم قرار دارند. در مورد امپدانس بی‌نهایت در محل بار، ماکزیمم ولتاژ موج ساکن و به فاصله $\frac{\lambda_g}{4}$ قبل از آن مینیمم قرار دارد. چنانچه بار راکتیو خالص باشد، مانند دو حالت فوق در خط انتقال، انعکاس کلی به وجود می‌آید. محل اولین مینیمم از بار درصورتی‌که بار خازنی باشد، کمتر از $\frac{\lambda_g}{4}$ بوده و اگر بار سلفی باشد، بیشتر از $\frac{\lambda_g}{4}$ خواهد بود (شکل ۲-۱۰).



شکل(۲-۱۰) نمایش موج ایستا در خط انتقال در حضور بارهای اتصال کوتاه، راکتیو خازنی و سلفی

در موارد فوق دامنه موج ساکن ولتاژ در نقاط مینیمم صفر می‌شود، لذا مقدار ضریب موج ساکن ولتاژ بی‌نهایت شده و دامنه ضریب انعکاس مساوی یک است. درصورتی‌که بار مؤلفه مقاومتی هم داشته باشد، مقدار ضریب موج ساکن بین یک و بی‌نهایت بوده و دامنه ضریب انعکاس مقداری بین صفر و یک خواهد داشت. با در نظر گرفتن شکل(۲-۱۱) و با اندازه‌گیری فاصله اولین مینیمم تا بار (D) و طول‌موج λ_g ، می‌توان طبق روابط ضمیمه، فاز ضریب انعکاس و با داشتن VSWR ، دامنه آن را نیز محاسبه نمود.

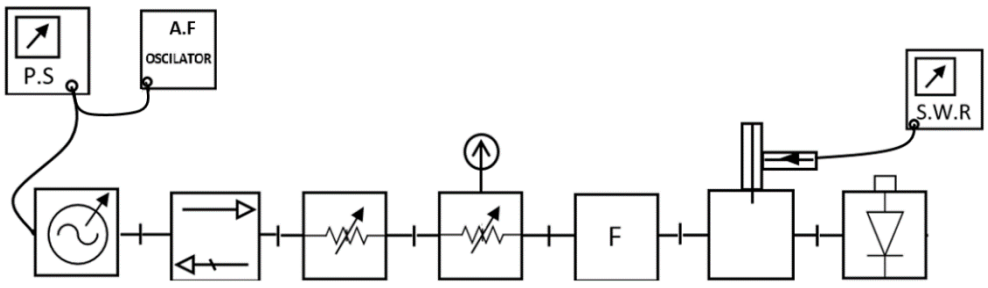


شکل(۲-۱۱) نمایش موج ایستا در حضور بار نامعلوم (Z_L)(منحنی به‌هم‌پیوسته) و اتصال کوتاه(منحنی خط‌چین)

شرح آزمایش:

پس از اندازه‌گیری فاصله بین اولین مینیمم تا بار (D)، λ_g طول‌موج موجبر و مقدار VSWR ، با استفاده از دیاگرام اسمیت می‌توان دامنه و فاز ضریب انعکاس و مقدار امپدانس نرمالیزه بار را به دست آورد.

- ابتدا مداری مطابق شکل(۲-۱۲) ترتیب دهید. اگر از رفلکس کلایسترون به‌عنوان منبع نوسان مایکروویو استفاده می‌کنید، پس از تنظیم جریان اشعه، دامنه موج مدوله‌کننده مربعی را چنان تنظیم نمایید که نوسانات به‌صورت پالسی مدوله شوند (در یک‌فاصله زمانی لامپ نوسان ننموده و در فاصله زمانی بعدی با دامنه و فرکانس ثابت نوسان کند). ضمناً دامنه نوسانات حداکثر باشد.



شکل (۲-۱۲)ست-آپ مربوط به اندازه‌گیری VSWR

کریستال انتهایی مدار را جدا و با صفحه مسی انتهای مدار را اتصال کوتاه نمایید. (برای اینکه صفحه مسی کاملاً به انتهای مدار بچسبد و اتصال کوتاه کامل ایجاد شود، یکی از عناصر موجبری را (مثل بار تطبیق) پشت آن به بندید). با حرکت قسمت متحرک خط شکاف دار، محل دو مینیمم متوالی (m_1, m_2) را به دست آورید.

صفحه اتصال کوتاه را از انتهای مدارباز نمایید و بار مورد آزمایش را به‌جای آن قرار دهید. در این حالت محل m_3 مینیمم مربوط به بار را که بین (m_1, m_2) قرار دارد، پیدا نمایید. VSWR مربوط به بار موردنظر را نیز اندازه‌گیری کنید.

با استفاده از اطلاعات به‌دست‌آمده (m_1 , m_2 , m_3 , VSWR) و به کمک دیاگرام اسمیت می‌توان امپدانس نرمالیزه و ضریب انعکاس بار مزبور را به دست آورد.

-روش استفاده از دیاگرام اسمیت:

دایره‌ای به مرکز دیاگرام اسمیت و به شعاع VSWR رسم نمایید. از سمت چپ دیاگرام، به اندازه $d = \frac{D}{\lambda_g} = \frac{m_3 - m_1}{2(m_2 - m_1)}$ به سمت بار حرکت نمایید. نقطه به‌دست‌آمده را با خط‌کش به مرکز دیاگرام اسمیت وصل نمایید. محل تقاطع این خط با دایره VSWR ، نقطه‌ای است که به کمک آن می‌توان امپدانس نرمالیزه بار را مشخص کرد. به این ترتیب که نقطه مذکور روی یکی از دوایر کامل و یکی از دوایر ناقص دیاگرام اسمیت قرار دارد. دوایر کامل مقدار حقیقی و دوایر ناقص مقدار موهومی امپدانس نرمالیزه را نشان می‌دهند.

دامنه و فاز ضریب انعکاس را نیز می‌توان با استفاده از دیاگرام اسمیت به دست آورد. امتداد خطی که از مرکز به نقطه امپدانس نرمالیزه وصل است، یکی از دوایر بیرونی دیاگرام را -که بین صفر تا ۱۸۰+ و ۱۸۰- است- قطع می‌کند که نشان‌دهنده فاز ضریب انعکاس خواهد بود.

دامنه ضریب انعکاس را می‌توان از نسبت شعاع دایره VSWR به شعاع دایره بزرگ دیاگرام، به دست آورد یا می‌توان از درجه‌بندی اضافی پایین دیاگرام اسمیت کمک گرفت. به این ترتیب که به محل تقاطع دایره VSWR با سمت راست قطر افقی دیاگرام، خطی عمود نمایید تا درجه‌بندی افقی پایین دیاگرام را قطع کند. مقدار آن را به‌طور مستقیم از روی درجه‌بندی مشخص نمایید.

آزمایش:

_امپدانس نرمالیزه، دامنه و فاز ضریب انعکاس عناصر جدول (۲-۷) را به دست آورده و مقادیر آن‌ها را در جدول یادداشت نمایید.

جدول(۲-۷) مقادیرVSWR، امپدانس مشخصه و ضریب بازتاب مربوط به بارهای مختلف

قطعه	m_1	m_2	m_3	VSWR	D/λ_g	Z_n	Γ
نگهدارنده دیود							
آنتن بوقی							
فیبر استخوانی با بار تطبیق							

سؤال

۱- مقادیر به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری امپدانس، به فرکانس بستگی دارد؟

آزمایش ششم

موضوع:اندازه‌گیری امپدانس نرمالیزه بارهای راکتیو

اهداف آزمایش:اندازه‌گیری امپدانس نرمالیزه اتصال کوتاه در طول‌های مختلف و اندازه‌گیری امپدانس نرمالیزه پنجره-های امپدانسی مختلف.

اندازه‌گیری امپدانس نرمالیزه عناصر راکتیو

الف) اندازه‌گیری امپدانس نرمالیزه استاب (موجبر اتصال کوتاه) در طول‌های متفاوت:

-تئوری:

خطی به امپدانس مشخصه Z_0 که به یک بار Z_L متصل است، در نظر بگیرید. امپدانس ورودی این خط را در هر نقطه به فاصله d از بار، با معلوم بودن Z_L می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$Z_{in}=\frac{Z_L+jZ_0\tan\beta d}{Z_0+jZ_L\tan\beta d}$$

درصورتی‌که خط در انتها اتصال کوتاه شده باشد، امپدانس ورودی آن بسته به طول خط یک راکتانس سلفی یا خازنی خواهد بود.

- شرح آزمایش:

با در نظر گرفتن مطالب گفته‌شده در آزمایش پنجم، امپدانس نرمالیزه ورودی اتصال کوتاه متغیر را برای طول‌های خواسته‌شده در جدول (۲-۸) به دست آورده و یادداشت نمایید. برای این کار باید مانند حالت قبل ابتدا نقاط m_1,m_2 m_3, همچنین طول‌موج و VSWR را به دست آورید.

توجه: در حالتی که ورنیه اتصال کوتاه متغیر روی صفر تنظیم‌شده باشد، تا لبه بیرونی موجبر به اندازه ضخامت فلان (T=5mm) فاصله دارد. لذا در انتخاب طول خط اتصال کوتاه متغیر با استفاده از درجه‌بندی ورنیه، باید T ضخامت فلانج موجبر را در نظر گرفت.

جدول شماره(۲-۸) مقادیر مربوط به محل اتصال کوتاه و امپدانس مشخصه اتصال کوتاه با طول‌های مختلف

L	m_1	m_2	m_3	d	Z_n
$\frac{\lambda_g}{8}$					
$\frac{3\lambda_g}{8}$					
$\frac{\lambda_g}{4}$					

ب) اندازه‌گیری امپدانس نرمالیزه پنجره‌های راکتانسی:

- تئوری:

برای ایجاد خواص سلفی و خازنی در موجبرها، از عناصری نظیر پروب (میله کوچک)، استاب تیونر(دوشاخه تطبیق) و پنجره‌ها استفاده می‌شود.

اگر یک پروب در یک نقطه از مدار وارد موجبر شود، راکتانسی ایجاد می‌نماید که مقدار آن بستگی به طول پروب داخل موجبر دارد که نمونه‌ای از آن، در قطعه نگهدارنده دیود آشکارساز مایکروویو مشاهده می‌شود و از سه عدد پیچ تشکیل‌شده که به‌منظور تطبیق امپدانس بین دیود و موجبر تعبیه شده است. نوع متحرک آن تشکیل‌شده از یک پروب، که علاوه بر این‌که طول آن قابل‌تغییر است، محل آن نیز با استفاده از یک خط شکاف دار موجبری قابل جابجایی است.

استاب تیونر از یک قطعه خط انتقال تشکیل‌شده و طول آن می‌تواند ثابت یا قابل‌تغییر باشد و به‌طور سری یا موازی با خط اصلی قرار می‌گیرد. از نوع متغیر آن در تطبیق دیود آشکارساز VSWR به پروب خط شکاف دار استفاده می‌شود.

پنجره‌های امپدانسی از ورق‌های فلزی ساخته‌شده‌اند، به‌طوری‌که وقتی داخل موجبر قرار می‌گیرند، یک بعد موجبر (a یا b) را در آن نقطه کاهش می‌دهند. مقدار راکتانس آن‌ها بستگی به ابعاد پنجره دارد.

- شرح آزمایش:

با توجه به روش اندازه‌گیری امپدانس که در بالا شرح داده شد، امپدانس پنجره‌های راکتانسی نشان داده‌شده در جدول (۲-۱۰) را به دست آورید و در جدول (۲-۹) یادداشت کنید. مقادیر به‌دست‌آمده را با مقادیر تئوری به‌دست‌آمده از فرمول‌های جدول (۲-۱۰) مقایسه کنید و در صورت عدم تطابق، دلایل آن را ذکر کنید.

توجه : برای اندازه‌گیری امپدانس پنجره راکتانسی، درصورتی‌که پنجره را به‌تنهایی به انتهای خط موجبری ببندیم، علاوه بر این‌که کاملاً به انتهای موجبر نمی‌چسبد، امپدانس آن با امپدانس هوا موازی خواهد شد. در نتیجه مقدار امپدانس نرمالیزه کلی اندازه‌گیری شده Z_n ، به‌صورت رابطه زیر خواهد بود:

$$z_n = \frac{1}{Z_0} * \frac{Z_L * Z_S}{Z_L + Z_S}$$

در رابطه فوق Z_S امپدانس هوا وZ_L امپدانس پنجره است.درصورتی‌که مقدار Z_S مشخص باشد، Z_L را می‌توان به کمک رابطه بالا از طریق محاسبه به دست آورد.برای اندازه‌گیری، راه‌حل ساده استفاده از یک پاره‌خط اتصال کوتاه به طول $\frac{\lambda}{4}$ است که در انتها، پشت پنجره امپدانسی بسته‌شده باشد. در این حالت Z_L با یک امپدانس بی‌نهایت موازی خواهد شد و در نتیجه مقدار آن مستقیماً اندازه‌گیری می‌شود.

جدول شماره (۲-۹) مقادیر مربوط به محل اتصال کوتاه،VSWR و امپدانس مشخصه پنجره‌های امپدانسی نشان داده‌شده در جدول(۲-۱۰)

پنجره امپدانسی	m_1	m_2	m_3	d	VSWR	مقدار راکتانس
A						
B						
C						
D						
E						

در جدول (۷-۹) $d = \frac{D}{\lambda_g}$ است.

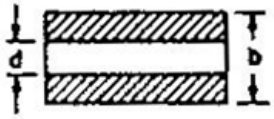
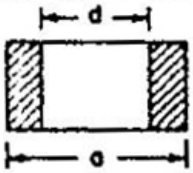
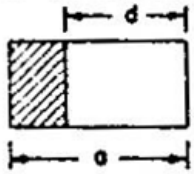
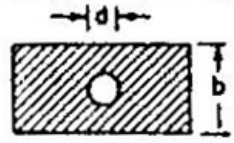
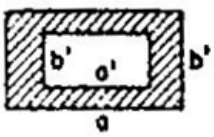
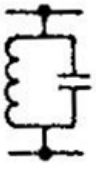
در مورد پروب اگر طول میله در داخل موج‌بر، کمتر از یک‌چهارم طول‌موج باشد، اثر به‌صورت سوسپتانس خازنی خواهد بود و اگر بیشتر از یک‌چهارم طول‌موج باشد، اثر آن به‌صورت سوسپتانس سلفی ظاهر می‌شود. هرگاه طول پروب مساوی یک‌چهارم طول‌موج باشد اثر آن نظیر یک مدار تشدید سری بوده و باعث می‌شود که تقریباً تمامی موج تابش منعکس شود.

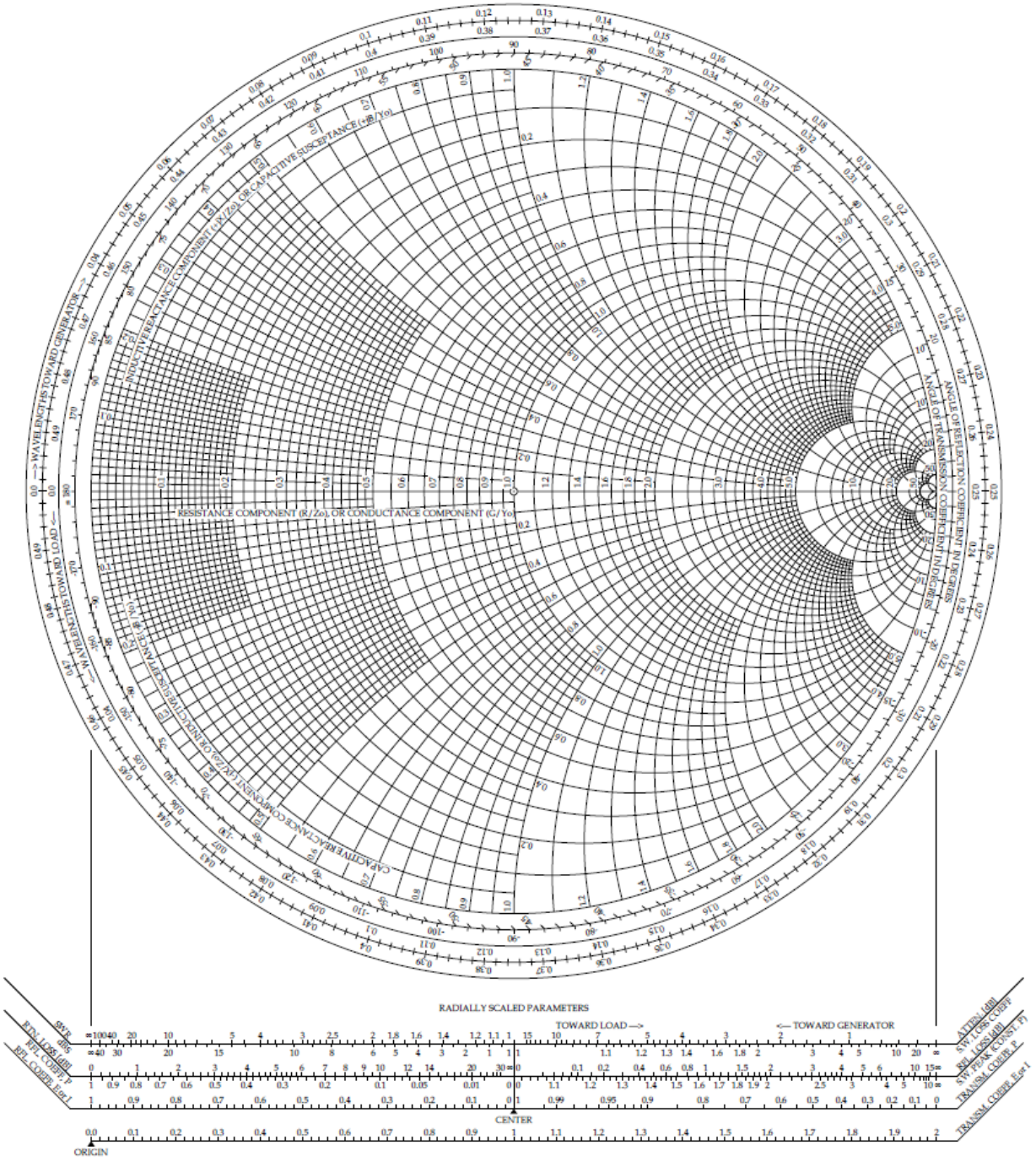
در جدول (۲-۱۰) مقادیر امپدانس نرمالیزه پنجره‌های راکتانسی در دهانه موج‌بر، بر حسب ابعاد و نوع آن‌ها مشاهده می‌شود.

سؤال

۱- در آزمایش اندازه‌گیری امپدانس موج‌بر اتصال کوتاه در طول‌های متفاوت، چگونه می‌توان با روشی شبیه اندازه‌گیری D ، مقدار Tضخامت فلانج موج‌بر را به دست آورد؟

جدول شماره (۲-۱۰)پنجره‌های امپدانسی مختلف(ستون سمت چپ)، معادل مداری(ستون وسط) فرمول تئوری امپدانس نرمالیزه (ستون سمت راست)

Transverse outline of aperture	Circuit characfer	$\frac{Z}{Z_0}$
a.  Symmetrical capacitive aperture		$-j\frac{\lambda_g}{4b}\left(\ln\frac{2b}{\pi d}+\frac{b^2}{2\lambda_g^2}\right)^{-1}$ $\frac{d}{b}\ll 1$ $-j\frac{2b\lambda_g}{\pi^4(b-d)^2}$ $\frac{b-d}{b}\ll 1$
b. Asymmetrical capacitive aperture		As above but with λ_g replaced by $\frac{\lambda_g}{2}$
c.  Symmetrical inductive aperture		$j\frac{a}{\lambda_g}\tan^2\frac{\pi d}{2a}\left(1+\frac{1}{6}\frac{\pi^2 d^2}{\lambda^2}\right)$ $\frac{d}{a}\ll 1$ $j\frac{a}{\lambda_g}\cot^2 2\pi\frac{a-d}{a}\left[1+\frac{8\pi^2}{3}\frac{(a-d)^2}{\lambda^2}\right]$ $\frac{a-d}{a}\ll 1$
d.  Asymmetrical inductive aperture		$j\frac{2a^2}{\pi^2\lambda_g(a-d)^2}\left[1+\frac{\pi^2}{\lambda^2}(a-d)^2\ln\frac{c}{2}\frac{a-d}{a}\right]^{-1}$ $\frac{a-d}{a}\ll 1$
e.  Small circular aperture		$j\frac{2\pi d^3}{3ab\lambda_g}$ $d\ll b$
f.  Resonant aperture		$\frac{Z}{Z_0}\to\infty$ when $\frac{a'}{b'}\sqrt{1-\left(\frac{\lambda}{2a'}\right)^2}=\frac{a}{b}\sqrt{1-\left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}$



شکل(۲-۱۳) نمودار اسمیت

فصل سوم

۱- بررسی و اندازه‌گیری مشخصات کوپلرهای جهتی
۲- ماتریس پراکندگی (S)

آزمایش هفتم

موضوع: اندازه‌گیری مشخصات کوپلرهای مایکروویوی، افت عبوری و افت بازگشتی

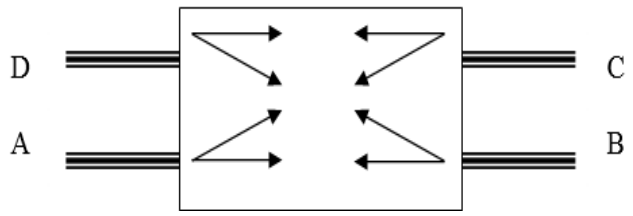
اهداف:آشنایی با مفهوم کوپلر، اندازه‌گیری ضرایب تزویج و جهت‌دهی کوپلرها، اندازه‌گیری افت برگشتی و عبوری با استفاده از کوپلرها

- تئوری:

کوپلر جهتی[۵] یک اتصال چهار دهنه‌ای مایکروویو است. با توجه به شکل (۳-۱) که به‌طور شماتیک رسم شده است، یک کوپلر جهتی ایده‌آل درصورتی‌که دهنه‌های آن به بار تطبیق ختم شده باشد، دارای این خصوصیات است که وقتی موجی از دهنه1 (A) به آن وارد شود، خروجی از دهنه 3 (B) بوده و درعین‌حال یک نمونه از موج ورودی می‌تواند به دهنه 2 (C) برود. دهنه 4 (D) نباید خروجی داشته باشد. همچنین اگر موج ورودی از دهنه 4 (D) وارد کوپلر جهتی شود، خروجی از دهنه‌های 2 (C) و 3 (B) امکان‌پذیربوده و از دهنه 1 (A) نباید خروجی وجود داشته باشد. لذا بین دهنه‌های A وD امکان تبادل انرژی وجود نخواهد داشت.

به همین ترتیب اگر دهنه (2) یا دهنه (3) برای ورودی انتخاب شود، خروجی فقط از دهنه‌های (1) و(4) امکان‌پذیر خواهد بود. لذا دهنه‌های (2) و (3) نیز نمی‌توانند باهم تبادل انرژی داشته باشند و این دهنه‌ها از هم ایزوله هستند. البته این در صورتی است که هر چهار دهنه آن به بار تطبیق شده ختم شده باشند. به عبارت دیگر وقتی سه دهنه آن به بار تطبیق شده منتهی شود، دهنه چهارم به‌صورت تطبیق شده عمل می‌کند، به‌طوری‌که ورودی از این دهنه بدون انعکاس خواهد بود.

کوپلرهای جهتی برای نمونه‌برداری از قدرت مصرفی در سیستم‌های مایکروویو، اندازه‌گیری قدرت مایکروویو، اندازه‌گیری امپدانس و بازتاب سنجی برای نمونه‌برداری از موج تابش و موج بازتاب و مقایسه آن‌ها باهم مورداستفاده قرار می‌گیرند.



شکل (۳-۱) نمایش یک کوپلر جهتی ۴ دهنه

کوپلرهای جهتی موج‌بری، معمولاً شامل دو قطعه موج‌بر هستند که تحت زاویه‌ای روی هم قرار گرفته و دردیواره مشترک، روزنه‌هایی جهت انتقال انرژی از قطعه موج‌بر زیری (خط اصلی)، به قطعه موج‌بر رویی تعبیه شده است.

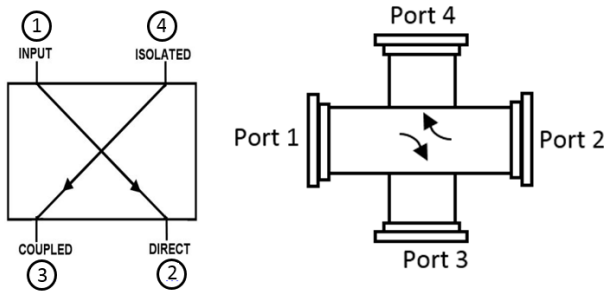
کوپلرهای جهتی دارای انواع مختلفی هستند که دو نوع از آن‌ها در شکل‌های(۳-۲) و (۳-۳) مشاهده می‌شود. در شکل (۳-۲) یک نمونه‌بردار توجیهی از نوع ضربدری (کراس کوپلر)[۶] مشاهده می‌شود که دارای چهاردهنه آزاد است که با اعداد 1 , 2 , 3 و 4 مشخص‌شده‌اند.

---

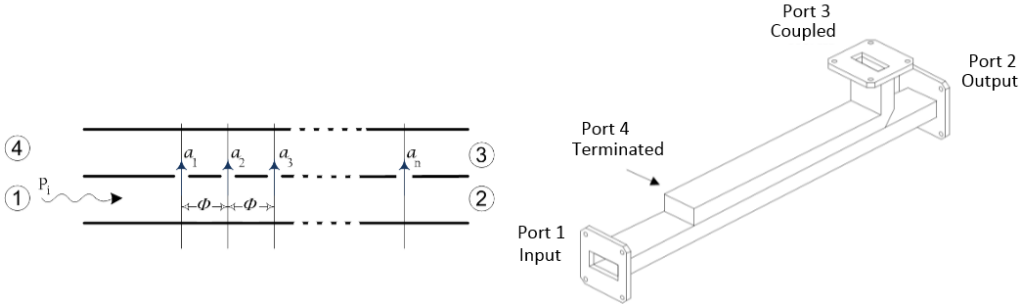
[۵] Directional Coupler

[۶] Cross Coupler

در شکل (۳-۳) یک نمونه‌بردار توجیهی دیگر که در آن، چندین روزنه تزویج برای تبادل انرژی در دیواره مشترک تعبیه شده است، مشاهده می‌شود که کوپلر جهتی چندحفره‌ای[۷] نامیده می‌شود. در این نوع کوپلرها معمولاً دهنه چهارم توسط یک بار تطبیق بطور دائم بسته شده است و کوپلر جهتی عملاً سه دهنه آزاد دارد.



شکل(۳-۲) نمایش کراس کوپلر



شکل (۳-۳) نمایش کوپلر جهتی چند حفره‌ای

کوپلرها دارای دو پارامتر مهم هستند.

ضریب تزویج[۸] با C نمایش داده می‌شود و مقدار آن بر حسب دسی‌بل، مشخص‌کننده جزئی از کل قدرت ورودی به کوپلر جهتی است، که به شاخه تزویج (دهنه 3) هدایت می‌شود:

$$C = 10\log\frac{P_i}{P_c}$$

در این رابطه، P_i مشخص‌کننده قدرتی است که از دهنه A وارد شده و به سمت دهنه B حرکت می‌کند. P_C مشخص‌کننده مقدار قدرت خروجی از دهنه 2 یا همان دهنه (C) است. در این‌حالت P_i را می‌توان بصورت $P_{A\text{-}B}$ نشان داد. مقدار پارامتر C در کوپلرهای مختلف می‌تواند از 3dB تا 40dB باشد که بستگی به موارد استفاده آن‌ها دارد.

یکی دیگر از پارامترهای کوپلر جهتی، ضریب جهت‌دهی[۹] است که می‌توان آن را به‌صورت زیر تعریف کرد:

$$D = 10\log\frac{P_C}{P'_C} = 10\log\frac{P_C}{P_D}$$

P_D مقدار قدرتی است که (اگر وجود داشته باشد) از دهنه (4) یا D خارج می‌شود.

-شرح آزمایش

---

۷ Multihole Directional Coupler

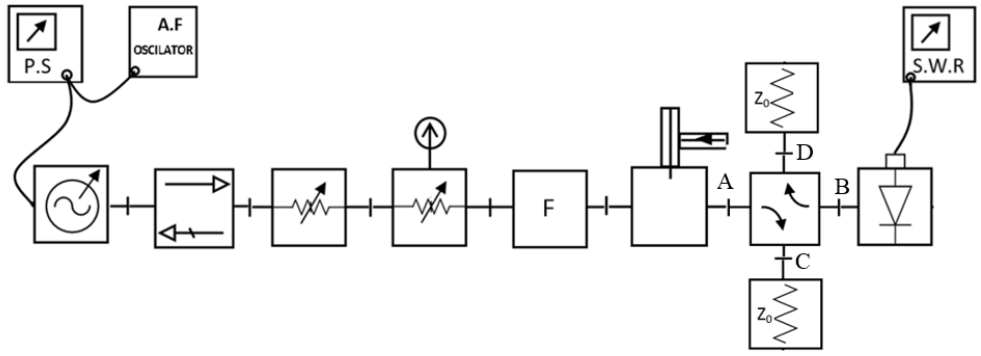
۸ Coupling

۹ Directivity

الف) اندازه‌گیری ضریب تزویج کراس کوپلر

با در نظر گرفتن مدار (۳-۴)، دامنه موج مربعی مدوله‌کننده و مقدار ولتاژ رفلکتور (یا بایاس نوسان‌ساز)را طوری تنظیم نمایید که نوسانات به‌طور پالسی مدوله شوند و درعین‌حال دامنه آن‌ها حد اکثر شود. دیود آشکارساز را به پورت C کراس کوپلر وصل کنید. عقربه تضعیف‌کننده مدرج را روی صفر قرارداده و به کمک تضعیف‌کننده غیر مدرج و گین ورودی دستگاه، عقربه دستگاه تقویت‌کننده VSWR را روی 3dB بیاورید. کراس کوپلر را از مدار خارج کنید و کریستال را از آن جدا نمایید. آن را به انتهای خط شکافدار وصل کنید. با تغییر عقربه تضعیف‌کننده مدرج، عقربه دستگاه نشان‌دهنده را روی مبنای 3dB بیاورید و مقدار تضعیف حاصل از تضعیف‌کننده مدرج را به کمک منحنی تضعیف‌کننده مدرج، مشخص نمایید. این مقدار تضعیف برابر ضریب تزویج کراس کوپلر خواهد بود.

$C = \alpha_{dB}$



شکل (۳-۴) ست-آپ مورد نیاز برای اندازه‌گیری پارامترهای کوپلر

ب) اندازه‌گیری ضریب جهت‌دهی کراس کوپلر

- محل کریستال و همراه با آن نشان‌دهنده VSWR را با بار تطبیق شاخه D عوض نمایید. عقربه تضعیف‌کننده موج‌بری مدرج را، روی صفر قرار دهید. تضعیف ورودی دستگاه نشان‌دهنده را کاهش و گین INPUT ADJ 2 را افزایش دهید تا عقربه دستگاه نشان‌دهنده، بتواند در محدوده رنج دستگاه در یک نقطه مشخص قرار گیرد. در این حالت ممکن است به علت ضعیف بودن بیش‌ازحد دامنه موج در شاخه D ، باز هم عقربه انحراف قابل‌ملاحظه ای نداشته باشد. می‌توان با تغییر پیچ های کریستال مانت، تطبیق نسبتاً بهتری در خروجی ایجاد نمود تا عقربه دستگاه نشان‌دهنده، انحراف لازم پیدا کند.

-محل کریستال را با بار تطبیق شاخه C عوض نمایید و با تغییر عقربه تضعیف‌کننده مدرج، آن را روی مبنای قبلی بیاورید و مقدار تضعیف ناشی از تضعیف‌کننده مدرج را به کمک منحنی مربوطه به دست بیاورید. این مقدار برابر ضریب دایرکتیویته کراس کوپلر خواهد بود.

$D = \alpha_{dB}$

ج) اندازه‌گیری ضریب تزویج کوپلر جهتی چندحفره‌ای

دایرکشنال کوپلر را طوری در مدار قرار می‌دهیم که ورودی از دهنه (1) و خروجی از دهنه (3) (شکل(۳-۳))باشد. درعین‌حال عقربه تضعیف‌کننده مدرج روی صفر و عقربه دستگاه نشان‌دهنده روی 3dB قرار گیرد. دایرکشنال کوپلر را از مدار جدا می‌کنیم و کریستال را به انتهای خط شکاف دار می بندیم. به کمک تضعیف‌کننده مدرج، عقربه دستگاه

نشان‌دهنده را روی 3dB می آوریم. مقدار تضعیف به‌دست‌آمده از تضعیف‌کننده مدرج، برابر ضریب تزویج کوپلر جهتی چندحفره‌ای خواهد بود.

$$C_1 = \alpha_{dB}$$

د) اندازه‌گیری ضریب جهت‌دهی کوپلر جهتی چندحفره‌ای

در مدار شکل (۳-۴) به‌جای کراس کوپلر، کوپلر جهتی چندحفره‌ای را طوری در مدار قرار دهید، که ورودی از دهنه (2) و خروجی از دهنه (3) باشد. در این حالت عقربه تضعیف‌کننده مدرج را روی صفر قرار دهید و عقربه دستگاه نشان‌دهنده را به کمک تضعیف کننده غیر مدرج و گین ورودی دستگاه نشان‌دهنده، روی 3dB آورید. کوپلر جهتی را از مدار باز کرده، آن را طوری در مدار قرار دهید که ورودی از دهنه(1) وخروجی از دهنه (3) باشد. حال به کمک تضعیف‌کننده مدرج، عقربه دستگاه نشان‌دهنده را روی 3dB بیاورید.

تضعیف به‌دست‌آمده از تضعیف‌کننده مدرج را به کمک منحنی مربوطه مشخص می‌کنیم. این مقدار تضعیف برابر ضریب جهت‌دهی کوپلر چندحفره‌ای خواهد بود.

$$D_1 = \alpha_{dB}$$

جدول شماره (۳-۱) مقادیر جهت‌دهی، ایزولاسیون و تزویج اندازه‌گیری شده کراس کوپلر

مقادیر پارامترها برحسب dB	
	ضریب جهت‌دهی
	ضریب تزویج
	ضریب ایزولاسیون

جدول شماره (۳-۲) مقدار جهت‌دهی، تزویج و ایزولاسیون اندازه‌گیری شده کوپلر جهتی چندحفره‌ای

مقادیر پارامترها برحسب dB	
	ضریب جهت‌دهی
	ضریب تزویج
	ضریب ایزولاسیون

اندازه‌گیری افت برگشتی (RETURN LOSS)

-تئوری:

افت برگشتی رابطه بین قدرت برگشتی از بار و قدرت تابشی رسیده به بار را بر حسب dB مشخص می‌کند. به‌عنوان مثال منظور از 10 dB افت برگشتی، این است که قدرت برگشتی از بار در مقایسه با قدرت تابشی رسیده به بار، به مقدار 10dB ضعیف تر است. لذا افت برگشتی هم مانند ضریب انعکاس و ضریب موج ساکن، تعیین کننده میزان تطبیق و یا عدم تطبیق یک عنصر به مدار است. اغلب موقعی که هدف بررسی عملکرد یک عنصر مدار در یک باند فرکانسی نسبتاً وسیع باشد و نیز برای تعیین کیفیت جاذب های الکترومغناطیسی، مورداستفاده قرار می‌گیرد.

اگر قدرت ورودی به عنصر را با P_i و قدرت برگشتی از آنرا با Pr مشخص کنیم، افت برگشتی بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$R.L = 10\log\frac{P_i}{P_r}$$

به علت اینکه کراس کوپلرها در مقایسه با کوپلرهای جهتی چندحفره‌ای از دقت بالایی برخوردارند، لذا برای اندازه‌گیری افت برگشتی از کراس کوپلر استفاده می‌کنیم. در این نمونه‌بردارها نسبت $\frac{P_i'}{P_i}=\frac{P_r'}{P_r}$ مقداری ثابت است مساوی عکس ضریب تزویج آن‌ها است.مقدار R.L را می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$R.L=10\log\frac{P_i}{P_r}=10\log\frac{P_i'}{P_r'}$$

با استفاده از روابط زیر و با داشتن مقدار افت برگشتی، مقدار ضریب انعکاس و ضریب موج ساکن را می‌توان به دست آورد. با در نظر گرفتن اینکه نسبت $\frac{p_r}{P_i}=\rho^2$ می‌توان نوشت:

$$\Gamma=\rho=\log^{-1}\left(\frac{-R.L}{20}\right)$$

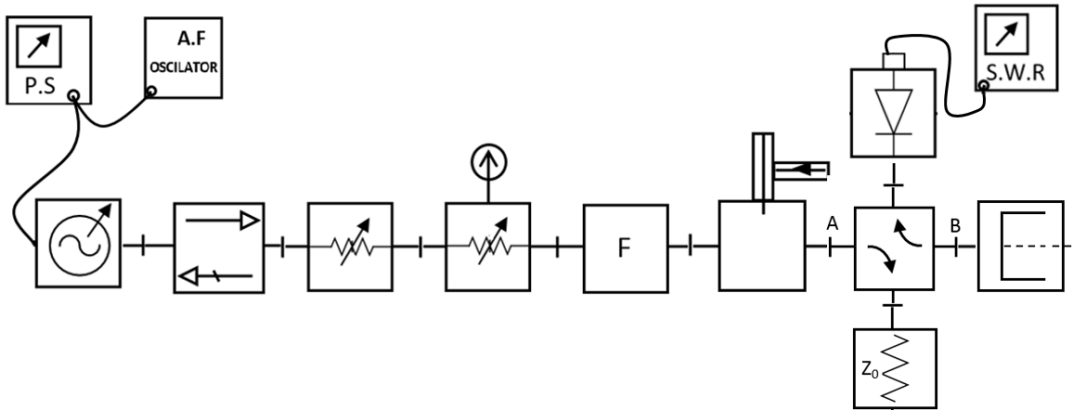
$$VSWR=\frac{1+\rho}{1-\rho}$$

-شرح آزمایش:

برای اندازه‌گیری افت برگشتی مداری مطابق شکل (۳-۵) ترتیب دهید. چون همواره ضریب تزویج دو دهنه فرعی نمونه‌بردارها، کاملاً باهم مساوی نیستند و در عمل اغلب از نمونه‌بردارهایی که دارای یک دهنه فرعی هستند استفاده می‌شود، لذا روش آزمایش بر مبنای استفاده از نمونه‌بردار با یک دهنه فرعی است.

-بار موردنظر را به انتهای مدار و کریستال را به دهنه فرعی کراس کوپلر ببندید. در این حالت مقدار موجی که به کریستال می رسد، متناسب P_r است. به کمک ورودی ۱ و ۲، عقربه نشان‌دهنده را روی یک مبنای مشخص، مثلاً3dB بیاورید.

-بار را از انتهای مدار برداشته و به‌جای آن یک اتصال کوتاه قرار دهید. در این حالت مقدار موجی که به کریستال می‌رسد، متناسب با P_i است. به کمک تضعیف‌کننده مدرج، عقربه نشان‌دهنده را روی مبنای قبلی بیاورید. مقدار تضعیف برابر R.L بار موردنظر است. VSWR بار را هم اندازه‌گیری نمایید و برای تمامی بارهای مختلف جدول (۳-۳) موارد فوق را تکرار نمایید. مقادیر ضرایب انعکاس حاصل از R.L و VSWR(که در آزمایش قبل اندازه‌گیری کرده‌اید) را در جدول یادداشت نموده و باهم مقایسه نمائید.



شکل (۳-۵) ست-آپ لازم برای اندازه‌گیری افت برگشتی

جدول (۳-۳) اندازه‌گیری افت برگشتی و محاسبه ضریب انعکاس

قطعه	R.L	VSWR	ρ_1	ρ_2
مبدل موجبر به کابل				
دیود آشکارساز				
اتصال کوتاه متغیر				
بار تطبیق				

- افت عبوری: (Insertion Loss)

- تئوری:

مقدار افت قدرت موج را در حین عبور از یک قطعه یا یک عنصر مدار، افت عبوری آن قطعه یا آن عنصر نامند. این افت ناشی از عدم تطبیق ورودی و تضعیف داخل آن قطعه یا آن عنصر است. اگر قدرت ورودی به عنصررا با P_i و قدرت خروجی از آن را با P_t نمایش دهیم، افت قدرت موج عبوری از عنصر با رابطه زیر مشخص می‌شود:

$$I.L = 10\log\frac{Pi}{Pt}$$

شرح آزمایش:

برای اندازه‌گیری افت عبوری باید ابتدا بار موردنظر را در مسیر کراس کوپلر قرارداد و دیود آشکارساز را به پورت C وصل کرد. در این حالت مقدار موجی که به کریستال می‌رسد، متناسب با P_t است. به کمک ورودی ۱و۲ ، عقربه نشان‌دهنده را روی یک مبنای مشخص، مثلاً 3dB بیاورید. در مرحله بعد بار موردنظر را از مسیر کراس کاپلر برداشته و مجددا کریستال را به پورت C وصل نمایید. در این حالت مقدار موجی که به دیود آشکارساز می‌رسد، متناسب با P_i است. به کمک تضعیف‌کننده مدرج، عقربه نشان‌دهنده را روی مبنای قبلی بیاورید. مقدار تضعیف برابر I.L بار موردنظر است.

جدول شماره (۳-۴) مقادیر افت عبوری از تضعیف‌کننده‌های مدرج و غیرمدرج

قطعه مورد آزمایش	افت عبوری
تضعیف‌کننده غیرمدرج در وضعیت صفر	
تضعیف‌کننده مدرج در وضعیت صفر	

سؤال

۱- روابط ضریب کوپلینگ، دایرکتیویته و ضریب ایزولاسیون را بر حسب پارامترهای S بازنویسی کنید.

۲- اگر در اندازه‌گیری افت برگشتی، نمونه ورودی را از دهنه C اندازه بگیریم در حالیکه ضریب کوپلینگ شاخه‌ها باهم برابر نباشد، مقدار صحیح آن را چگونه به دست می‌آوریم؟

آزمایش هشتم

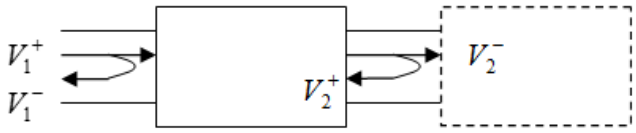
موضوع: **اندازه‌گیری ماتریس پراکندگی(S)**

اهداف:آشنایی با مفهوم ماتریس پراکندگی، نحوه اندازه‌گیری دامنه و فاز پارامترهای قطری و غیرقطری ماتریس پراکندگی

- تئوری:

- **ماتریس پراکندگی (S)**

یک قطعه دو دهنه (پورتی) مانند شکل (۳-۶) را در نظر می گیریم. از موج ورودی به دهنه ۱، مقداری در اثر عدم تطبیق این دهنه با مدار منعکس، مقداری در داخل دو دهنهی تلف و بقیه از دهنه ۲ خارج می‌شود. همین امر در مورد موج ورودی به دهنه ۲ نیز صادق است. به‌طور کلی اگر هم زمان به هر دو دهنه، ورودی داشته باشیم، موج خروجی از هر دهنه شامل دو قسمت خواهد بود. خروجی از دهنه ۱ شامل مقداری از موج ورودی به این دهنه و مقداری هم از موج ورودی به دهنه ۲ می باشد. در مورد خروجی از دهنه ۲ نیز وضع به همین صورت خواهد بود.



شکل (۳-۶) موج رفت و برگشت در پورت‌های یک دودهنه

اگر مقدار خروجی از هر دهنه را بر حسب ورودی های آن دهنه بنویسیم، معادلات زیر حاصل می شوند که در آن‌ها، ضرایب ورودی، پارامترهای ماتریس پراکندگی دو دهنه هستند.

$$V_1^- = S_{11}V_1^+ + S_{12}V_2^+$$
$$V_2^- = S_{21}V_1^+ + S_{22}V_2^+$$

برای تعیین ماتریس پراکندگی دو دهنه (S) ، کافی است معادلات به‌دست‌آمده را بصورت ماتریسی بنویسیم.

$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ V_2^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_2^+ \end{bmatrix}$$

اگر $V_2^+ = 0$ باشد، مقادیر S_{11} و S_{21} بصورت زیر به دست می آیند:

$$S_{11} = \frac{V_1^-}{V_1^+}\Big|_{V_2^+=0}$$
$$S_{21} = \frac{V_2^-}{V_1^+}\Big|_{V_2^+=0}$$

و اگر $V_1^+ = 0$ مساوی صفر باشد:

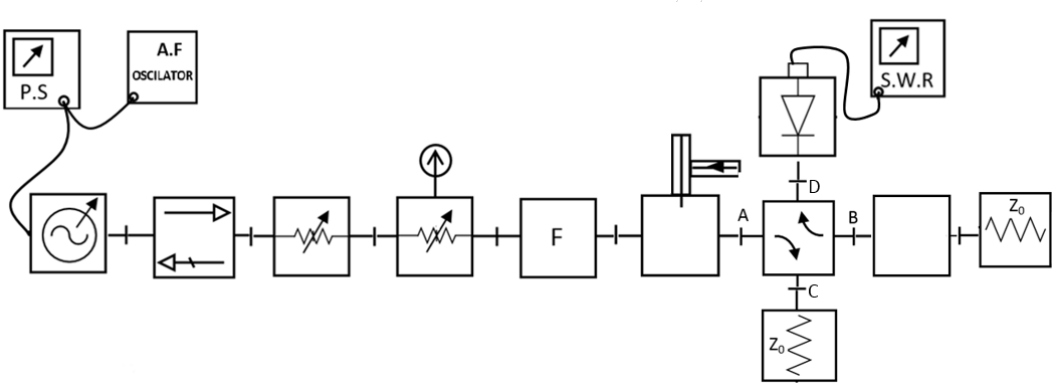
$$S_{22} = \frac{V_2^-}{V_2^+}\Big|_{V_1^+=0}$$
$$S_{12} = \frac{V_1^-}{V_2^+}\Big|_{V_1^+=0}$$

با توجه به روابط فوق می‌توان نتیجه گرفت که در این حالت، S_{11} برابر ضریب بازتاب دهنه۱است . به همین ترتیب S_{22} مساوی ضریب بازتاب دهنه۲ خواهد بود. در نتیجه می‌توان برای به دست آوردن مقادیر S_{11} و S_{22} از همان روشی که برای به دست آوردن ضریب بازتاب بکار برده شد، استفاده کرد. اکنون مقادیر دامنه‌های S_{11} وS_{22} را با استفاده از دایرکشنال کوپلر(کراس کوپلر) به دست می آوریم.

- اندازه‌گیری دامنه S_{11}:

مداری مطابق شکل (۳-۷) ترتیب دهید به‌طوری‌که منبع دارای مدلاسیون پالسی باشد و با حداکثر دامنه، نوسان نماید. اکنون درحالی‌که عقربه تضعیف‌کننده مدرج روی صفر قرار گرفته ، عقربه دستگاه نشان‌دهنده VSWR را روی مقدار مشخصی، مثلاً 3dB بیاورید.

- جای کریستال را با بار تطبیق شاخه C کوپلر عوض نمایید و با ثابت نگه داشتن همه شرایط، با تغییر مقدار تضعیف تضعیف‌کننده مدرج، عقربه دستگاه نشان‌دهنده را روی مبنای قبلی بیاورید.



شکل (۳- ۷) ست-آپ لازم برای اندازه‌گیری S_{11}

با استفاده از مقدار تضعیف حاصل از تضعیف‌کننده مدرج که بر حسب dB مشخص‌شده است و با توجه به جهت حرکت موج در شاخه فرعی کراس کوپلر ایده آل (با جهت‌دهی بی‌نهایت)، می‌توان نوشت:

$$\alpha = 20\log\frac{V_C}{V_D} = -20\log\frac{V_D}{V_C}$$

$$\frac{V_D}{V_C} = \log^{-1}\left(-\frac{\alpha}{20}\right)$$

در صورت برابر بودن ضریب تزویج شاخه های فرعی، نسبت V_D/V_C برابر دامنه S_{11} خواهد بود.

البته می‌توانستیم دامنه S_{11} را با استفاده از خط شکاف دار و VSWR METTER نیز به دست آوریم.

- **اندازه‌گیری فاز S_{11}:**

کریستال خط شکاف دار را به دستگاه نشان‌دهنده وصل نمایید و پس از به دست آوردن خروجی کافی، پروب خط شکاف دار را در طول خط حرکت دهید تا یک مینیمم پیدا شود. محل این مینیمم را یادداشت نموده و آن را با m_3 مشخص نمایید. دو دهنهی را از مدار جدا نمایید و صفحه اتصال کوتاه مسی به انتهای کوپلر (دهنه B) ببندید. با حرکت پروب خط شکاف دار، دو مینیمم متوالی m_1 و m_2 در طرفین m_3 به دست آورید

$$2(m_2 - m_1) = \lambda_g$$
$$m_3 - m_1 = D$$
$$d = \frac{D}{\lambda_g}$$

با استفاده از روابط فوق و به کمک نمودار اسمیت، می‌توانید فاز S_{11} را به دست آورید.
روش به دست آوردن دامنه و فاز S_{22} نیز به همین ترتیب است. با این تفاوت که منبع سیگنال به دهنه ۲ و بار تطبیق به دهنه ۱ وصل می‌شود.

- **اندازه‌گیری دامنه S_{21} :**

با استفاده از مدار قبل، خروجی کریستال شاخه C کراس کوپلر را به دستگاه نشان‌دهنده وصل نمایید و مدار را طوری تغییر دهید که نمونه‌ای از موج خروجی از دهنه ۲ نشان داده شود. دقت کنید در این حالت عقربه تضعیف‌کننده مدرج روی صفر قرار گیرد و عقربه نشان‌دهنده را روی یک عدد مشخصی مثلاً 3dB بیاورید.
حال مدار را طوری تنظیم نمایید که نمونه‌ای از موج ورودی به دهنه ۱ ،که از شاخه C کراس کوپلر خارج می‌شود، توسط نشان‌دهنده مشاهده شود. در این حالت عقربه نشان‌دهنده را توسط تضعیف‌کننده مدرج روی عدد قبلی(3dB) بیاورید و مقدار تضعیفِ تضعیف‌کننده مدرج را برحسب dB یادداشت نمایید. دامنه S_{21} از رابطه زیر به دست می‌آید:

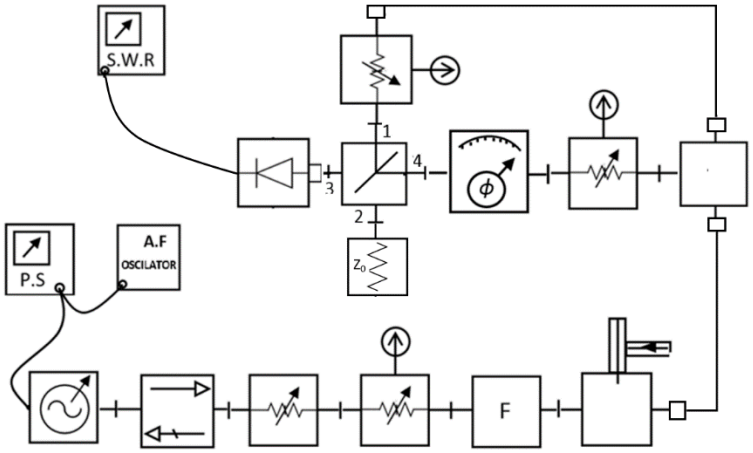
$$|S_{21}| = \log^{-1}\left(-\frac{\alpha}{20}\right)$$

با استفاده از تغییر فاز دهنده چرخان، می‌توان اختلاف فاز موج بین دو دهنه ورودی و خروجی یک قطعه را، اندازه گرفت. با چرخاندن گردونه جلویی این تغییر فاز دهنده، تیغه میانی دی‌الکتریکی که در داخل آن تعبیه شده است، می چرخد و متناسب با چرخش این تیغه میانی، تغییر فازی روی موجی که از داخل آن عبور می‌کند، به وجود می‌آید. مقدار این تغییر فاز توسط صفحه مدرج جلویی آن مشخص می‌شود.

- **اندازه‌گیری فاز S_{21}:**

-در این حالت باید اختلاف فاز بین دو دهنه ورودی و خروجی را مشخص کنیم. لذا مداری مطابق شکل (۳-۸) ترتیب می‌دهیم.

همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود در این مدار ابتدا قدرت خروجی منبع سیگنال مایکروویو، به دو قسمت تقسیم می‌شود و بعد از عبور از دو مسیر مختلف، به ورودی های 1 و 4 مجیک T وارد می شوند. برای سهولت کار، در یکی از مسیرها از دو عدد مبدل موج‌بر به کابل هم‌محور، استفاده‌شده است.



شکل(۳-۸) ست-آپِ لازم برای اندازه‌گیری فاز S_{12}

-عقربه درجه‌بندی تغییر فاز دهنده را روی صفر قرار دهید. با بستن پیچ مربوط به عقربه، آن را ثابت نمایید. گردونه تغییر فاز دهنده را آن‌قدر بچرخانید تا خروجی دیود به حداقل برسد. در این حالت فاز موج در ورودی دهنه‌های ۱ و ۴ مجیک T یکسان بوده و عقربه تغییر فاز دهنده هم صفر را نشان می‌دهد.

-پیچ ثابت کننده عقربه تغییر فاز دهنده را شل کنید. دودهنهی را در مسیر (۲) و قبل از مبدل موجبر به کابل هم‌محور، طوری ببندید که موج از دهنه۱ به آن وارد شود. سپس گردونه تغییر فاز دهنده را بچرخانید تا خروجی دیود، حداقل شود. در این حالت فاز موج دوباره در ورودی دهنه‌های ۱ و ۴ مجیک T باهم برابر شده‌اند و درجه‌ای که تغییر فاز دهنده نشان می‌دهد، همان فاز S_{21} است.

اندازه‌گیری فاز S_{12} نیز به همین روش انجام می‌پذیرد با این تفاوت که ورودی از دهنه ۲ خواهد بود.

-تمرین: برای دو دهنهی های زیر دامنه و فاز S_{21} را اندازه‌گیری نمایید،

یک قطعه موجبر با طول مشخص، تضعیف‌کننده مدرج و تضعیف‌کننده غیر مدرج.

-فاز S_{21} را برای یک قطعه موجبر با طول مشخص محاسبه کنید و با مقدار اندازه‌گیری شده مقایسه نمایید.

سوالات:

۱- اگر فرکانس منبع سیگنال تغییر کند، پارامترهای S تغییر می‌کنند؟ توضیح دهید.

۲- اگر ضریب تزویج دهنه‌های A و C با ضریب تزویج دهنه‌های B وD دایرکشنال کوپلر برابر نباشند، به چه طریق می‌توان اندازه‌گیری دامنه S_{11} را انجام داد؟

۳- مقدار دایرکتویته دایرکشنال کوپلر چه تاثیری در اندازه‌گیری دامنه S_{nn} دارد؟

۴- اگر دایرکتویته یک کراس کوپلر برابر ۳۰ dB و ضرایب تزویج هر یک از دهنه‌ها مساوی ۲۰ dB باشد و دامنه واقعی S_{11} در یک دو دهنهی برابر۰/۱ باشد، مقدار اندازه‌گیری شده دارای چند در صد خطا خواهد بود؟

فصل چهارم

بررسی و اندازه‌گیری مشخصات برخی از عناصر مداری
غیر فعال مایکروویو

آزمایش نهم

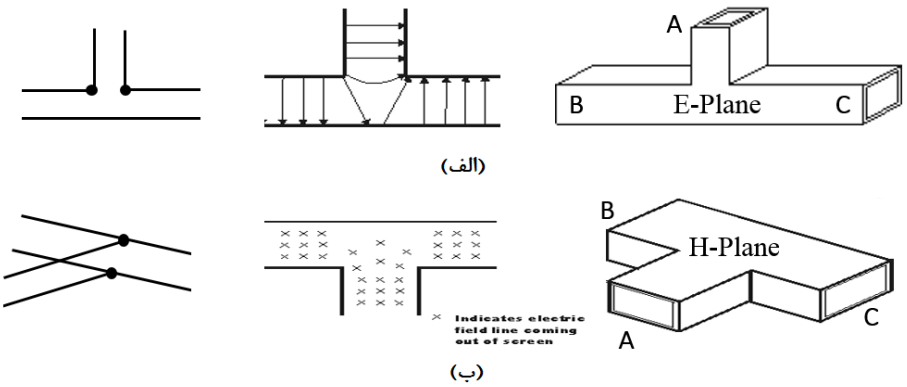
موضوع: **اندازه‌گیری ماتریس پراکندگی اتصالات T سه دهنه (صفحه E و صفحه H) و T جادویی**

اهداف: آشنایی با نحوه عملکرد انواع اتصالات T سه دهنه و چهاردهنه و اندازه‌گیری پارامترهای پراکندگی آن‌ها

تئوری:

اتصالات T

هر اتصال T دارای سه دهانه است که هریک از آن‌ها ممکن است ورودی یا خروجی باشد. ساختار این نوع اتصالات T معمولاً طبق شکل(۴-۱) به دو صورت می‌تواند باشد: T صفحه‌ی E (یا Tسری) (شکل الف) وT صفحه‌ی H (یاT موازی)(شکل ب). در نوع صفحه‌ی E ، اگر موجی از دهانه A وارد شود به دو قسمت تقسیم می‌شود و از دهانه های B و C با اختلاف فاز ۱۸۰ درجه نسبت به هم، خارج می‌شود. در نوع صفحه‌ی H موج ورودی از A به دو قسمت تقسیم شده و از دهانه‌های B و C به‌طور هم‌فاز خارج می شوند. اگر دو موج هم‌فاز، هم زمان به دهانه‌های B وC وارد شوند، در T صفحه‌ی E خروجی از دهانه A تفاضل ورودی‌ها و در T صفحه‌ی H مجموع دو ورودی خواهد بود. علت اینکه به T صفحه‌ی E، T سری وبه نوع صفحه‌ی H ، موازی هم گفته می‌شود به خاطر شکل مربوط به مدار معادل آن‌ها است.



شکل(۴-۱) نمایش اتصالات T سری (E-plane) (ردیف اول) و موازی (H-plane) (ردیف دوم) از راست به چپ: شکل ظاهری، توزیع خطوط میدان الکتریکی و نمایش مداری

شرح آزمایش:

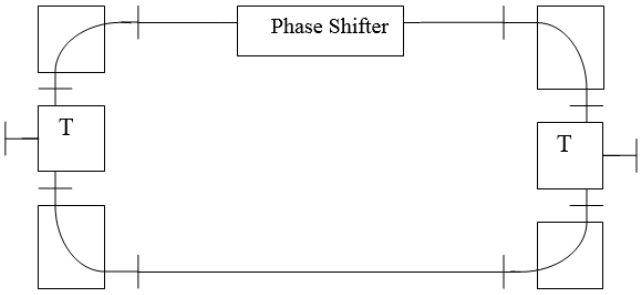
ابتدا T صفحه‌ی E را در انتهای خط شکاف دار طوری قرار دهید که موج از دهانه A وارد آن شود، به دهانه C بار تطبیق و به دهانه B دیود ببندید. عقربه نشان‌دهنده را به وسیله تضعیف‌کننده مدرج، روی مبنای مشخصی آورده و مقدار تضعیف را یادداشت نمایید،سپس جای دیود و بار تطبیق را عوض نموده و همین روش را تکرار نمایید.

در مورد T صفحه ی H نیز همین کار را انجام داده و نتایج را در جدول ثبت نمایید.

حال با استفاده از مدار شکل ۴-۲ ، اختلاف فاز بین خروجی های B و C را برای هر دو مورد مشخص نموده و در جدول ثبت نمایید.

جدول(۴-۱) مقادیر پارامترهای S مربوط به اتصالاتT سه پورتی (E-plane, H-plane)

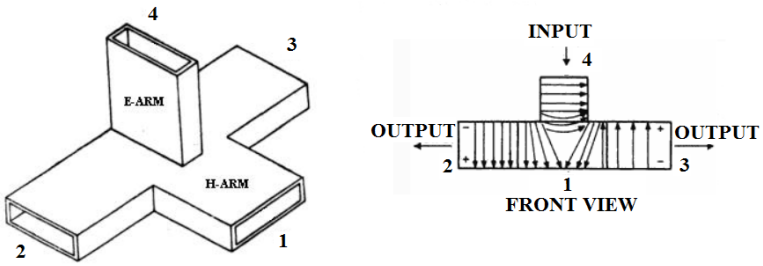
اختلاف فاز بین دهنههای مختلف T	مقدارتضعیف	درجه تضعیف‌کننده مدرج	ورودی ۱	دیود در دهانه	
				انتهای موجبر	
CوB				B	صفحهءی E
				C	
CوB				B	صفحهءی H
				C	



شکل(۴-۲) ست-آپ لازم برای اندازه‌گیری فاز پارامترهای S اتصالات T

بررسی وآزمایش T جادویی [۱۰] (هایبرید)

تئوری: این قطعه شامل ۴ دهنه است که از ترکیب یک T سری ویک T موازی حاصل می‌شود.



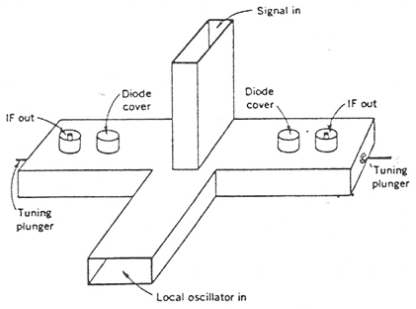
شکل(۴-۳) شکل ظاهری یک T جادویی (شکل سمت چپ) توزیع خطوط میدان الکتریکی هنگامی که ورودی به دهنه ۴ داده شود.

از خصوصیات T جادویی این است که اگر موجی از دهنه ۱ به آن وارد شود، به دو قسمت مساوی تقسیم شده و به‌طور هم‌فاز از دهنه‌های ۲ و ۳ آن خارج می‌شود. مقدار خروجی از دهنه ۴ تقریباً صفر است. چنانچه موج ورودی از دهنه ۴

[۱۰] Magic Tee

وارد شود (شکل۴-۳ سمت راست)، خروجی از دهنه‌های ۲ و۳ با دامنه‌های تقریباً مساوی و با اختلاف فاز ۱۸۰درجه خواهد بود.

کاربرد اصلی آن در گیرنده های مایکروویو سوپر هترودین[۱۱] برای ترکیب دو سیگنال ودر سیستم های اندازه‌گیری فاز است. در شکل(۴-۴) یک نمونه از آن که برای ترکیب دو سیگنال RF و پایین آوردن فرکانس تا حد IF از آن استفاده‌شده، مشاهده میشود. طرز قرار گرفتن آن را در مدارهای گیرنده مایکروویو و چگونگی عملکرد آن، در فصل آخر بررسی شده است.



شکل(۴-۴) یک نمونه T چهاردهنه برای ترکیب دو سیگنال RF و پایین آوردن فرکانس تا حد IF

شرح آزمایش:

در این آزمایش می خواهیم مقدار قدرت خروجی هر یک از دهنه‌های مختلف T جادویی را نسبت به ورودی به دست آوریم. همچنین اختلاف فاز بین دهنه‌های مختلف آن را بررسی می کنیم. برای این کارT جادویی را از دهنه ۱ به انتهای خط می بندیم و دیود کریستال را به ترتیب به دهنه‌های ۴، ۲ و ۳ T جادویی وصل می کنیم. خروجی هر یک از این دهنه‌ها را نسبت به ورودی دهنه ۱ به دست می آوریم . (لذا برای تعیین این نسبت ها هر بار، باید T جادویی را از انتهای مدار باز کرده و به‌جای آن دیود را ببندیم.) اختلاف فاز بین دهنه‌های مختلف را با استفاده از مدار شکل (۴ -۲) به دست آورید. در نهایت ماتریس پراکندگی(S) T جادویی را به دست آورید.

حال برای بررسی اختلاف فاز بین دهنه‌های خروجی به ازای تغییر ورودی، از مدار شکل (۴-۲) استفاده کرده و در آن به‌جای اتصال T سه راهی، T جادویی قرار دهید. نتایج به‌دست‌آمده و مقادیر اختلاف فازها را یادداشت نمایید.

سؤال

۱- مقادیر S_{11} ، T سه دهنه (E-Plane, H-plane) و چهاردهنه (T جادویی) را باهم مقایسه کنید. علت اختلاف و درستی نتایج به‌دست‌آمده را با اطلاعات درس مایکروویو بررسی کنید.

[۱۱] به نوع خاصی از گیرنده مخابراتی گفته می‌شود که با ضرب کردن سیگنال دریافتی از کانال در یک سیگنال متناوب با فرکانس متفاوت، فرکانس اصلی سیگنال دریافتی را تغییر می‌دهد. پردازش سیگنال حاصل آسان‌تر از سیگنال اولیه دریافتی خواهد بود. تقریبا همه‌ی گیرنده‌های رادیو و تلویزیون‌های مدرن سوپرهترودین هستند.

آزمایش دهم

موضوع: **اندازه‌گیری مشخصات برخی از قطعات مداری ناهم‌پاسخِ مایکروویو**

اهداف: آشنایی با عناصر مداری ناهم‌پاسخ مایکروویو (ایزولاتور و سیرکولاتور)، اندازه‌گیری ماتریس پراکندگی این عناصر، طراحی سیرکولاتور ۴ پورتی با استفاده از دو Tجادویی

تئوری:

- **ایزولاتورها**

ایزولاتور های مایکروویو که اصطلاحاً خط انتقال یک طرفه هم نامیده می شوند، به گونه‌ای عمل می‌نمایند که عبور موج از طریق آن‌ها در یک جهت با افت خیلی کم (به‌طوری‌که اغلب قابل صرف نظر کردن باشد)، صورت می‌گیرد (این جهت معمولاً با علامت روی ایزولاتور مشخص‌شده است). در خلاف جهت علامت، موج در حین عبور از آن، با افت بسیار زیادی مواجه می‌شود. ایزولاتور ها برای جدا سازی دو منبع موج از یکدیگر و نیز برای جلوگیری از ورود انرژی برگشتی از بار به داخل منبع، مورداستفاده قرار می‌گیرند. ایزولاتورها بر دو نوع هستند، ایزولاتورهای فازی که فارادی هم نامیده می‌شوند وایزولاتورهای جذبی. وجود فریت در داخل موجبر که همراه با یک میدان آهنربایی B_o باشد، سبب می‌شود که یک محیط غیر همگن برای انتشار موج در داخل موجبر به وجود آید. از این خاصیت در ساختمان ایزولاتورها ، سیرکولاتورها و...استفاده می‌شود. انتشار موج در مجاورت فریت که همراه با یک میدان آهنربایی است، قطعاً با پلاریزاسیون دایروی راست‌گرد یا چپ‌گرد خواهد بود. در نتیجه بسته به مقدار، امتداد و جهت میدان آهنربایی دائم، وقتی جهت حرکت موج تغییر کند، ضریب فاز یا ضریب تضعیف موج تغییر می‌کند.

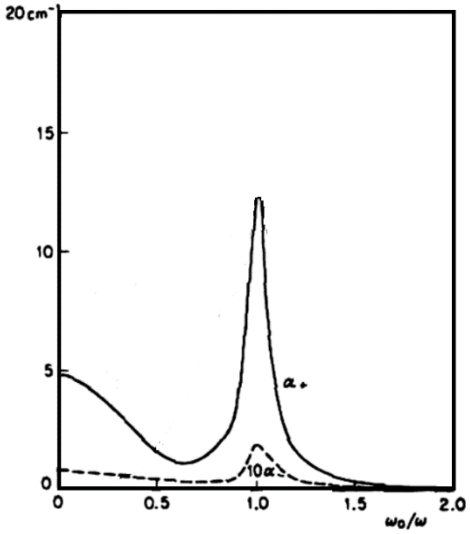
چنانچه موج با پلاریزاسیون دایروی چپ‌گرد در مجاورت فریت حرکت کند، تضعیف موج نا چیز بوده و حتی می‌تواند قابل اغماض باشد، ولی اگر موج با پلاریزاسیون دایروی راست‌گرد در مجاورت فریت منتشر شود، تضعیف بسیار زیادی روی موج به وجود خواهد آمد. البته در این حالت باید امتداد میدان آهنربایی دائم، عمود بر امتداد انتشار موج بوده و شدت میدان آهنربایی نیز، از نظر مقدار آن‌قدر باشد که بتواند فریت را به حالت اشباع برساند. در شکل (۴-۵) تضعیف موج در مجاورت فریت بایاس شده با دو پلاریزاسیون دایروی راست‌گرد و چپ‌گرد، مشاهده می‌شود. منحنی ها به‌طور نسبی رسم شده اند. ازآنجایی که تضعیف موج با پلاریزاسیون دایروی چپ‌گرد در مقایسه با راست‌گرد، بسیار اندک است، لذا منحنی تضعیف آن با مقیاس ده برابر نسبت به منحنی تضعیف راست‌گرد، رسم شده است تا بتوان هر دو منحنی را در یک صفحه رسم و باهم مقایسه نمود. منحنی مربوط به حالتی است که فریت توسط حوزه آهنربایی B_o به حالت اشباع رسیده است. این مشخصه در فریت، اساس ایزولاتورهای جذبی را تشکیل می‌دهد.

-ایزولاتور جذبی

این ایزولاتور یک دو دهنهی است که از یک قطعه موجبر با مقطع مستطیلی تشکیل‌شده است. داخل آن یک تیغه فریت قرارگرفته و توسط یک آهنربای دائم تا حد اشباع بایاس شده است. بنابراین موجی که از سمت منبع از طریق فریت

داخل ایزولاتور، به سمت مصرف‌کننده در حرکت است، باید دارای پلاریزاسیون دایروی چپ‌گرد باشد و به عکس موج برگشتی از بار به سمت منبع موج، دارای پلاریزاسیون دایروی راست‌گرد باشد.

با توجه به مؤلفه های مد اصلی TE ، ملاحظه می‌شود که شرایط لازم برای به وجود آمدن موج با پلاریزاسیون



شکل (۴-۵) ضریب تضعیف موج در مجاورت فریت بایاس شده با دو پلاریزاسیون دایروی راست‌گرد(+α) و چپ‌گرد(-α)

دایروی، از خواص ذاتی این موج در موجبر با مقطع مستطیلی است. مؤلفه های مد اصلی TE بصورت زیر است:

$$H_z = A\cos\left(\frac{\pi}{a}x\right)e^{-j\beta_g z}$$

$$H_x = jA\frac{2a}{\lambda_g}Sin\left(\frac{\pi}{a}x\right)e^{-j\beta_g z}$$

$$E_y = -j\omega\mu\frac{a}{\pi}Sin\left(\frac{\pi}{a}x\right)e^{-j\beta_g z}$$

در روابط فوق مشاهده می‌شودکه H_x و H_z نسبت به هم ۹۰ درجه اختلاف فاز دارند و در امتداد بعد a در دو نقطه، از نظر دامنه باهم برابرند. اگر این نقاط را با x_1 مشخص کنیم، مقدار آن را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$\tan\frac{\pi}{a}x_1 = +_-\frac{\lambda_g}{2a}$$

لذا در امتداد محور x ها، بین 0 تا a دو جواب به دست می‌آید:

$$\frac{H_x}{H_z} = j \qquad 0 < x_1 < \frac{a}{2}$$

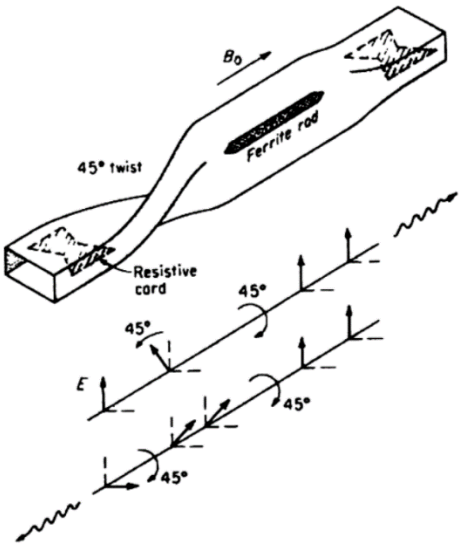
$$\frac{H_x}{H_z} = -j \qquad \frac{a}{2} < x_1 < a$$

حالت اول مربوط به موج با پلاریزاسیون دایروی راست‌گرد است که در جهت منفی محور z ها حرکت می‌کند، قسمت دوم مربوط به موج با پلاریزاسیون دایروی چپ‌گرد است که در جهت مثبت محور z ها در حرکت است. با تغییر جهت حرکت موج، جهت پلاریزاسیون آن نیز عوض می‌شود. در باند x معمولاً افت موج در جهت مستقیم تقریباً برابر۰/۱ dB/cm ودر جهت برگشت، حدود ۱۰ dB/cm است.

-ایزولاتور فازی

یک دو دهنهی است و در سمت ورودی از یک موجبر با مقطع مستطیلی تشکیل‌شده و دارای یک پیچش (twist) ۴۵ درجه است که ورودی یا دهنه ۱ ایزولاتور را تشکیل می‌دهد. درادامه این قسمت، یک موجبر استوانه ای با مقطع دایروی است و داخل آن یک میله نسبتاً باریک فریت قرارداده‌شده که توسط یک میدان آهنربایی دائم B_0 بایاس می‌شود. این قسمت هم طبق شکل(۴-۶) منتهی به یک موجبر با مقطع مستطیلی می‌شود به‌طوری‌که ابعاد متناظر مقطع آن، موازی با موجبر ورودی باشد. این قسمت منتهی به خروجی شده و دهنه ۲ ایزولاتور را تشکیل می‌دهد.

موج ورودی با پلاریزاسیون عمودی از دهنه ۱ وارد می‌شود. پلاریزاسیون این موج توسط پیچش به اندازه ۴۵ درجه نسبت به محور x ها در جهت عکس عقربه‌های ساعت می‌چرخد. در داخل موجبر استوانه‌ای وجود فریت و جهت بایاس آن، سبب می‌شود که پلاریزاسیون موج به اندازه ۴۵ درجه در جهت عقربه‌های ساعت چرخیده و باهمان پلاریزاسیون عمودی به خروجی (دهنه۲) برسد. در مورد موج برگشتی (از بار) ابتدا پلاریزاسیون توسط فریت به اندازه ۴۵ درجه در جهت عقربه های ساعت می‌چرخد و توسط پیچش نیز به اندازه ۴۵ درجه در جهت حرکت عقربه‌های ساعت می‌چرخد. درنتیجه موج برگشتی با پلاریزاسیون افقی به دهنه ۱ ایزولاتور می‌رسد و در آنجا توسط تیغه جاذب الکترومغناطیسی - که صفحه آن به‌صورت افقی است - جذب می‌شود. شکل(۴-۶)



شکل(۴-۶) یک نمونه ایزولاتور فازی

شرح آزمایش:

تعیین ضریب ایزولاسیون و افت عبوری ایزولاتور جذبی:

برای تعیین ضریب ایزولاسیون، ابتدا ایزولاتور را طوری در مدار قرار می‌دهیم که موج از دهنه ۲ آن وارد و از دهنه ۱ - که دیود قرار دارد، خارج شود (درجهت عکس فلش). در این حالت بهتر است عقربه تضعیف‌کننده مدرج روی 0dB باشد. عقربه نشان‌دهنده را با انجام تنظیمات لازم روی عدد مشخصی مثلاً 3dB قرار می‌دهیم. دیود را از دهنه ۱ ایزولاتور باز کرده و مستقیماً به انتهای مدار می‌بندیم. با استفاده از تضعیف‌کننده مدرج و در صورت نیاز ورودی ۱، عقربه نشان‌دهنده را به حالت قبل می‌آوریم. تضعیف بر حسب dB ضریب ایزولاسیون ایزولاتور خواهد بود.

برای تعیین افت عبوری ایزولاتور، آن را طوری در مدار قرار می‌دهیم که موج از دهنه ۱ به آن وارد و از دهنه ۲ - که دیود بسته شده - خارج شود و مانند حالت قبل ادامه می‌دهیم. تضعیف به‌دست‌آمده بر حسب dB برابر افت عبوری ایزولاتور خواهد بود. مقادیر به‌دست‌آمده را در جدول (۴- ۲) یادداشت نمایید. (استفاده از کوپلر جهتی، خطای اندازه‌گیری را کمتر خواهد کرد.)

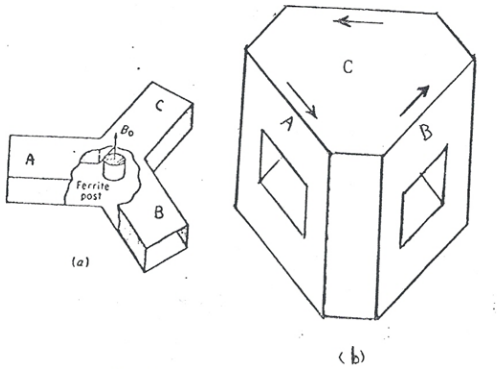
جدول(۴-۲) مشخصات ایزولاتور

مقدار برحسب dB	
	ضریب ایزولاسیون
	افت عبوری

- سیرکولاتور، تعیین ضرایب ایزولاسیون و افت عبوری بین دهنه‌ها

-تئوری:

سیرکولاتورها که به‌صورت چهار دهنهی و یا اغلب سه دهنهی هستند، در قدرت های پایین و متوسط، کار دوپلکسرها را هم انجام می دهند. لذا به سیستم های فرستنده گیرنده امکان می‌دهند که به‌صورت دوپلکس عمل نمایند. در شکل(۴- ۷) دو نوع سیرکولاتور سه دهنهی نوع موج‌بری مشاهده می‌شود. در شکل (۴- ۷ b) جهت حرکت موج با فلش مشخص‌شده است. حرکت موج در جهت فلش با تضعیف بسیار نا چیز انجام می‌شود و در خلاف جهت آن، با تضعیف بسیار زیادی مواجه است. به‌عنوان مثال موجی که از دهنه A وارد می‌شود، با تضعیف کم از قطب B خارج می‌شود ولی مقدارخروجی از دهنه C ، همراه با تضعیف بسیار زیاد خواهد بود. لذا می گوییم دهنه C از دهنه A ایزوله است.



شکل(۴-۷) دو نمونه سیرکولاتور سه دهنه

ضرایب ایزولاسیون و افت عبوری بین دهنه‌های سیرکولاتور را به کمک اجزای ماتریس پراکندگی آن، مشخص می‌کنیم. در شکل (۴ -۷) حروف A ، B ، C که دهنه‌های سیرکولاتور سه دهنهی را مشخص می کنند به ترتیب متناظر با اعداد ۱ ، ۲ ، ۳ ، هستند.

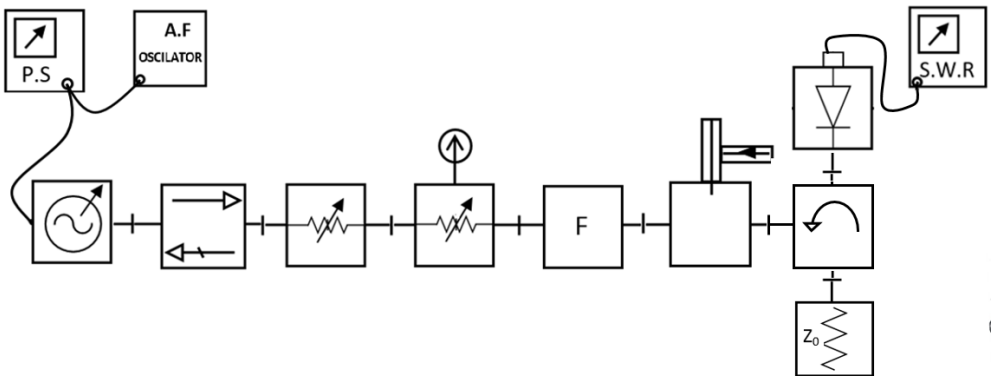
شرح آزمایش:

همان‌طور که قبلاً اشاره شد برای تعیین ضرایب ایزولاسیون و افت عبوری ایزولاتور، مقادیر عناصر ماتریس پراکندگی آن را مشخص می‌کنیم.

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix}$$

مداری مطابق شکل (۴-۸) که شامل سیرکولاتور است، در نظر می‌گیریم. برای سهولت در بستن سیرکولاتور به مدار، می‌توان در هر یک از دهنه‌ها از یک قطعه موج‌بر ساده استفاده کرد. درصورتی‌که طول قطعات موج‌بری کوچک باشد، این کار تاثیری در مقدار دامنه عناصر ماتریس پراکندگی نخواهد داشت و اثر آن فقط در فاز خواهد بود. سیرکولاتور را طوری در مدار قرار می‌دهیم که به ترتیب ابتدا دهنه A یا (۱) ورودی باشد و نسبت خروجی دو دهنه دیگر را به ورودی دهنه ۱ مشخص می‌کنیم. سپس دهنه ورودی را عوض کرده و به همین ترتیب ادامه می‌دهیم تا مقدار عناصر ماتریس

پراکندگی سیرکولاتور مشخص شود. سپس با استفاده از ماتریس پراکندگی، مقادیر ایزولاسیون وافت عبوری بین دهنه-های سیرکولاتور را به دست آورده و در جدول (۴-۳) ثبت نمایید.



شکل(۴-۸)ست-آپ لازم برای بررسی مشخصات سیرکولاتور

جدول(۴-۳) مشخصات سیرکولاتور سه دهنه

ورودی از	تنظیم ورودی ۱ نشان‌دهنده	مبنای عقربه نشان‌دهنده	مقدار کل تضعیف	ضریب ایزولاسیون بین دهنه‌های	افت عبوری بین دهنه‌های
(1) A					
(2) B					
(3) C					

طراحی آزمایش: سیرکولاتور ۴ دهنه:

با استفاده از دو T جادویی و یک تغییر دهنده فاز π درجه یک طرفه، یک سیرکولاتور ۴ دهنه طراحی کنید.

فصل پنجم

قطعات فعال مایکروویو

بررسی مشخصات و اندازه‌گیری قدرت خروجی

۱- نوسان‌ساز کلایستررون بازتابی

۲- نوسان‌ساز گان

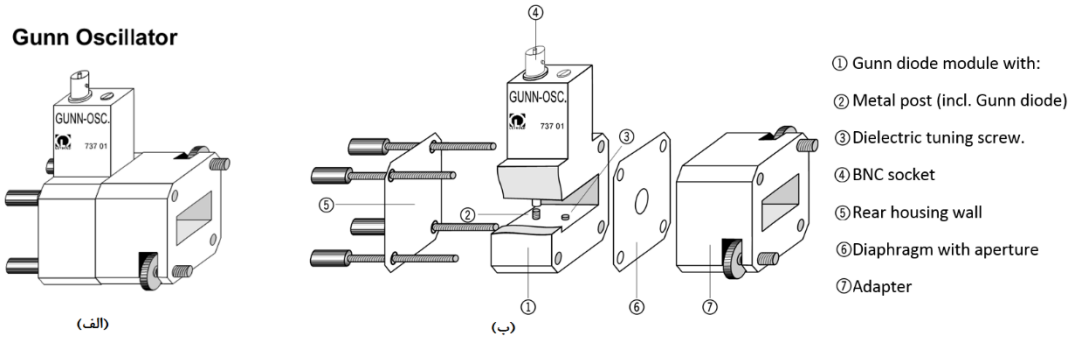
آزمایش یازدهم

موضوع: **اندازه‌گیری قدرت خروجی نوسان‌سازهای مایکروویو**

اهداف:آشنایی با نوسان‌ساز گان،آشنایی با ترمیستور، اندازه‌گیری قدرت خروجی به روش بولومتری، اندازه‌گیری توان متوسط و ماکزیمم مقدار توان

- **تئوری:**
- **نوسان‌ساز گان**

توجه: ساختمان و تئوری نوسان‌ساز گان در فصل اول به‌صورت کامل شرح داده‌شده است. شکل(۵-۱) شکل ظاهری یک نوسان‌ساز گان(الف) و اجزای آن را (ب) نشان می‌دهد.



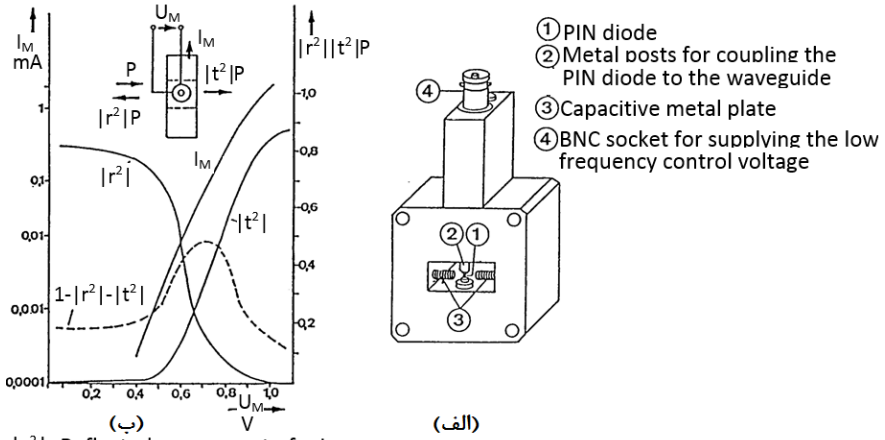
شکل(۵-۱) (الف) شکل ظاهری یک نوسان‌سازگان. (ب) اجزای نوسان‌سازگان

تغییر و تنظیم فرکانس در نوسان‌ساز گان در صورت امکان با جابجایی صفحه اتصال کوتاه انتهایی محفظه تشدید انجام می‌پذیرد یا از یک قطعه دی‌الکتریک استوانه‌ای که به‌صورت پیچ بتواند طول آن در داخل محفظه تغییر کند استفاده می‌شود و یا همراه با نوسان‌ساز گان از یک دیود ورکتور که به‌صورت یک خازن متغییر در مدار ظاهر می‌شود استفاده به عمل می‌آید. دیود ورکتور داخل یک قطعه موجبر که به‌صورت یک دودهنه درآمده قراردادهشده و به‌وسیله یک ولتاژ منفی از طریق منبع تغذیه بایاس می‌شود و قبل از نوسان‌ساز در مدار قرار می‌گیرد. برای انجام مدولاسیون در نوسان‌ساز گان از پین مدولاتور استفاده می‌شود.

پین مدولاتور: یکی از ادوات مایکروویو است که برای مدوله کردن سیگنال‌های مایکروویو به‌صورت مدولاسیون دامنه مورداستفاده قرار می‌گیرد. قسمت اصلی این قطعه دیود پین است که داخل یک قطعه موجبر سوار شده است و قطعه حاصل طبق شکل(۵-۲) به‌صورت دودهنه مایکروویو در آمده است. این قطعه در مسیر موج قرار می‌گیرد و تغییر امپدانس دیود در اثر تغییر ولتاژ بایاس آن سبب می‌شود که دیود مانند یک سوئیچ قطع و وصل عمل نماید. بنابراین P قدرت مایکروویو را که به مدولاتور می‌رسد به سه قسمت می‌توان تقسیم کرد، عبوری، برگشتی و $P(1-t^2-r^2)$ قسمت باقیمانده که طبق منحنی شکل(۵-۲) در مدولاتور به‌صورت حرارت تلف می‌شود.

برای بایاس دیود و کنترل شکل خروجی مایکروویو از پالس‌های مربعی با سیکل کاری $t/T=$ ۰/۵ و فرکانس‌های ۱/۵تا ۱۵ کیلوهرتز با دامنه ۵ ولت استفاده می‌شود. در حالت عبور(حداکثر دامنه پالس) مقدار t^2 برابر ۰/۸۳ یا بیشتر و در حالتی که دامنه پالس صفر است حدود ۰/۰۱خواهد بود در این حالت مقدار r^2 در حدود ۰/۸۳ می‌شود و مقدار t^2 به حدود

۰/۰۱ یا کوچک‌تر می‌رسد. درنتیجه خروجی مایکروویو به ریتم پالس‌های بایاس کننده دیود به‌صورت پالس‌های مربعی و بدون تغییرات فرکانسی خواهد شد. به‌منظور محافظت از منبع نوسان‌ساز مایکروویو از موج برگشتی استفاده از یک ایزولاتور در مدار الزامی به نظر می‌رسد.



$|r^2|$: Reflected component of microwave power
$|t^2|$: Transmitted component of microwave power
$1-|r^2|-|t^2|$: Absorbed component of microwave power

شکل(۵-۲) (الف) شکل ظاهری یک پین مدولاتور، (ب) مقادیر توان عبوری، برگشتی و تلف‌شده در پین مدولاتور

اندازه‌گیری قدرت به روش بولومتری

بر حسب مقدار قدرت، روش‌های متفاوتی برای اندازه‌گیری قدرت مایکروویو معمول است. در مواقعی که مقدار قدرت کم و در حدود چند میلی وات باشد، اندازه‌گیری به روش بولومتری انجام می‌گیرد. بولومتر جزئی از مدار اندازه‌گیری است که آلیاژی است که مقاومت آن با تغییر درجه حرارت، تغییر می‌کند.

در اندازه‌گیری قدرت به روش بولومتری، از دو نوع بولومتر مختلف استفاده می شود: باریتر و ترمیستور

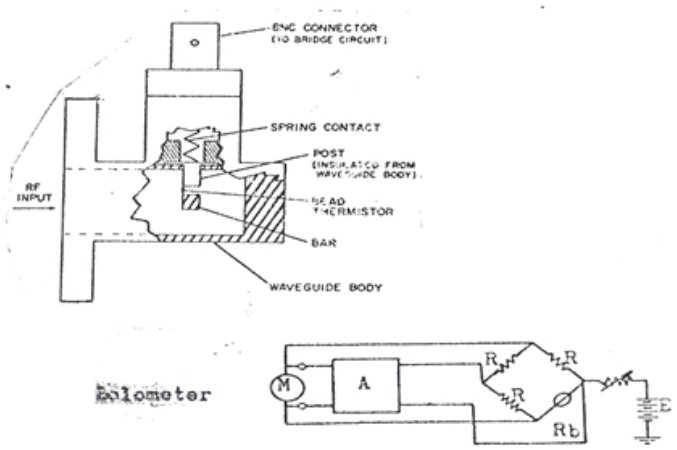
باریتر که ضریب مقاومتی آن مثبت است، با ازدیاد درجه حرارت، مقاومت اهمی آن افزایش می یابد.

ترمیستور که ضریب مقاومتی آن منفی است، با افزایش درجه حرارت، مقدار مقاومت اهمی آن کم می‌شود. جنس آن، آلیاژی است که از ترکیب اکسید فلز نظیر نیکل و منگان با یک نیمه هادی حاصل می‌شود و به‌صورت یک سیم بسیار نازک که در لایه خمیری نیمه هادی قرار گرفته است، به دست می‌آید.

تغییر مقاومت در اثر تغییر درجه حرارت در ترمیستور به مراتب بیشتر از باریتر است؛ به‌طوری‌که به ازای چهار میلی وات قدرت اعمال شده به بولومتر، تغییر مقاومت ترمیستور برابر ۳۵۰ اهم (از ۵۷۰ اهم به ۲۲۰ اهم) است. درصورتی‌که این تغییر در مورد باریتر فقط ۲۳ اهم بوده است. لذا حساسیت ترمیستور خیلی بیشتر از باریتر است و حرارت محیط به آسانی روی آن اثر می گذارد. حتی از تماس مستقیم دست با آن باید جلوگیری نمود. بولومتر داخل قطعه ای از موجبر که در انتها اتصال کوتاه شده و بولومتر مانت نامیده می‌شود، قرار گرفته است (شکل (۵ -۳)) تا هم محافظ خوبی در مقابل حرکات شدید باشد و هم با استفاده از یک تطبیق کننده پله ای (چند طبقه یک‌چهارم موج) ضریب موج ساکن آن به حداقل برسد.

قطعه‌ای که ترمیستور داخل آن قرار دارد، باید دارای جرم مخصوص زیادی باشد تا تغییرات جزئی حرارت محیط بر ترمیستور تأثیر گذار نباشد. در این آزمایش اندازه‌گیری قدرت مایکروویو با استفاده از میلی واتمتر و به کمک یک پل خودکار انجام می‌شود. ترمیستور به‌صورت مقاومت یک شاخه پل به کار رفته است (مجموع واتمتر و ترمیستور را پل می‌گوییم). مقاومت های سه شاخه دیگر پل، در داخل دستگاه قدرت سنج قرار دارند که با اتصال ترمیستور به قدرت

سنج، مدار پل تکمیل می‌شود. توسط دستگاه قدرت سنج ولتاژهای DC و AC با فرکانس ده کیلو هرتز، به پل داده می‌شود.



شکل (۵-۳) ترمیستور و پلِ مقاومتی داخل دستگاه اندازه‌گیری توآن‌که ترمیستور مقاومت یک شاخه آن می‌باشد.

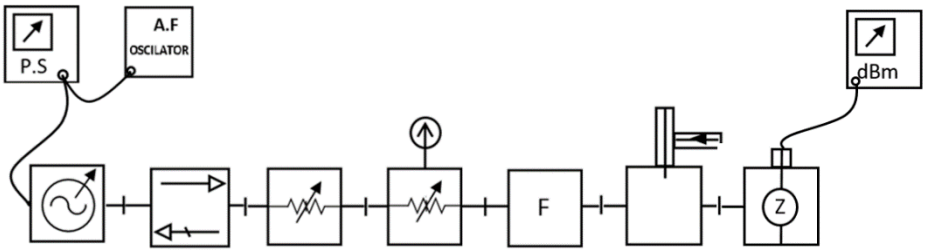
ابتدا قبل از اعمال انرژی مایکروویو، با استفاده از ولوم ZERO ADJ ، ولتاژ DC را تغییر می‌دهیم تا عقربه دستگاه قدرت سنج روی صفر mW قرار گیرد. در این حالت اگر انرژی مایکروویو به ترمیستور بتابد، مقدار انرژی ده کیلو هرتز به‌صورت خودکار طوری کاهش پیدا می‌کند که کل قدرت تلف شده در ترمیستور، ثابت بماند. در این حالت عقربه قدرت سنج، مقدار توان دریافت شده را از منبع ده کیلو هرتزی، به ترمیستور نشان می‌دهد که مساوی قدرت مایکروویو است. با توجه به این‌که ترمیستور و قدرت سنج مورداستفاده در آزمایشگاه، حداکثر تا ۱۰ میلی وات قدرت را می‌توانند اندازه‌گیری نمایند. اعمال توآن‌های بیشتر باعث سوختن و یا تغییر مشخصات آن‌ها می‌شود. از طرفی توان خروجی منابع مایکروویو مورداستفاده در آزمایشگاه، ممکن است به بیش از ۲۰ میلی وات هم برسد. استفاده از تضعیف‌کننده مدرج به‌طوری‌که همواره توان رسیده به ترمیستور را زیر ۱۰ میلی وات نگه دارد، ضروری است.

در این حالت اگر تمام قدرت رسیده به ترمیستور، در آن جذب شود (حالت تطبیق) ، مقدار توانی که توسط قدرت سنج نشان داده می‌شود، مشخص‌کننده توان خارج‌شده از تضعیف‌کننده است. برای تعیین مقدار کل قدرت باید مقدار تضعیف را نیز در نظر گرفت. برای توسعه میدان عمل اندازه‌گیری قدرت مایکروویو، علاوه بر استفاده از تضعیف‌کننده مدرج در قدرت های بالاتر، از نمونه‌بردارهای توجیهی نیز استفاده می‌شود.

شرح آزمایش:

-اندازه‌گیری قدرت خروجی کلایسترون

مداری مطابق شکل (۵-۴) ترتیب دهید.



شکل (۵-۴)ست-آپ لازم برای اندازه‌گیری توان خروجی کلایسترون

توجه داشته باشید هرگز پیچ های ترمیستور را باز و بسته نکنید، زیرا باعث قطع المان بسیار نازک آن و در نتیجه از بین رفتن ترمیستور می‌شود.

یکی از مد های کلایسترون را که دارای بیشترین خروجی است (مثلاً مد ۱) ، با استفاده از وات متر رسم کرده و ازآنجا حداکثر قدرت خروجی لامپ کلایسترون را مشخص کنید .

- طول پروب خط شکاف دار را صفر نمایید تا در اندازه‌گیری تاثیری نداشته باشد .
- تضعیف‌کننده مدرج را در حدود dB ۱۰ تنظیم نموده و تضغیف کننده غیر مدرج را از مدار حذف نمایید.
- کلید منبع تغذیه کلایسترون را به حالت HEATER و کلید مدولاسیون را به حالت EXT قراردهید.
- قدرت سنج را روشن نمایید و پس از تنظیم صفر قدرت سنج، کلید منبع تغذیه کلایسترون را به حالت ON قرار دهید. در صورت لزوم ولتاژ رفلکتور را طوری تنظیم نمایید که عقربه قدرت سنج بیشترین انحراف ممکن را داشته باشد و قدرت سنج مقداری در حدود ۸ یا ۹ میلی وات نشان دهد. این مقدار، ولتاژ رفلکتور و مقدار تضعیف را در ردیف دوم جدول یادداشت نمایید .
- با ثابت بودن همه شرایط، ولتاژ رفلکتور را کاهش دهید تا عقربه، مقدار یک میلی وات نشان دهد. این مقادیر را در ردیف اول جدول یادداشت نمایید.
- همین عمل را برای حالتی که با افزایش ولتاژ رفلکتور، عقربه یک میلی وات را نشان می دهد، انجام داده و مقادیر به‌دست‌آمده را در ردیف ۳ جدول (۵-۱) ثبت نمایید.
- با فرض این‌که ترمیستور به خط انتقال موجبری تطبیق بوده و ضریب انعکاس آن صفر است، به کمک روابط زیر قدرت خروجی کلایسترون را بر حسب میلی وات و dBm به دست آورده و جدول (۵-۱) را کامل نمایید. همچنین پهنای باند به ازای 3dB افت را در این مد مشخص کنید.

$$P_r = 0$$

$$P_t(mw) = P_m \log^{-1} \frac{\alpha(dB)}{10}$$

$$10\log P_t(mw) = 10\log P_m(mw) + \alpha(dB)$$

$$P_m = Pmeter$$

$$P_t = Ptotal$$

با توجه به تعریف dBm می‌توان نوشت:

$$dBm = 10 \log (P/1mw)$$

لذا مقدار کل قدرت بر حسب dBm به‌صورت زیر درمی‌آید:

$$P_t(dBm) = P_m(dBm) + \alpha(dB)$$

به کمک جدول (۵ -۱)منحنی تقریبی تغییرات قدرت خروجی کلایسترون را بر حسب تغییرات ولتاژ رفلکتور مربوط به مد موردنظر، رسم نمایید. پهنای باند به ازای dB ۳ افت و حداکثر قدرت خروجی کلایسترون را مشخص کنید. با استفاده ازضریب تصحیح قدرت، مقدار اندازه‌گیری شده را تصحیح نمایید.

ضریب تصحیح قدرت : ابتدا فرض کردیم که تمامی قدرت تولید شده توسط منبع، بعد از گذشتن از تضعیف‌کننده در ترمیستور جذب شده و قدرت برگشتی صفر است. اما باید مقدار VSWR ترمیستور را اندازه‌گیری نمود. در صورت

قابل‌ملاحظه بودن آن، ضریب انعکاس را به دست آورده و با استفاده از رابطه ضریب تصحیح قدرت اندازه‌گیری شده، مقدار آن را به دست آورد.

جدول (۵-۱) مقادیر توان کلایسترون به ازای مقادیر مختلف ولتاژ کلایسترون

ردیف	ولتاژرفلکتور v	Pmeter mw	Pmeter dBm	مقدارتضعیف dB	Pt mw	Pt dBm
۱						
۲						
۳						

$$P_{am} = P^{+} - P^{-} = P^{+}(1-\rho^2)$$

$$P^{+} = P_{am}(\frac{1}{1-\rho^2})$$

در رابطه دوم P^{+} قدرت منبع ، P_{am} مقدار قدرت اندازه‌گیری شده که همان P_t است و داخل پرانتز ضریب تصحیح قدرت نامیده می‌شود.

-اندازه‌گیری قدرت خروجی نوسان‌ساز گان

برای اندازه‌گیری قدرت خروجی نوسان‌ساز گان، می‌توانیم کلایسترون را از ابتدای مدار باز کرده و نوسان‌ساز گان را در مدار قراردهیم. این نوسان‌ساز بایستی توسط منبع تغذیه GUNN بایاس شود.

برای این کار ابتدا منبع تغذیه گان را روشن کنید و خروجی (OUT) مربوط به GUNN را به نوسان‌ساز وصل نموده و مقدار ولتاژ بایاس را طوری تغییر دهید که خروجی نوسان‌ساز حداکثر مقدار خود را داشته باشد. در این حالت قدرت خروجی آن را با روش قبل اندازه‌گیری نموده و مقادیر به‌دست‌آمده را در جدول شماره (۵-۲) ثبت کنید. فرکانس را هم یادداشت نمایید.

جدول(۵-۲) توان خروجی نوسان‌ساز گان

نوسان‌ساز گان	Pmeter (mw)	Pmeter (dBm)	مقدار تضعیف dB	P total (mw)	P total dBm

- تعیین مقدار قدرت در مدولاسیون پالسی

-تئوری:

آزمایش قبلی مربوط به یک موج مدوله نشده یا CW بود. اگر انرژی مایکروویو مدوله‌شده باشد، عقربه قدرت سنج به میزان متوسط قدرت در یک سیکل از موج مدوله‌کننده، منحرف خواهد شد.

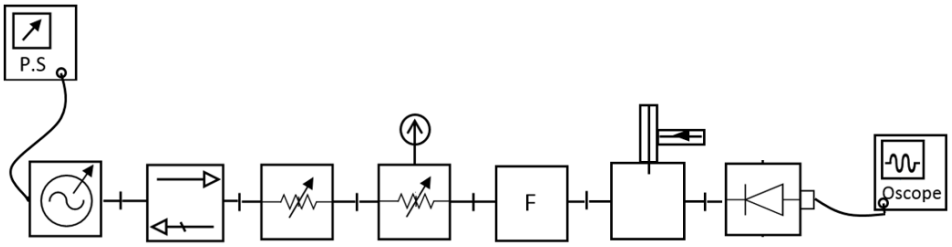
در حالت خاص که مدولاسیون پالسی باشد، منبع در یک فاصله زمانی مشخص t با دامنه و فرکانس ثابت، نوسان می‌کند و دارای قدرت مشخصی است که اصطلاحاً آن را قدرت پیک نامیده و با P_p نمایش می‌دهند. در فاصله زمانی دیگر (T-

(t قدرت خروجی منبع صفر می‌شود. در حالت اندازه‌گیری قدرت، انحراف عقربه قدرت سنج به اندازه متوسط قدرت در یک پریود T خواهد بود که اصطلاحاً آن را قدرت معدل می نامند و با P_{av} نمایش می‌دهند($P_{av} = P_m$).
با اندازه‌گیری P_{av} توسط قدرت سنج و تعیین نسبت t/T توسط اسیلوسکوپ، می‌توان مقدار قدرت پیک (P_p) را محاسبه نمود.

$$P_p = \frac{P_m}{t/T} \log^{-1} \frac{\alpha(dB)}{10}$$

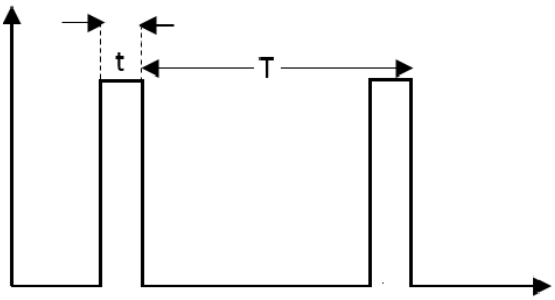
شرح آزمایش:

-مداری مطابق شکل (۵-۵) ترتیب دهید و کلید منبع تغذیه کلایستررون را به حالت EXT قرار دهید.



شکل(۵-۵) ست-آپِ لازم برای خروجی گرفتن از کلایستررون

پس از انجام تنظیمات لازم، با استفاده از یک فانکشن ژنراتور، منبع را از خارج طوری مدوله نمایید که موج مدوله‌شده به‌صورت شکل (۵-۶) دربیاید. به کمک اسیلوسکوپ، مقدار t و مقدار T را مشخص کرده و نسبت آن‌ها را به دست آورید. مقادیر به‌دست‌آمده را در جدول (۵-۳) ثبت نمایید.



شکل (۵-۶) پالس مربعی غیریکنواخت با دوره تناوب T

با استفاده از مدار شکل (۵-۵)، مقدار قدرت معدل ($P_{av}=P_m$) را مانند حالت قبل اندازه‌گیری کنید. در همین حالت VSWR مربوط به ترمیستور را نیز اندازه‌گیری کنید و با استفاده از رابطه زیر،
مقدار ضریب انعکاس را مشخص نمایید .

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

مقادیر به‌دست‌آمده را در جدول شماره (۵-۳)وارد نمایید.

جدول (۵-۳) توان ماکزیمم، متوسط، ماکزیمم توان با مدوله کردن سیگنال خروجی کلایسترون و اعمال ضریب تصحیح توان

P_t (p) (mw)	P_t (av) (mw)	VSWR	مقدار تضعیف	P_m (av) mw	t/T

با استفاده از مقادیر جدول (۵-۳) ، مقدار عددی قدرت پیک (P_p) را مشخص نمایید.

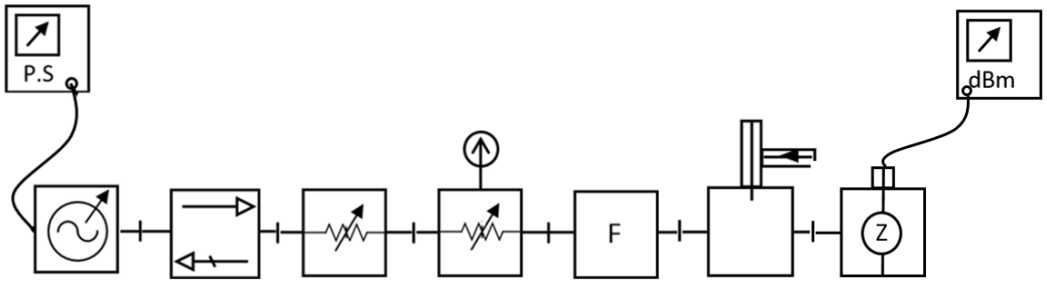
-رسم منحنی یک تضعیف‌کننده مدرج توسط قدرت سنج

هدف: رسم منحنی تضعیفِ یک تضعیف‌کننده مدرج است به‌طوری‌که بتوان مقدار تضعیف را با استفاده از درجه‌بندی آن، بر حسب دسی بل مشخص کرد و بعد منحنی به‌دست‌آمده را با منحنی مربوط به تضعیف‌کننده مدرج که در آزمایشگاه از آن استفاده می‌شود، مقایسه نمود.

البته در این روش چون از میلی وات‌متر و ترمیستور استفاده می‌شود لذا با توجه به محدودیت دامنه عملکرد میلی وات متر وترمیستور، مقدار تضعیف حاصل از منحنی به‌دست‌آمده حد اکثر از 13 dB تجاوز نخواهد کرد.

ضمناً برای کنترل توان خروجی منبع مایکروویو، استفاده از یک تضعیف‌کننده دیگر همراه با تضعیف‌کننده مزبور که می‌تواند غیر مدرج هم باشد، ضروری است.

مداری مانند شکل (۵-۷) که در آن قبل از تضعیف‌کننده مدرج، یک تضعیف‌کننده غیر مدرج هم منظور شده است، ترتیب دهید. در آن تنظیمات لازم را طوری انجام دهید که خروجی منبع مایکروویو یک موج پیوسته (cw) و بدون مدولاسیون باشد. مواظب باشید مقدار قدرتی که به ترمیستور می رسد، بیشتر از ده میلی وات نباشد. به آهستگی با زیاد کردن مقدار تضعیف حاصل از تضعیف‌کننده غیر مدرج، عقربه میلی وات متر را در حالتی که درجه تضعیف کتتده مدرج را صفر کرده اید، روی dBm ۱۰ تنظیم نمایید.



شکل (۵-۷) ست-آپ لازم برای اندازه‌گیری توان

مطابق جدول (۵-۴) درجه تضعیف‌کننده مدرج را قدم به قدم تغییر دهید و هر بار مقدار قدرتی را که عقربه میلی وات متر بر حسب dBm نشان می‌دهد، در جدول (۵-۴) یادداشت نمایید.

جدول شماره(۵-۴) توان اندازه‌گیری شده به ازای مقادیر مختلف تضعیف، توسط تضعیف‌کننده مدرج

درجه تضعیف-کننده	۰	۰/۳	۰/۶	۰/۹	۱/۲	۱/۵	۱/۸	۲/۱
P(dBm)								
dB=10-P								

مقادیر مربوط به ردیف سوم جدول را به دست آورده در جدول ثبت نمایید تا جدول مزبور کامل شود.

با استفاده از جدول، منحنی تضعیف را بر حسب درجه‌بندی تضعیف‌کننده در کاغذ مدرج میلی‌متری با مقیاس مناسب رسم کنید و آن را با منحنی مربوط به تضعیف‌کننده مدرج مقایسه نمایید.

سؤال

۱- در اندازه‌گیری ضریب موج ساکن ترمیستور، اگر کابل ترمیستور را از قدرت سنج جدا کنیم، مقدار عددی VSWR اندازه‌گیری شده مقدار واقعی خواهد بود یا نه؟

۲- اندازه‌گیری قدرت کلایسترون در چه فرکانسی انجام شده و حداکثر قدرت خروجی آن چقدر است؟

۳- اندازه‌گیری قدرت خروجی نوسان‌ساز گان در چه فرکانسی بوده و مقدار آن چقدر است؟

فصل ششم

بررسی و کار برد آنتن‌ها و برخی دیگر از عناصر مداری در یک ارتباط فرستنده و گیرنده مایکروویو

آزمایش دوازدهم

موضوع: اندازه‌گیری مشخصات عناصر مداری در یک ارتباط فرستنده و گیرنده رادیویی

اهداف: آشنایی با نحوه اندازه‌گیری بهره آنتن به روش‌های مختلف، آشنایی با یک نمونه کاربرد عملی سیرکولاتور در مدارات فرستنده و گیرنده

-تئوری:

در آزمایش دوم عملکرد آنتن بوقی توضیح داده شد و سپس الگوی تشعشعی آن اندازه‌گیری شد. در این آزمایش سایر مشخصات این آنتن بررسی می‌شود.

اندازه‌گیری بهره[۱۲] آنتن

بهره آنتن، مشخص‌کننده خاصیت توجیهی آنتن است که بهره توجیهی هم نامیده می‌شود. بهره آنتن نسبت به آنتن ایزوتروپیک سنجیده می‌شود ولی بر حسب مورد، گاهی آن را نسبت به آنتن دی پل و یا دهانه باز موج‌بر هم می سنجند. در حالت کلی بهره آنتن بستگی به زاویه دارد ولی عملاً اندازه‌گیری بهره در جهتی انجام می‌گیرد که در آن جهت، آنتن حداکثر مقدار بهره خود را دارد. بهره آنتن را معمولاً در اطاق های بدون انعکاس و یا در فضای آزاد اندازه می‌گیرند. رابطه FRIIS برای قدرت دریافتی آنتن گیرنده از فرستنده در فضای آزاد به‌صورت زیر است:

$$P_r = P_t G_t G_r (\frac{\lambda}{4\pi R})^2$$

در رابطه P_r مقدار قدرتی است که توسط آنتن گیرنده دریافت می‌شود و P_t مقدار قدرت ورودی آنتن فرستنده است. G_t و G_r حداکثر بهره آنتن‌های فرستنده و گیرنده در جهت یکدیگر هستند. R فاصله بین مرکز فاز آنتن فرستنده تا مرکز فاز آنتن گیرنده است باید طوری انتخاب شود که قدرت دریافتی آنتن گیرنده فقط در حوزه تشعشعی باشد.

از رابطه FRIIS برای تعیین بهره دو عدد آنتن کاملاً مشابه، که یکی از آن‌ها را به‌عنوان آنتن فرستنده و دیگری را به‌صورت گیرنده در نظر گرفتیم، استفاده می‌کنیم. پس $G_t = G_r = G$ لذا رابطه به‌صورت رابطه زیر در می‌آید.

$$G^2 = \frac{P_r}{P_t}(\frac{4\pi R}{\lambda})^2$$

در مایکروویو اغلب گین آنتن‌ها زیاد است و معمولاً آن را به‌صورت لگاریتمی مشخص می‌کنند. لذا رابطه فوق را به‌صورت زیر می نویسیم:

$$G_{dB} = 10\log(\frac{4\pi R}{\lambda}) - \frac{1}{2}(10\log\frac{P_t}{P_r})$$

با داشتن مقدار R و طول‌موج فضای آزاد، می‌توان جمله اول گین آنتن‌ها را به دست آورد. لذا باید مقدار جمله دوم را مشخص کنیم.

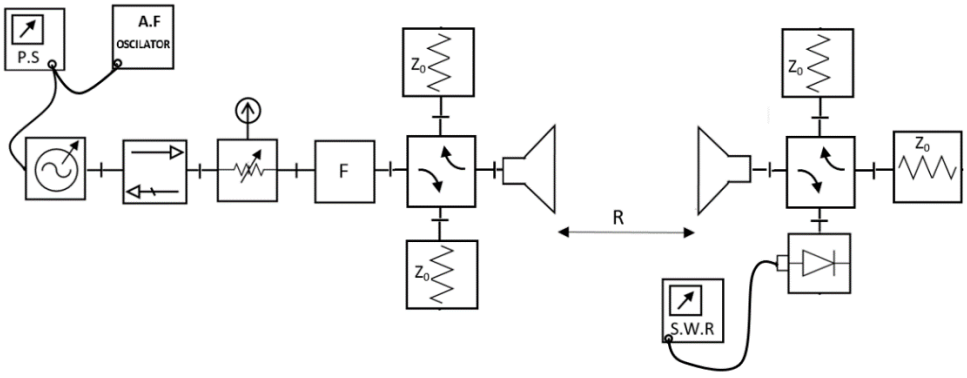
-شرح آزمایش:

- مداری مطابق شکل (۶ -۱) ببندید. آنتن‌های فرستنده گیرنده را کاملاً در امتداد هم قرار دهید و مقدار R را حداقل ۷۰ سانتی متر انتخاب نمایید. برای کم کردن خطای اندازه‌گیری، تا آنجا که ممکن است اشیا و موانع را از مسیر انتشار

---

[۱۲] Gain

موج و اطراف آنتن‌ها دور نمایید. تنظیمات اولیه را طوری انجام دهید که خروجی فرستنده یک موج مدوله‌شده مربعی با فرکانس یک کیلو سیکل و با حداکثر دامنه باشد. درعین‌حال بعد از تنظیمات لازم، با استفاده از تضعیف‌کننده‌ها سعی کنید که تشعشع آنتن فرستنده، بیش‌ازحد لازم نباشد و از نگاه کردن به داخل آنتن فرستنده جداً خودداری نمایید تا امواج مایکروویو اثر نامطلوبی برای شما نداشته باشد.

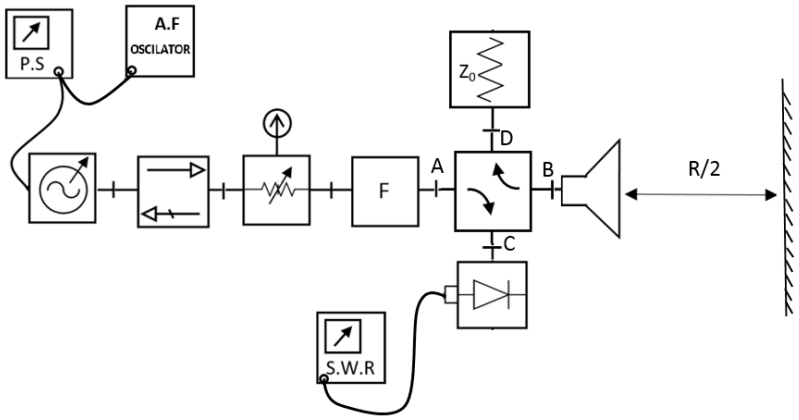


شکل(۶-۱) ست-آپِ لازم برای اندازه‌گیری بهره آنتن

به کمک تضعیف‌کننده مدرج مقدار $10\ logP_t/P_r$ را اندازه‌گیری نمایید. سپس با اندازه‌گیری فرکانس، طول‌موج فضای آزاد را محاسبه نمایید و R فاصله بین مرکز فاز دو آنتن را نیز با استفاده از خط کش مدرج به‌طور دقیق اندازه‌گیری کرده و مقادیر به‌دست‌آمده را در رابطه فوق قرار دهید تا بهره هر کدام از آنتن‌ها بر حسب dB مشخص شود.

-اندازه‌گیری بهره آنتن با استفاده از تصویر آن

اگر فقط یک آنتن در اختیار داشته باشیم، برای اندازه‌گیری بهره آن می‌توانیم به‌جای آنتن دوم، مطابق شکل (۶ -۲) از تصویر خود آنتن استفاده نماییم. دستگاه نشان‌دهنده و دیود آشکارساز را از قسمت گیرنده (سمت راست مدار) باز کرده و به سمت فرستنده منتقل نمایید. بقیه قطعات سمت گیرنده را از مدار حذف نمایید. در فاصله $R/2$ از آنتن، یک رفلکتور صفحه ای را طوری که سطح آن کاملاً عمود بر محور آنتن باشد، قرار دهید. فاصله این صفحه تا آنتن نباید کمتر از ۵۰ سانتی متر باشد. به این ترتیب تصویر آنتن در فاصله R از خود آنتن قرار خواهد گرفت. لذا اگر دیود در دهنه ۴ یاD قرار گیرد، دریافتی متناسب با P_r و اگر در دهنه C قرار گیرد، دریافتی متناسب با P_t خواهد بود. مانند حالت قبل به کمک تضعیف‌کننده مدرج، مقدار $10\ log\ P_t/P_r$ و پارامتر های دیگر را به دست آورید و گین آنتن را مشخص کنید.

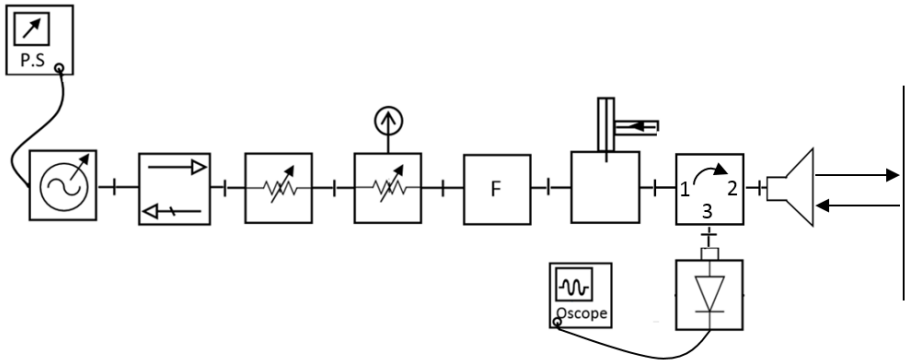


شکل (۶ -۲) ست-آپِ لازم برای اندازه‌گیری بهره آنتن با استفاده از تصویر آن

-استفاده از سیرکولاتور در سیستم های فرستنده گیرنده دوطرفه[۱۳]

یکی از موارد کاربرد سیرکولاتورها، در سیستم‌های فرستنده گیرنده دوبلکس است. استفاده از سیرکولاتور در سیستم-های ارتباطی این امکان را به وجود می‌آورد که سیستم درحالی‌که توسط آنتن خود از ایستگاه مقابل موج دریافت می-کند، هم‌زمان بتواند باهمان آنتن به سمت ایستگاه مقابل موج ارسال نماید.

مداری مطابق شکل (۶ -۳) ترتیب دهید. تنظیمات لازم را انجام دهید به‌طوری‌که خروجی یک موج مدوله‌شده با سیگنال مربعی و دامنه کافی باشد. سعی کنید فرکانس حامل(carrier) و فرکانس سیگنال مدوله‌کننده مدار شما، با میز گروههای مجاور، متفاوت باشد.



شکل (۶ -۳) کاربرد سیرکولاتور در سیستم های فرستنده گیرنده دوطرفه

اگر فقط فرستنده خود را روشن نمایید، ممکن است روی اسیلوسکوپ سیگنال ضعیفی که مربوط به فرستنده میز خودتان است، مشاهده نمایید. این سیگنال می‌تواند ناشی از انعکاس آنتن و نیز در اثر کامل نبودن ایزولاسیون لازم بین دهنه‌های سیرکولاتور باشد.

یک صفحه منعکس کننده فلزی مطابق شکل (۶ -۳) در مقابل آنتن میز خود قرار دهید. سیگنال اسیلوسکوپ به مراتب قوی تر خواهد شد. این سیگنال مربوط به فرستنده شما است که پس از انعکاس توسط صفحه منعکس کننده از دهنه ۲ سیرکولاتور وارد و از دهنه ۳ آن خارج می‌شود. صفحه را بردارید. کلید منبع تغذیه را به حالت Heater قرارداده و آنتن مدار خود را در جهت آنتن میز دیگر با فاصله مناسب طوری تنظیم کنید که بتوانید موج مدوله‌شده آن میز را دریافت نمایید. پس از دریافت، فرکانس سیگنال مدوله‌کننده آن را توسط اسیلوسکوپ مشخص نمایید. در این حالت اگر فرستنده خود را روشن نمایید، ممکن است روی اسیلوسکوپ سیگنال ضعیفی از فرستنده میز خود را که روی موج دریافتی شما سوار شده باشد، مشاهده نمایید. همزمان سیگنال فرستنده شما هم توسط گیرنده میز مقابل دریافت خواهد شد. در عمل، فرکانس حامل ارسال و دریافت باهم متفاوت است ودر ورودی گیرنده، فیلترهای باند باریک تعبیه شده است که فقط سیگنال دریافتی را عبور می‌دهند.

سؤال

۱- با دو برابر کردن فاصله بهره آنتن چه تغییری می‌کند؟ نتیجه عملی را با نتیجه تئوری مقایسه کنید.

[۱۳] Duplex

آزمایش سیزدهم

موضوع: ترکیب دو سیگنال مایکروویو با استفاده از T جادویی

اهداف: آشنایی با یک سیستم فرستنده و گیرنده مایکروویو، آشنایی با کاربرد و نقش T جادویی در این سیستم، آشکار سازی سیگنال با فرکانس میانی (IF) در سمت گیرنده

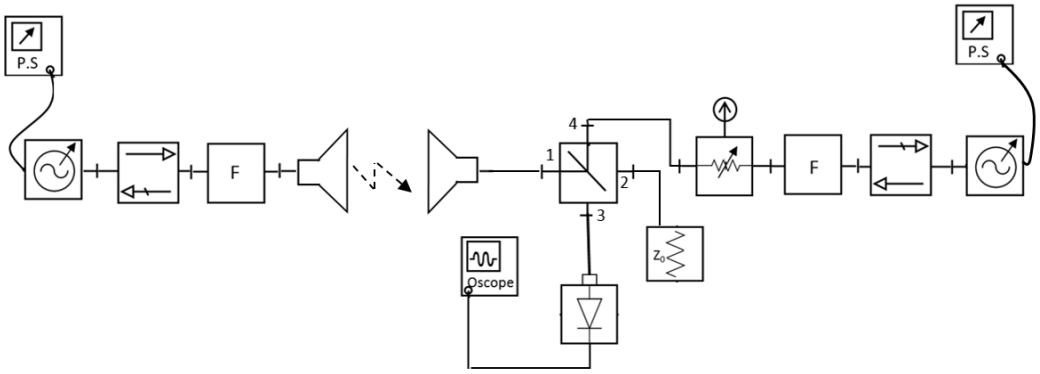
-تئوری :

اکثر گیرنده‌های مایکروویو به‌صورت سوپرهترودایین هستند. درگیرنده‌های سوپرهترودایین، یک نوسان‌ساز به نام نوسان‌ساز محلی تعبیه شده است که فرکانس آن با فرکانس سیگنال دریافت شده توسط آنتن گیرنده، به‌طور استاندارد به مقدار معینی تفاوت دارد. این مقدار در بعضی از سیستم‌های مایکروویو که در باند فرکانسی X کار می‌کنند، به ۹۰ مگاسیکل بر ثانیه محدود می‌شود.

از ترکیب سیگنال خروجی نوسان‌ساز محلی با سیگنال دریافتی آنتن گیرنده و با استفاده از یک المان غیرخطی (دیود مایکروویو)، یک سیگنال با فرکانس تفاضل به نام فرکانس میانی (IF) به دست می‌آید. همانطور که گفته شد این فرکانس خیلی پایین تر از باند فرکانسی مایکروویو بوده و خبر هم روی آن سوار است. این عمل را پایین آوردن فرکانس یا (Down Conversion) می‌نامند. چون باید دو سیگنال مایکروویو از هم ایزوله باشند، لذا برای اینکار از T جادویی استفاده می‌کنیم به‌طوری‌که سیگنال خروجی نوسان‌ساز محلی را به دهانه (۱) T جادویی و سیگنال دریافتی از آنتن گیرنده رابه دهانه (۴) آن اعمال می‌کنیم. دیود مایکروویو که دارای مشخصه غیرخطی است، اگر فقط به دهانه ۲ یا ۳ مجیک T وصل شود، آن را مخلوط کننده نامتعادل (Unbalanced Mixer)و اگر به هر دو دهانه (۲) و(۳) مجیک T دیود وصل شود، قطعه حاصل (Balanced Mixer) یا متعادل خواهد بود. به علت اختلاف امپدانس دو کریستال در این حالت معمولاًخروجی‌ها از نظر دامنه باهم متفاوت هستند. در هر حال سیگنال IF که در خروجی دیود مایکروویو به راحتی با اسیلوسکوپ قابل مشاهده است، ظاهر خواهد شد .

-شرح آزمایش :

مداری مطابق شکل (۶-۴) در نظر می‌گیریم. در این آزمایش یکی از ست-ها را که کلایستروِن روی آن سوار است، به‌عنوان فرستنده انتخاب می‌کنیم و در سمت گیرنده که مجیک T قرار دارد، از اسیلاتور گان به‌عنوان نوسان‌ساز محلی استفاده می‌کنیم.



شکل (۶ -۴) ست-آپ لازم برای ترکیب دو سیگنال مایکروویو با استفاده از T جادویی

ابتدا فقط منبع تغذیه اسیلاتور گان را روشن نمایید و پس از تنظیمات لازم، فرکانس خروجی اسیلاتور را که حوالی ۹۴۰۰ مگاهرتز است، به‌طور دقیق اندازه‌گیری نمایید.سپس منبع تغذیه آن را به‌طور موقت خاموش نمایید و منبع تغذیه کلایسترون را روشن کنید. توجه داشته باشید که کلید مدولاسیون آن در حالت EXT باشد. تنظیمات لازم را برای حالتی که کلایسترون با بیشترین دامنه نوسان نماید، انجام دهید و در این حالت فرکانس خروجی آن را اندازه‌گیری نمایید. معمولاً باید فرکانس دو منبع نوسان فرستنده و گیرنده (یا یکی از آن‌ها) را طوری تغییر دهید که اختلاف فرکانسی بین آن‌ها مساوی فرکانس IF موردنظر باشد، چون باند فرکانسی اسیلوسکوپ ها و دیود های مایکروویو محدود است. لذت سعی نمایید که اختلاف فرکانس دو منبع سیگنال مایکروویو یا فرکانس IF ، بیشتر از باند فرکانس اسیلوسکوپ و دیود انتخاب نشود.

ابتدا مطابق شکل، یک بار تطبیق به دهانه ۲ مجیک T ببندید و دیود را در دهانه ۳ آن قرار دهید. دیود دارای منحنی مشخصه درجه دوم است، لذا خروجی آن از نظر فرکانس مجموع، دو برابر هر یک از سیگنالهای ورودی مایکروویو و همچنین تفاضل آن دو سیگنال خواهد بود که سیگنال‌های مجموع و سیگنال‌های دو برابر، هر یک از طریق دیود به زمین بای پاس می‌شوند و آن چه که باقی می‌ماند، یک مؤلفه با فرکانس تفاضل دو سیگنال مایکروویو (همراه با یک مقدار D.C) است که در اسیلوسکوپ مشاهده می‌شود. (رابطه دیود آشکارساز در ابتدای جزوه موجود است.)

درصورتی‌که سیگنال تفاضل به‌طور واضح در صفحه اسیلوسکوپ مشاهده نشد، با تغییر جزیی پیچ تنظیم فرکانس، ولتاژ رفلکتور کلایسترون یا بایاس دیود گان، سیگنال IF واضحی به دست آورید. فرکانس آن را مشخص نموده با فرکانس IF موردنظر مقایسه و در جدول زیر یادداشت نمائید. باز فرکانس هر یک از نوسان‌سازها را به‌دقت اندازه‌گیری نموده و تفاضل آن‌ها را با سیگنال اسیلوسکوپ مقایسه و در جدول یادداشت نمائید. F1 فرکانس فرستنده F2 فرکانس نوسان‌ساز محلی است.

به‌جای بار تطبیق دهانه(۲) مجیک T، یک دیود آشکارساز دیگر ببندید. سیگنال خروجی آن را به کانال دیگر اسیلوسکوپ بدهید و اختلاف فاز بین خروجی دو دهانه ۲و۳ را مشخص نموده و در جدول (۶ -۱) یادداشت نمائید.

اگر موج خروجی فرستنده را مدوله کنید، فرکانس تفاضل IF نیز سیگنال مدوله‌شده خواهد بود.

جدول(۶ -۱) نتایج حاصل از ترکیب دو سیگنال مایکروویو توسط T جادویی

F_1	F_2	فرکانس IF خواسته شده	فرکانس IF به‌دست‌آمده	اختلاف فاز بین دهانه T_2و T_3	فرکانس مدوله‌کننده IF

سؤال

۱- ماکزیمم فرکانسی که اسیلوسکوپ می‌تواند اندازه‌گیری کند و نشان دهد چه محدودیتی به فرکانس‌های منابع فرستنده و گیرنده اعمال می‌کند؟

ضمیمه

- روش به دست آوردن فاز ضریب بازتاب و ضریب موج ساکن

در صورتی که در انتهای خط، بار غیرتطبیق قرار دهیم، مقداری بازتاب وجود دارد که اگر ضریب بازتاب را $\Gamma = \rho e^{j\theta}$ فرض کنیم، در هر نقطه روی خط میدان الکتریکی مجموع دو موج رفت و برگشت است:

$$E = E_i + E_r = E_{io} e^{-j\beta z} + \Gamma E_{io} e^{j\beta z} = E_{io}(e^{-j\beta z} + \rho e^{j\theta} e^{j\beta z})$$

اکنون E را مرتب کرده فاز و دامنه آن را به دست می‌آوریم:

$$E = E_{io} e^{j\theta/2} \left(\cos(\beta z + \theta/2) + \rho\cos(\beta z + \theta/2) + j\,(\rho\sin(\beta z + \theta/2) - \sin(\beta z + \theta/2))\right)$$

با فرض $\beta z + \theta/2 = x$ داریم:

$$E = E_{io} e^{j\theta/2} \sqrt{(\cos x + \rho\cos x)^2 + (\sin x - \rho\sin x)^2} \prec \tan^{-1}\frac{\sin x\,(\rho-1)}{\cos x\,(\rho+1)}$$

$$E = E_{io}\sqrt{(1+\rho^2+2\rho\cos 2x)} \prec (\tan^{-1}\frac{(\rho-1)}{(\rho+1)}\tan x) + x/2 \qquad (۱)$$

زمانی E مینیمم است که $\cos 2x$ منفی ترین مقدار خود را داشته باشد یعنی:

$$\cos 2x = -1 \qquad (۲)$$

$$|E_{\min}| = |E_{io}|(1-\rho) \qquad (۳)$$

اکنون با استفاده از این نتیجه به دو رابطه مفید برای اندازه‌گیری‌های ضریب بازتاب و VSWR می‌رسیم

الف- اندازه‌گیری فاز ضریب بازتاب:

با استفاده از رابطه(۲) داریم:

$$\cos 2(\beta z + \theta/2) = -1$$
$$2\beta z + \theta = (2k+1)\pi \qquad (۴)$$

حال اگر دوبار مختلف در انتهای خط بسته، محل مینیمم ها را z_1 و z_2 و فاز ضریب بازتاب آن‌ها را θ_1 و θ_2 بنامیم می‌توان نوشت:

$$2\beta z_1 + \theta_1 = (2k+1)\pi$$
$$2\beta z_2 + \theta_2 = (2k+1)\pi$$
$$\theta_2 - \theta_1 = -2\beta(z_2 - z_1)$$

اگر بار(۱) اتصال کوتاه باشد $\theta_1 = \pm\pi$ شده و

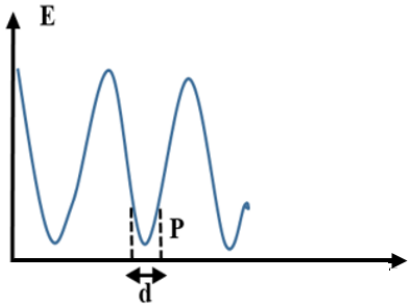
$$\theta_2 = \pm\pi - 2\beta(z_2 - z_1) = \pm\pi - \frac{4\pi}{\lambda_g}(z_2 - z_1) = \pm\pi - 4\pi\frac{D}{\lambda_g} \qquad (۵)$$

که با اندازه‌گیری λ_g و z_2 و z_1 می‌توان مقدار θ_2 را به دست آورد.

ب- به دست آوردن ضریب موج ساکن

با استفاده از رابطه $|E_{\min}| = |E_i|(1-\rho)$ و با در نظر گرفتن شکل زیر فرض می‌کنیم در نقطه P که به فاصله d/2 از نقطه مینیمم است شدت میدان، m برابر میدان مینیمم است یعنی:

$$|E_p| = m\,|E_{\min}| \qquad (۶)$$



با استفاده از رابطه(۱) داریم $|E_p| = |E_i| \sqrt{1+\rho^2+2\rho\cos 2x_P}$

که در آن $2x_P = 2(\beta z_2 + \theta/2) = 2\beta(z_{\min} + d/2) + \theta = (2\beta z_{\min} + \theta) + \beta d$ که $2\beta z_{\min} + \theta$ فاز نقطه مینیمم بوده و برابر $(2k+1)\pi$ است. بنابراین

$$2x_P = (2k+1)\pi + \beta d$$

و از آنجا

$$|E_P| = |E_i| \sqrt{1+\rho^2-2\rho\cos((2k+1)\pi+\beta d)} = |E_i| \sqrt{1+\rho^2-2\rho\cos(\beta d)} \qquad (۷)$$

مقادیر $E_{\min}$ و E_P را در رابطه (۶) قرارداده ساده می‌کنیم نتیجه می‌شود:

$$1+\rho^2-2\rho\cos(\beta d) = m^2(1-\rho^2) \qquad (۸)$$

می‌دانیم

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

از ترکیب این رابطه با رابطه (۸) مقدار VSWR به‌صورت رابطه زیر حاصل می‌شود

$$VSWR = \sqrt{\frac{2m^2-1-\cos\beta d}{1-\cos\beta d}} = \sqrt{\frac{m^2-\cos^2\frac{\beta d}{2}}{\sin^2(\beta d/2)}} \qquad (۹)$$

اگر m را برابر $\sqrt{2}$ فرض کنیم یعنی قدرت میدان در نقطه P دو برابر مینیمم باشد یا به عبارت دیگر میدان نقطه P به اندازه ۱/۵ dB بیشتر از مینیمم باشد در این صورت

$$VSWR = \sqrt{\frac{1+\sin^2(\beta d)/2}{\sin^2\frac{\beta d}{2}}} = \sqrt{1+\frac{1}{\sin^2(\beta d/2)}}$$

در صورتیکه مقدار VSWR زیاد باشد d خیلی کوچک شده و می‌توان نوشت

$$VSWR = \sqrt{1+\frac{1}{(\beta d/2)}} \approx \frac{1}{(\beta d/2)} = \frac{\lambda_g}{\pi d} \qquad (۱۰)$$

که با اندازه‌گیری λ_g و d مقدار ضریب موج ساکن به دست می‌آید.