Archive of SID

مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران، جلد ۱۷، شمارهٔ ۲، ویژه‌نامه، ۱۳۹۶
مقاله نامهٔ دومین کنفرانس ملی شتاب‌دهنده‌ها و کاربرد آنها، آذر ۱۳۹۴

طراحی، ساخت و مقایسهٔ دو ترکیب کنندهٔ توان با محفظهٔ هم‌محور و استوانه‌ای

علی محمد پورصالح[۱و۲]، ایرج جباری[۱] و حسین خلفی[۲]

۱. گروه مهندسی هسته‌ای، دانشکدهٔ علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه اصفهان، اصفهان
۲. سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم وفنون هسته‌ای، مجتمع پژوهشی ایران مرکزی، یزد

چکیده

یکی از روش‌های مطرح ترکیب توان در سیستم RF شتاب دهنده‌های موج رادیویی استفاده از ساختارهای تشدیدی است. در این ساختار، ساخت ترکیب کننده یا تقسیم کنندهٔ توان با استفاده محفظهٔ هم‌محور یا محفظهٔ استوانه‌ای حائز اهمیت می‌باشد. در این تحقیق دو ترکیب کننده در یک باند بسامدی طراحی و ساخته شده و نتایج آن با هم مقایسه شده است. نتایج حاصل از تست‌های عملی ضمن تایید نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که ترکیب کنندهٔ توان با استفاده از محفظهٔ هم‌محور نسبت به محفظهٔ استوانه‌ای دارای ابعاد کمتر و همچنین قابلیت تنظیم راحت‌تری است، و برای استفاده در سیستم RF شتاب دهنده‌های موج رادیویی مناسب‌تر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ترکیب کنندهٔ توان RF، محفظهٔ هم‌محور، محفظهٔ استوانه‌ای، شتاب دهندهٔ موج رادیویی

۱. مقدمه

ترکیب کننده‌ها یا تقسیم کننده‌های توان یکی از تجهیزات مهم در سیستم RF شتاب دهنده‌های موج رادیویی می‌باشند، به ویژه این قطعات در شتاب دهنده‌هایی که از تقویت کننده‌های ترانزیستوری استفاده می‌کنند نقش حیاتی دارند. به طور کلی ترکیب کننده‌ها یا تقسیم کننده‌های توان به دو شکل ترکیب کننده‌های تشدیدی و ترکیب کننده‌های بدون تشدید تقسیم بندی می‌شود. هر دو این ترکیب کننده‌های توان نیز به دو شکل شعاعی و غیر شعاعی ساخته می‌شوند. در شکل شعاعی درگاه‌های ورودی یا خروجی به صورت متقارن اطراف درگاه مرکزی قرار دارند. در حالی که در شکل غیر شعاعی حالت تقارنی بین درگاه‌ها وجود ندارد. اغلب ترکیب کننده‌های توان چند راهه به صورت شعاعی ساخته می‌شوند. زیرا در ساختار شعاعی فضای بهتری برای ترکیب تعداد درگاه‌های بیشتر وجود دارد و تقارن بین درگاه‌ها راحت‌تر است [۱ – ۴]. در ترکیب کننده‌های تشدیدی اغلب از محفظهٔ تشدید نظیر محفظهٔ استوانه‌ای یا هم‌محور استفاده می‌گردد. ترکیب کننده‌های توان با محفظهٔ تشدیدی نسبت به بدون تشدید دارای مزایایی از قبیل انتقال توان بهتر یا راندامان بالاتر و همچنین اندازهٔ کمتر هستند ولی عیب آنها پهنای باند کم و تنظیم سخت‌تر می‌باشد [۵]. در ساخت یک ترکیب کنندهٔ توان باید به پهنای باند، اندازه، راندمان، عایق بودن بین درگاه‌ها و توان انتقالی یا توان تلفاتی

www.SID.ir

Archive of SID

توجه داشت. در این مقاله به طراحی و ساخت دو نمونه محفظهٔ ترکیب کنندهٔ توان از نوع تشدیدی با استفاده از محفظهٔ هم‌محور و استوانه‌ای پرداخته شد، و پارامترهای حاصل از تست‌های عملی و شبیه‌سازی در هر دو ترکیب کننده با هم مقایسه گردید.

۲. تئوری و روش کار

جهت طراحی و ساخت ترکیب کنندهٔ با محفظهٔ هم‌محور و استوانه‌ای ابتدا فرض شد که ترکیب کنندهٔ مورد نظر دارای چهار درگاه ورودی و یک درگاه خروجی می‌باشد. البته روش مشروحه قابل گسترش به تعداد درگاه‌های ورودی بیشتر نیز می‌باشد. اگر همین ترکیب کننده به صورت تقسیم کننده در نظر گرفته شود می‌توان تصور کرد که تقسیم کننده دارای یک درگاه ورودی و چهار درگاه خروجی است. هر چند که این دو ترکیب در ساخت اتصالات ورودی و خروجی به دلیل تحمل توان‌های مختلف متفاوت خواهند بود، لیکن دارای تئوری یکسان در طراحی می‌باشند. یکی از نکات مهم در ترکیب کننده‌های توان به کار گیری جفت‌کنندهٔ مناسب جهت محفظهٔ تشدیدی و همچنین رسیدن به ضریب جفت‌شدگی مناسب می‌باشد. ضریب جفت‌شدگی در یک محفظهٔ تشدیدی از رابطهٔ (۱) به دست می‌آید [۶].

$$\beta = \frac{Q_0}{Q_{ext}}\,, \qquad (۱)$$

که در آن Q_0 ضریب کیفیت بی باری و بدون حضور جفت‌کننده، و Q_{ext} ضریب کیفیت خارجی مربوط به جفت‌کنندهٔ است. در طراحی ترکیب کننده‌های توان با استفاده از محفظهٔ تشدیدی می‌بایست سعی گردد تلفات توان در دیواره‌ها تا جای ممکن کم باشد که در این صورت ضریب جفت‌شدگی درگاه مرکزی با سایر درگاه‌ها و همچنین ضریب کیفیت Q_L, Q_{ext} و Q_0 برای چهار درگاه به صورت روابط (۲) و (۳) می‌باشد. در رابطهٔ (۲) β_C ضریب جفت‌شدگی درگاه مرکزی و $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ ضرایب جفت‌شدگی چهار درگاه ورودی می‌باشند. Q_{extc} ضریب کیفیت خارجی کل و $Q_{ext1}, Q_{ext2}, Q_{ext3}, Q_{ext4}$ ضرایب کیفیت خارجی مربوط به درگاه‌ها می‌باشند .

$$\beta_C = \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4\,, \qquad (۲)$$

$$\frac{1}{Q_{extc}} = \frac{1}{Q_{ext1}} + \frac{1}{Q_{ext2}} + \frac{1}{Q_{ext3}} + \frac{1}{Q_{ext4}}\,. \qquad (۳)$$

وقتی چهار درگاه به امپدانس ۵۰ اهم متصل است، درگاه مرکزی در حالت تطبیق قرار دارد. رابطهٔ بین ضریب کیفیت بارگذاری شده(Q_L) و بی باری ضریب کیفیت خارجی توسط رابطهٔ (۴) نشان داده می‌شود [۷].

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_{extc}} + \frac{1}{Q_{ext1}} + \frac{1}{Q_{ext2}} + \frac{1}{Q_{ext3}} + \frac{1}{Q_{ext4}}\,. \qquad (۴)$$

برای طراحی ابعاد ترکیب کنندهٔ توان چهار درگاهی به وسیله محفظهٔ استوانه‌ای و ضریب کیفیت بی باری در مد تشدیدی TM_{010} می‌توان از رابطهٔ (۵) و (۶) استفاده کرد. در این رابطه‌ها C سرعت نورو b شعاع و d طول محفظه می‌باشد [۸].

$$F_{TM_{010}} = \frac{2.405C}{2\pi b}\,, \qquad (۵)$$

$$Q_0 = \frac{2.405\sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}}{2r_S(1+b/d)}\,. \qquad (۶)$$

طول محفظهٔ هم‌محور در مد TEM بر اساس نصب طول موج بسامد تشدید تعیین می‌گردد. ضریب کیفیت این محفظه نیز از رابطه (۷) قابل محاسبه می‌باشد.

$$Q_0 = \frac{\pi}{R_S}\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}\left(\frac{\ln(\frac{R_a}{R_b})}{L\left(1/R_a + 1/R_b\right) + 2\ln(\frac{R_a}{R_b})}\right)\,, \qquad (۷)$$

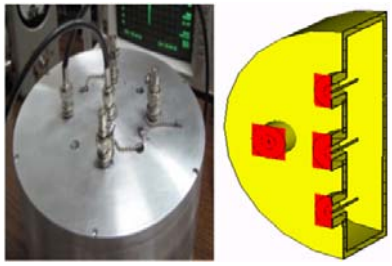
که در آن R_a و R_b به ترتیب شعاع‌های بیرونی و داخلی محفظه می‌باشند [۹]. فرایند شبیه‌سازی این تحقیق با نرم‌افزار CST [۱۰] انجام شد.

۳. ترکیب کنندهٔ توان با محفظهٔ استوانه‌ای

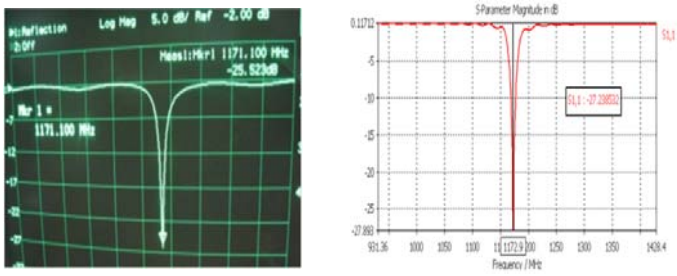
جهت طراحی و ساخت محفظهٔ استونه‌ای جهت سهولت ساخت یک شمش آلومینیمی استاندار به قطر ۲۲۰ میلی‌متر و طول ۱۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد، که بعد از ماشین کاری به یک محفظهٔ استوانه‌ای با شعاع ۹۴٫۵ و طول داخلی ۱۱۰

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱. ترکیب کنندهٔ توان ۴٫۱ با محفظهٔ استوانه‌ای.



شکل ۲. نتایج شبیه‌سازی و تجربی توان برگشتی از درگاه مرکزی.

جدول ۱. پارامترهای S ترکیب کنندهٔ استوانه‌ای.

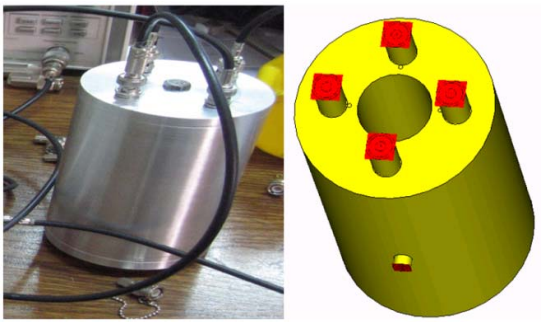
پارامتر	S۴۵	S۳۵	S۳۴	S۲۵	S۲۴	S۲۳	S۵۱	S۴۱	S۳۱	S۲۱
پارامتر متناظر	S۵۴	S۵۳	S۴۳	S۵۲	S۴۲	S۳۲	S۱۵	S۱۴	S۱۳	S۱۲
شبیه سازی (دسی‌بل)	-۱۴٫۶	-۱۴٫۲	-۱۴٫۱	-۱۳٫۹	-۱۴٫۴	-۱۴٫۷	-۶٫۱۵	-۶٫۱۹	-۶٫۱۲	-۶٫۱۷
تجربی(دسی‌بل)	-۱۴٫۳	-۱۴٫۰	-۱۴٫۰	-۱۳٫۸	-۱۴٫۲	-۱۴٫۳	-۶٫۰۹	-۶٫۳۲	-۶٫۲۸	-۶٫۲

میلی‌متر آماده گردید. طبق رابطهٔ (۵) بسامد تشدید این محفظه ۱۲۱۵ مگاهرتز می‌باشد، که در شبیه‌سازی نیز به دست آمد. همچنین مشاهده شد که طول محفظه اثری بر بسامد اصلی تشدید ندارد ولی می‌تواند در ظاهر شدن مدهای تشدیدی بالاتر مؤثر باشد و بر اساس رابطهٔ (۶) باعث کاهش ضریب کیفیت محفظه شود. البته جهت تعیین حداقل طول محفظه باید ولتاژ شکست در داخل محفظه را مد نظر داشت. تزویج توان RF به این محفظه از طریق جفت‌شدگی الکتریکی صورت گرفته است و درگاه‌های ورودی و خروجی به صورت آنتن میله‌ای با طول مناسب طراحی شدند. تصویری از طراحی محفظه استوانه‌ای با چهار درگاه ورودی و یک درگاه خروجی و نمونه ساخته شده آن در شکل ۱ نشان داده شده است.

در این محفظه بسامد تشدید نهایی و همچنین ضریب کیفیت بارگذاری شده بستگی به طول کاوشگرها دارد. بنابراین وقتی کاوشگرها نصب می‌گردد، در حالت بهینه بسامد تشدید ۱۱۷۲ مگاهرتز می‌شود. برای تست ترکیب کننده و اندازه‌گیری پارمترهای s در هر کاوشگر سایر کاوشگرها می‌بایست به امپدانس ۵۰ اهم متصل گردند. بر این اساس پاسخ صحیح برای محاسبهٔ طول کاوشگرها به دست می‌آید. کاوشگرها با استفاده از یک سیم مسی به قطر ۱ میلی‌متر ساخته شده‌اند. ضریب کیفیت بی باری اندازه‌گیری شده برای محفظهٔ استوانه‌ای ساخته شده برابر ۱۷۳۳٫۹۵ است. برای داشتن ضریب جفت‌شدگی مناسب طول کاوشگر مرکزی برابر با ۲۲٫۹ میلی‌متر و طول سایر کاوشگرها برابر با ۱۹٫۵ میلی‌متر می‌باشد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری پارامترهای s از کاوشگر مرکزی در محفظهٔ استوانه‌ای حاصل از تست عملی در شکل ۲ نشان داده شده است. چنانچه در شکل ۲ مشاهده می‌گردد توان برگشتی در حد ۲۵- دسی بل اندازه‌گیری شده در درگاه مرکزی در عمل و۲۷- دسی بل در شبیه‌سازی حاکی از تطبیق خوب درگاه با محفظه می‌باشد. اختلاف کوچک مقادیر تجربی و شبیه‌سازی به دلیل تلفات و خطای تجهیزات اندازه‌گیری در عمل می‌باشد. بررسی تطبیق سایر درگاه‌ها با محفظه به صورت مجزا برای هر درگاه انجام شد که مطابق درگاه مرکزی نتیجه مناسب و در حد ۲۵- دسی بل بود. علاوه بر آن تطبیق امپدانس کلیهٔ درگاه‌ها با امپدانس ۵۰ اهم نیز با استفاده از نمودار اسمیت انجام گرفت. نتایج حاصل از اندازه‌گیری پارامترهای S در شبیه‌سازی و تست‌های عملی جهت محاسبه میزان توان انتقالی از درگاه‌های ورودی به درگاه مرکزی که به عنوان خروجی در نظر گرفته شده و همچنین عایق بودن بین درگاه‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. در این ترکیب کننده برای درگاه خروجی شمارهٔ ۱ و برای

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۳. ترکیب کنندهٔ توان ۴٫۱با محفظهٔ هم‌محور.

شکل ۴. تطبیق امپدانس درگاه خروجی با نمودار اسمیت.

درگاه‌های ورودی، شماره‌های ۲ تا ۵ در نظر گرفته شده است.

بر اساس نتایج جدول ۱ پارامترهای S معرف توان انتقالی از هریک از چهار درگاه ورودی به درگاه خروجی در حد ۶/۱- دسی بل می‌باشد که تلفات کم محفظه را نشان می‌دهد. توان تلفاتی انتقالی کم و در حد۰٫۱ دسی بل می‌باشد. همچنین پارامترهای S معرف عایق بودن بین درگاه‌ها در حد ۱۴- دسی بل می‌باشد که نشان دهندهٔ عایق بودن نسبتاً مناسب بین درگاه‌ها است.

۴. ترکیب کنندهٔ توان با محفظهٔ هم‌محور

مانند محفظهٔ استوانه‌ای در اینجا نیز یک محفظهٔ هم‌محور با چهار درگاه ورودی و یک درگاه خروجی در نظر گرفته شد و سعی گردید که بسامد تشدید کاواک نزدیک بسامد کاواک استوانه‌ای باشد تا بتوان دو ترکیب کننده را از نظر ابعادی مقایسه کرد. برای ساخت ترکیب کنندهٔ توان با محفظهٔ هم‌محور با استفاده یک شمش آلومینیمی به قطر ۱۰۰ میلی‌متر یک محفظهٔ با طولی برابر ۱۳۷٫۵ و شعاع داخلی ۲۰ میلی‌متر و شعاع خارجی ۴۶٫۳ میلی‌متر ساخته شد. با توجه به این ابعاد بسامد تشدید در مد TEM در حد ۱۰۹۳ مگاهرتز می‌باشد. برای این محفظه مطابق شکل ۲ یک درگاه با جفت‌شدگی الکتریکی به صورت آنتن میله‌ای شکل به عنوان خروجی در وسط محفظه و چهار درگاه ورودی با جفت‌شدگی مغناطیسی به صورت جفت‌کنندهٔ حلقوی در بالای محفظه در نظر گرفته شد. این روش تحریک، دارای بالاترین راندمان است چون حلقه جفت‌کنندهٔها در حداکثر میدان مغناطیسی داخل محفظه قرار دارند.

جهت محاسبهٔ طول کاوشگر درگاه خروجی و سطح حلقهٔ درگاه‌های ورودی برای داشتن بهترین حالت تطبیق بین درگاه‌ها و محفظه مانند محفظهٔ استوانه‌ای تک تک درگاه‌ها از طریق شبیه‌سازی و همچنین به وسیله تحلیل‌گر شبکه[1] تست گردید. بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی و تست‌های عملی که تطابق خوبی با یکدیگر دارند، طول بهینه کاوشگر درگاه خروجی برابر ۲۱ میلی‌متر و همچنین سطح حلقه درگاه‌های ورودی برابر ۵۲۰ میلی‌متر مربع به دست آمد که با استفاده از یک سیم مسی با قطر ۲ میلی‌متر ساخته شده است. بسامد تشدید محفظهٔ هم‌محور وقتی تمامی درگاه‌ها متصل به محفظه هستند برابر با ۱۰۸۶ مگاهرتز می‌باشد. شکل ۴ تطبیق درگاه خروجی با استفاده نمودار اسمیت در نت ورک آنالایز را نشان می‌دهد. چنانچه در شکل ۴ مشاهده می‌گردد نمودار تطبیق درگاه خروجی با امپدانس نردیک۵۰ اهم را نشان می‌دهد. همچنین تطبیق امپدانس سایر درگاه‌های ورودی نیز به همین شیوه انجام گردید. ضریب کیفیت بی باری اندازه‌گیری شده در محفظهٔ هم‌محور برابر ۶۰۰۰ اندازه‌گیری شد. با توجه به تنظیمات و اندازه‌گیری‌های صورت گرفته در هنگام تطبیق درگاه‌ها برای محفظهٔ هم‌محور بهترین زاویهٔ حلقه ۴۰ درجه به دست آمد. توان برگشتی در درگاه خروجی اندازه‌گیری عملی در حد ۲۸- دسی بل و ۲۹- دسی بل در شبیه‌سازی بود که حاکی از تطبیق خوب درگاه با محفظه می‌باشد. این پارامتر برای سایر درگاه نیز بین ۲۷- دسی بل تا ۳۰- دسی بل بود. نتایج حاصل از اندازه‌گیری پارامترهای

۱. Analyzer Network

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۲. پارامترهای S ترکیب کنندهٔ هم‌محور.

پارامتر	S۴۵	S۳۵	S۳۴	S۲۵	S۲۴	S۲۳	S۵۱	S۴۱	S۳۱	S۲۱
پارامتر متناظر	S۵۴	S۵۳	S۴۳	S۵۲	S۴۲	S۳۲	S۱۵	S۱۴	S۱۳	S۱۲
شبیه‌سازی(دسی بل)	−۱۷٫۲	−۱۷٫۲	−۱۷٫۱	−۱۶٫۹	−۱۷٫۲	−۱۷٫۰۴	−۶٫۰۵	−۶٫۰۸	−۶٫۰۲	−۶٫۰۴
تجربی(دسی بل)	−۱۷٫۰	−۱۷٫۰	−۱۶٫۸	−۱۶٫۷	−۱۷٫۰	−۱۶٫۹	−۶٫۰۹	−۶٫۱	−۶٫۰۸	−۶٫۰۸

S در شبیه‌سازی و تست‌های عملی جهت محاسبه میزان توان انتقالی از درگاه‌های ورودی به درگاه خروجی و عایق بودن بین درگاه‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است. شماره گذاری درگاه‌ها مطابق محفظهٔ استوانه‌ای در نظر گرفته شد.

بر اساس نتایج جدول ۲ پارامترهای S معرف توان انتقالی از هر یک از چهار درگاه ورودی به درگاه خروجی در حد ۶- دسی بل می‌باشد که بسیار مناسب است، و حاکی از توان تلفاتی انتقالی بسیار کم ودر حد ۰٫۱ دسی بل می‌باشد. عایق بودن بین درگاه‌ها در حد۱۷- دسی بل نیز نشان دهندهٔ عایق بودن مناسب بین درگاه‌ها است. با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده و مقایسهٔ جدول ۱ و ۲ مشاهده می‌گردد که مقادیر به دست آمده ترکیب کنندهٔ توان با محفظهٔ هم‌محور در یک باند بسامدی نسبت به مقادیر متناظر به دست آمده از ترکیب کنندهٔ توان با محفظهٔ استونه‌ای مناسب‌تر است. همچنین حجم کاواک هم‌محور نیز نسبت به استوانه‌ای کمتر است.

۵. بحث و نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از تست‌های شبیه‌سازی و تجربی نشان داد که دو ترکیب کننده توان قابلیت دستیابی به ضریب جفت‌شدگی و تطبیق امپدانس مناسب در درگاه‌های ورودی و خروجی را دارند و دارای توان تلفاتی انتقالی کمی می‌باشند. همچنین مقایسهٔ نتایج و فرایند ساخت نشان داد که ساخت یک ترکیب کنندهٔ توان با محفظهٔ هم‌محور در یک بسامد مساوی به ویژه در بسامدهای پایین نسبت محفظهٔ استوانه‌ای ارجحیت دارد. این تحقیق نشان داد که در یک باند بسامدی یکسان محفظهٔ هم‌محور دارای اندازهٔ کوچک‌تر، ضریب کیفیت بهتر و تنظیمات تطبیق راحت‌تر می‌باشد. بنابراین استفاده از محفظهٔ استوانه‌ای جهت ترکیب توان در بسامدهای پایین توصیه نمی‌شود زیرا ابعاد و تلفات محفظهٔ استونه‌ای خیلی بزرگ‌تر از محفظهٔ هم‌محور خواهد بود. لازم به ذکر است که هرچند دو ترکیب کنندهٔ توان مد نظر در مقیاس آزمایشگاهی و جهت اندازه‌گیری و مقایسهٔ دو ترکیب کنندهٔ تشدیدی ساخته شده و تست‌های صورت گرفته در توان پایین صورت گرفته است ولی با تقویت اتصالات ورودی و خروجی می توان از همین ساختار در توان‌های بالا نیز استفاده کرد.

مراجع

1. S V Kutsaev, M P Kelly and P N Ostroumov, *J. Instrum*. **7** (2012) 11004.
2. K J Russel, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*., vol. MTT-27, no. **5**, (1979) 472.
3. R E Collin, *Foundations For Microwave Engineering*, Second Edition, John Wiley & Sons (2004) 205.
4. D M Pozar, *Microwave Engineering*, Fourth Edition, John Wiley & Sons (2011) 191.
5. U H Gysel, and S Int. *Microwave Symp* ,No. **75** (1975) 116.
6. A S Dhavale and K C Mittal, *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res*. A **604** (2009) 443
7. Y Jinn, C Ruey, and B Wu, *IEEE MTT- S Int.Microwave Symp*. B **7** (1997).
8. T Wangler, "*Principles of RF linear accelerators*", John Wiley & Sons (2002).
9. J Pottier, *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res*. A 40-41 (1989) 943.
10. CST MICROWAVE STUDIO, Computer Simulation Technology, https://www.cst.com/products/cstmws.

www.SID.ir