

وابسته کردن پارامترهای ابعادی رزوناتور لامپ کلايسترون به یک پارامتر و طراحی و بهینه‌سازی پارامترهای الکتریکی رزوناتور با استفاده از آن پارامتر

يعقوب قانع قره‌باغ^۱ علي جعفري^۲ عماد حميدي^۳ سيداحمد اشرفي قريه‌علي^۴

۱- استادیار- دانشکده برق- دانشگاه جامع امام حسین(ع) - تهران- ایران

yqane@ihu.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری- دانشکده برق- دانشگاه جامع امام حسین(ع)- تهران- ایران

ali_jafari@ihu.ac.ir

۳- استادیار- مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی مالک اشتر - تهران- ایران

ehamidi@mut.ac.ir

۴- پژوهشگر- دانشکده برق- دانشگاه جامع امام حسین(ع)- تهران- ایران

s.ahmadashrafi@yahoo.com

چکیده: در این مقاله از روش وابسته کردن پارامترهای ابعادی محفظه رزوناتور لامپ کلايسترون به یکی از پارامترهای آن و سپس تحلیل محفظه با استفاده از این پارامتر پرداخته شده است. این روش جدید به نسبت بالایی کار را برای طراحی و بهینه‌سازی رزوناتور راحت‌تر می‌کند. از این روش برای طراحی محفظه‌ای برای فرکانس ۳ گیگاهرتز استفاده شده است، به طوری که بعد از مشخص کردن یک پارامتر کلی از محفظه و وابسته کردن سایر ابعاد به آن و سپس با استفاده از جابجایی این پارامتر هندسی به بررسی تغییرات پارامترهای الکتریکی طراحی بخش RF شامل فرکانس تشدید، M و R/Q و سپس میزان تأثیرات بر روی بازدهی خروجی لامپ کلايسترون با استفاده از نرم‌افزارهای Mathematica و CST Microwave Studio پرداخته شده است.

واژه‌های کلیدی: رزوناتور، بازدهی، بهینه‌سازی، کلايسترون، فرکانس تشدید

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.61186/jiaeee.21.3.11

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۰۶

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۲۷

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر يعقوب قانع قره‌باغ

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تهران - اتوبان بابایی - دانشگاه جامع امام حسین(ع) - دانشکده‌ی برق

۱- مقدمه

دستاوردهای سال‌های اخیر در زمینه‌ی شتاب‌دهنده‌های ذرات بنیادی، ماهواره‌ها و رادارها کاملاً به طراحی کلاسترهای پرتوان مربوط می‌گردد. کلاسترها، تقویت‌کننده‌های پرتوان امواج مایکروویوی هستند که تقویت‌سیگنال‌های مایکروویوی را بر اساس اصل مدولاسیون سرعت انجام می‌دهند. مدولاسیون، توسط بخش RF که از یک سری رزوناتور^۱ تشکیل شده، انجام می‌گیرد. طراحی بخش RF، نقش حیاتی در تصمیم‌گیری پارامترهای عملکردی لامپ کلاسترها مانند بهره، پهنای باند و بازده کلی ایفا می‌کند. طراحی رزوناتور، از قسمت‌های مهم بخش RF لامپ کلاسترها می‌باشد. R_{sh}/Q_0 محافظه رزوناتور، یکی از مهمترین پارامترهایی است که در طراحی تقویت‌کننده کلاسترها تعیین می‌شود. بازده خروجی یک لامپ کلاسترها متناسب با مقاومت شنت^۲ رزوناتور، R_{sh} است. مقاومت شنت، توانایی رزوناتور را در انجام کار بر روی پرتو الکترونی توصیف می‌کند. پهنای باند لامپ کلاسترها، متناسب با $1/Q_0$ رزوناتور می‌باشد، به طوری که انتخاب Q_0 ، فرکانس کاری یک مدار رزونانس را مشخص می‌کند. بنابراین، R_{sh}/Q_0 یک معیار مهم برای توصیف اثر هر رزوناتور بر حاصل پهنای باند- بهره کلی تقویت‌کننده کلاسترها است [۱].

رزوناتورهای استوانه‌ای با شکاف باریک در ابتدا، در طول سال‌های توسعه لامپ کلاسترها مورد بررسی قرار گرفتند. این رزوناتورها، از آن زمان، به طور گسترده برای ساخت نوسانگرهای مایکروویو مورد استفاده قرار گرفته‌اند. رزوناتورهای استوانه‌ای، امکان تحقق فرکانس‌های تشدید را در محدوده گیگاهرتز، بدون نیاز به ابعاد فیزیکی بزرگ فراهم می‌کنند. چنین رزوناتورهایی، با ارائه یک میدان الکتریکی کاملاً مشخص در ناحیه شکاف^۳، در شتاب‌دهنده‌های ذرات مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲].

برای طراحی محافظه، مقالاتی [۳-۸] موجود می‌باشند. در همه طراحی‌ها روش‌های طراحی متفاوتی توضیح داده شده‌اند که طراحی برای یک مورد خاص، زمان زیادی لازم دارد و تغییرات طراحی وقت بسیاری را از طراح لامپ مایکروویو، تلف می‌کند. در این مقاله روشی ارائه شده که نه تنها در زمان طراحی صرفه جویی می‌شود بلکه در کمترین زمان ممکن میزان بهینه‌ترین ساختار برای طراحی لامپ، ارائه می‌گردد. این روش جدید ارائه شده، این امکان را به طراح می‌دهد که بتواند در کمترین زمان ممکن ساختار خود را برای پارامترهای متفاوتی بازطراحی کند.

در ادامه به طراحی محافظه رزوناتور استوانه‌ای شکل تک پرتوی، برای یک لامپ کلاستر^۳ گیگاهرتز پرداخته شده‌است. در بهینه‌سازی رزوناتور، از روش ساده شده جدید پیشنهاد شده در این مقاله، استفاده شده است. همچنین، طراحی برای لامپ کلاسترها با محافظه‌های استوانه‌ای شکل با فرکانس ۳ گیگاهرتز اجرا شده است. این روش، برای همه محافظه‌ها با هر نوع فرکانسی قابل پیاده‌سازی است.

۲- پیاده‌سازی روش

تغییر ساختار محافظه لامپ کلاسترها، به منظور بهینه‌سازی بازده و توان خروجی لامپ، صورت می‌گیرد. انجام بهینه‌سازی بر روی محافظه لامپ کلاسترها، نیازمند تغییرات پارامترهای هندسی محافظه برای بهبود پارامترهای الکتریکی و بهبود بازده خروجی لامپ می‌باشد. انجام بهینه‌سازی پارامترهای الکتریکی محافظه کلاسترها به روش معمول با استفاده از جروب پارامترهای هندسی آن صورت می‌گیرد. این روش با توجه به وابسته بودن هندسه محافظه به چند پارامتر بسیار زمان‌بر می‌باشد. بنابراین، اگر برای هر بعد آزاد محافظه، محدوده‌ای در نظر بگیریم و با جروب^۴ این پارامترهای هندسی، پارامترهای الکتریکی محافظه $(f, R/Q, M)$ را بررسی و مقایسه کنیم، خواهیم دید که جمع‌بندی این نمودارها، برای پیدا کردن بهینه ابعاد محافظه، کاری سخت و زمان‌بر است. در این مقاله با وابسته کردن سایر پارامترهای هندسی محافظه به یک پارامتر از هندسه محافظه، می‌توان بهینه‌سازی محافظه را بر اساس آن تک پارامتر پیش برد. در این صورت کار بسیار راحت‌تر خواهد شد و زمان بسیار کمتری برای بهینه‌سازی محافظه لازم است. در ادامه این مقاله، به پیاده‌سازی این روش برای یک محافظه استوانه‌ای شکل برای کلاسترها تک پرتوی پرداخته شده‌است.

در شکل ۱ پارامترهای هندسی یک محافظه استوانه‌ای شکل تک پرتوی نشان داده شده‌است. برای وابسته کردن پارامترهای محافظه به یک پارامتر، ابتدا برخی پارامترها را که وابسته به تفنگ الکترونی^۵ لامپ می‌باشند، را با استفاده از فرمول‌های ساختاری به‌دست آورده شده است. در این مقاله دو پارامتر شعاع و ضخامت محافظه که ابعاد آزاد آن می‌باشند را یکی کرده و تابعی تعریف شده است. این دو پارامتر، توسط تابع، به هم وابسته شده‌اند. در این صورت به تغییرات یک پارامتر نیاز داریم تا مشخصات محافظه را با تغییر آن پارامتر به‌دست آوریم. فرکانس مورد نیاز لامپ هم از قبل مشخص شده است. بنابراین برای شروع، ابتدا مجموعه‌ای از بهینه‌ترین محافظه‌ها را با پارامترهای متفاوت عرض و شعاع با استفاده از نرم افزار CST پیدا کرده، به طوری که فرکانس همه آن‌ها برابر ۳ گیگاهرتز باشند. از مجموعه نقاط به‌دست آمده در نرم‌افزار Mathematica، تابع عبوری از این نقاط، به‌دست آورده شده است. سپس معادله تابع را در CST وارد می‌کنیم. در این حالت عرض محافظه به شعاع آن وابسته شده است، یعنی برای تغییرات، فقط نیازمند جروب ضخامت هستیم. ای روش، کار را برایمان، بسیار ساده‌تر می‌کند. از پارامترهای مشخص شده در شکل ۱، تغییرات پارامترهای هندسی a (اندازه قطر لوله رانش) و g (اندازه شکاف محافظه) بر اساس مشخصات تفنگ الکترونی مشخص شده‌اند. پارامتر b ، مقداری ثابت در نظر گرفته می‌شود که پارامتر ابعادی آزاد به حساب نمی‌آید و در بعد شعاع محافظه گنجانده شده است.

برای ربط دادن پارامترها به هم، از تعداد پنج نقطه در این مقاله استفاده شده است، که یک تابع از مرتبه ۵ برای ارتباط بین پارامترهای

محفظه تشدید را توصیف می کند و نشان می دهد که چقدر از توان پرتو با طول شکاف داده شده جفت می شود.

بازده لامپ کلايسترون با توان $2n$ از M Factor رابطه دارد که n تعداد محفظه را مشخص می کند. بنابراین افزایش M Factor باعث بهتر شدن تعامل بین پرتو و میدان محفظه و در نتیجه افزایش چشم گیری در بازده لامپ کلايسترون می گردد. پارامتر M به صورت نسبت بین ولتاژ موثر روی مدولاسیون پرتو به ولتاژ RF در امتداد ناحیه تعامل تعریف می شود (رابطه ۲) [۱۰].

$$M = \frac{V_{eff}}{V_{RF}} = \frac{\left| \int_{-\infty}^{+\infty} E_z(z) e^{-j\beta_z z} dz \right|}{\int_{-\infty}^{+\infty} |E_z(z)| dz} \quad (2)$$

که $E_z(z)$ میدان الکتریکی می باشد. پارامتر بعدی، نسبت امیدانس شنت محفظه (نسبت ولتاژ در شکاف به تلفات دیواره محفظه) به Q محفظه (نسبت انرژی ذخیره شده در محفظه به تلفات دیواره محفظه)، R/Q است، که به صورت رابطه ۳ تعریف می گردد.

$$R/Q = \frac{\frac{|V|^2}{W}}{2\omega U} = \frac{\left(\int_{-\infty}^{+\infty} |E_z| dz \right)^2}{2\omega U W} \quad (3)$$

که U انرژی الکتریکی ذخیره شده در شکاف محفظه و V ، ولتاژ RF در طول شکاف است. البته باید به این نکته توجه کرد که مقدار R/Q وابسته به هندسه محفظه است و هیچ وابستگی به فرکانس و تلفات دیواره محفظه ندارد. یعنی دو محفظه یکسان در دو فرکانس مختلف می توانند دارای R/Q یکسانی باشند. R/Q ، یکی از پارامترهای مهم در طراحی لامپ کلايسترون است که با بازده لامپ رابطه مستقیمی دارد و افزایش آن باعث افزایش بازدهی لامپ می گردد [۵].

از آنجایی که بازده در یک محفظه طبق رابطه ۴ با M^2 و R/Q متناسب است و این دو پارامتر با تغییر طول شکاف تغییر می کنند، باید از طول شکافی استفاده شود که مقدار F بیشینه گردد. افزایش طول شکاف باعث افزایش R/Q ولی کاهش M می شود، بنابراین یک مصالحه وجود دارد، که طول شکاف بهینه شود. در این مقاله از ابزار Sweep نرم افزار CST استفاده شده است که در مقدار ثابت طول شکاف، پارامترهای محفظه با تغییرات عرض محفظه محاسبه می شوند و سپس مقدار F از روی آن ها محاسبه می گردد [۱۱].

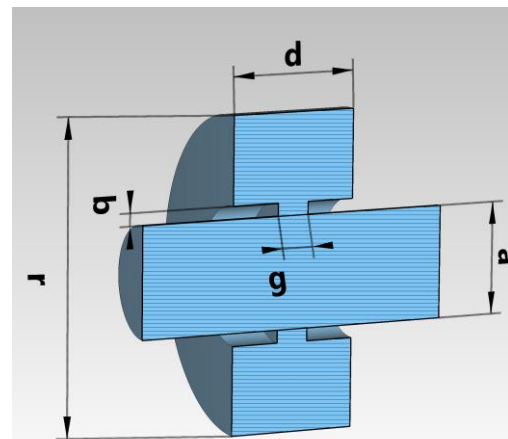
$$F \approx M^2 \times R/Q \quad (4)$$

شعاع و عرض محفظه ایجاد شده است. توجه شود که، هر چه تعداد نقاط بیشتر شود، میزان دقت این تابع هم بیشتر می گردد. با این اوصاف ضخامت محفظه d ، به شعاع محفظه ($r = R/2$) توسط معادله ۱ با توجه به محاسبات انجام شده، طبق روش ذکر شده، مربوط می شود.

$$R = 72.7934 - 6.0022 d + 0.322849 d^2 - 0.00923925 d^3 + 0.0001 d^4 \quad (1)$$

که در آن R قطر محفظه می باشد. تابع $R(d)$ ، رابطه بین ضخامت محفظه و قطر محفظه می باشد. برای به دست آوردن آن، به طوری که در تمامی نقاط این تابع، مقدار فرکانس محفظه، ثابت بماند، از تعدادی نقاط استفاده شده است. پیدا کردن این نقاط با تک طراحی های انجام می گی رد. ضخامت و قطر محفظه، طوری انتخاب می شوند که فرکانس، ۳ گیگاهرتز شود. سپس با داشتن این نقاط، می توان تابع عبوری از این نقاط را به دست آورد. ادعا شده است که این تابع شامل تمامی نقاطی از ضخامت ها و قطرهای است که فرکانس محفظه، ۳ گیگاهرتز می شود.

در این مقاله، پارامتر g ، با توجه به فرمول ($Bg = 1$) محاسبه شده است. مقدار B هم از روی مقادیر ولتاژ و جریان تغنگ الکترونی به دست می آید [۹]، که برابر مقدار ثابت ۵ میلی متر محاسبه شده است. بعد از مشخص کردن رابطه ۱، که وابستگی بین d و r را بیان می کند، در ادامه به بررسی پارامترهای الکتریکی با توجه به تغییرات پارامتر d خواهیم پرداخت.



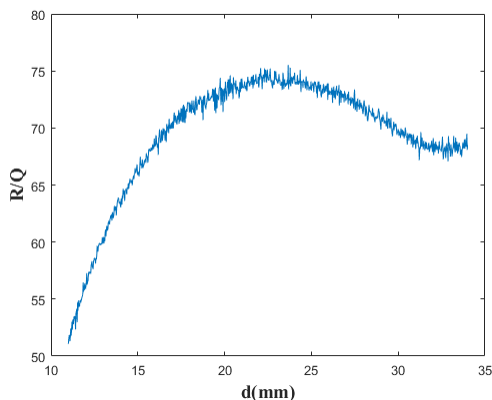
شکل (۱): پارامترهای ابعاد محفظه کلايسترون (d ، عرض محفظه - قطر لوله رانش - g ، عرض شکاف محفظه - r ، قطر بیرونی محفظه)

یکی از پارامترهای مهم در طراحی لامپ کلايسترون، ضریب تزویج پرتو (M Factor) است. این ضریب، تعامل بین پرتو و میدان های

۳- نتایج شبیه‌سازی‌ها

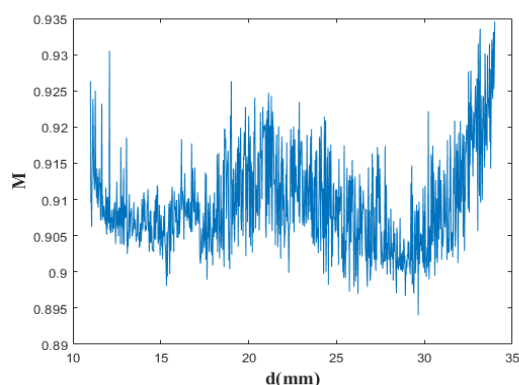
در این قسمت، نتایج حاصل از پارامترهای الکتریکی محفظه (فرکانس تشدید، M و R/Q) با تغییرات عرض آن به دست آورده شده‌اند. از روی پارامترهای الکتریکی، به دنبال یافتن محفظه‌هایی خواهیم بود که شاخص F ، بالایی دارند. در شکل ۲، ملاحظه می‌کنید که فرکانس، برحسب پارامتر d تغییرات محسوسی ندارد و تقریباً بر روی فرکانس ۳ گیگاهرتز ثابت باقی مانده‌است. این ثابت ماندن فرکانس، مزیت روش وابسته کردن پارامترها به یک پارامتر بوده که موجب صرفه جویی در زمان برای طراحی محفظه می‌شود.

با توجه به ثابت ماندن تغییرات فرکانس، که یک کمیت مهم برای طراحی است و با اندکی تغییرات ابعاد محفظه تغییر می‌کند، با تغییرات ابعاد محفظه دیگر تابع ابعاد نیست و طوری ابعاد را به هم وابسته کرده‌ایم که فرکانس ثابت باشد. در این صورت از تعداد مجهولات مساله کاسته می‌شود و دیگر نیازی به شبیه‌سازی‌های متعددی نیست که برای طراحی نیازی به آن‌ها نداریم. این روش در واقع، تمام ابعادی که منجر به تولید فرکانس ۳ گیگاهرتز می‌باشد را از سایر ابعاد فیلتر می‌کند.



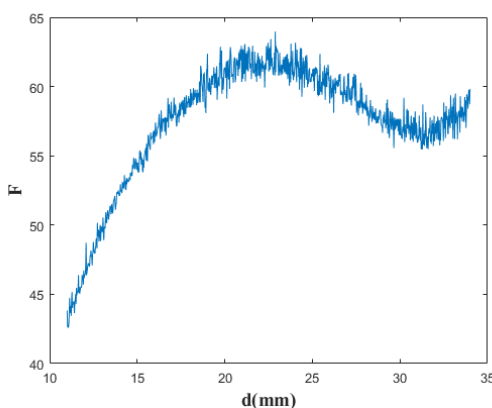
شکل (۳): نمودار تغییرات پارامتر R/Q بر حسب عرض محفظه (d)

با توجه به اینکه، عرض شکاف محفظه ثابت در نظر گرفته شده‌است، بنابراین، تغییرات پارامتر M بسیار کم خواهد بود. اما با توجه به فرمول ۴، تغییرات شاخص F با توان دوم پارامتر M متناسب است. بنابراین این تغییرات اندک هم تاثیرگذار خواهد بود. برای اعمال تاثیرات پارامتر M ، تغییرات این پارامتر هم بررسی شده که در شکل ۴ نشان داده شده‌است.

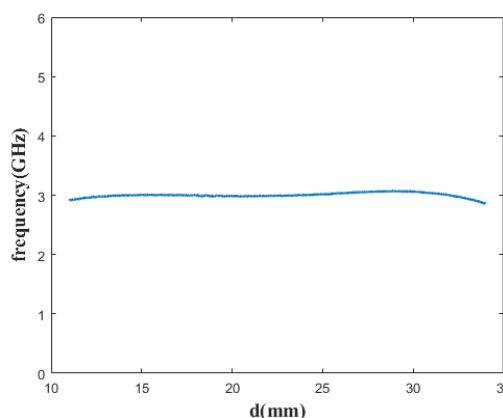


شکل (۴): نمودار تغییرات پارامتر M بر حسب عرض محفظه (d)

در آخر، برای پیدا کردن ابعاد مناسب برای عرض محفظه، از تغییرات شاخص F استفاده می‌کنیم که در شکل ۵ نشان داده شده‌است.



شکل (۵): نمودار تغییرات شاخص F بر حسب عرض محفظه (d)



شکل (۲): نمودار تغییرات فرکانس بر حسب تغییرات عرض محفظه

با توجه به ثابت ماندن فرکانس، در ادامه به دنبال تغییرات پارامترهای الکتریکی بر حسب پارامتر عرض محفظه خواهیم بود. در شکل ۳، تغییرات پارامتر R/Q برحسب عرض محفظه، در تمام نقاطی که فرکانس ۳ گیگاهرتز دارند، نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۳ ملاحظه می‌کنید، تمام R/Q های ممکن با فرکانس تقریباً ثابت ۳ گیگاهرتز نمایش داده شده‌اند که کار انتخاب را راحت‌تر می‌کند. می‌دانیم که بیشترین R/Q ی که برای این محفظه می‌توان متصور شد، برابر تقریباً ۷۵ می‌باشد که این نکته در طراحی لامپ مهم است.

زیرنویس ها

- ¹ Resonator
² Shunt
³ Gap
⁴ Sweep
⁵ Electrogun

با توجه به شکل ۵، متوجه می شویم که بهترین انتخاب برای عرض محفظه، در بازه تقریباً ۲۰ تا ۲۵ میلی متر قرار دارد. چون شعاع هم وابسته به عرض محفظه می باشد، بنابراین ابعاد بهینه برای محفظه ای استوانه ای شکل تک پرتوی با فرکانس ۳ گیگاهرتز با مشخصات اولیه تفنگ الکترونی برای لامپ کلاسترون به دست می آید.

نتیجه گیری

برای بهینه سازی محفظه لامپ کلاسترون استفاده از یک پارامتر کلی برای بهینه سازی، هم می توان در وقت صرفه جویی کرد هم میزان پیچیدگی بهینه سازی را تا حد زیادی کاهش می دهد. که این کار با استفاده از وابسته کردن پارامترهای محفظه به یکی از پارامترهای آن صورت می گیرد. این روش برای تمامی محفظه ها در لامپ های مایکروویوی در هر فرکانسی قابل اجرا است.

سپاسگزاری

از همراهی اساتید گرانقدر در این مقاله کمال تشکر و قدردانی را دارم.

مراجع

- [1] R. K. e Silva, and C. C. Motta. Design and simulation of a 1.3 GHz input klystron cavity. in 2013 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC). 2013.
- [2] J.J. Barroso, P.J. Castro, J.L. Neto, and O.D. Aguiar. Reentrant cylindrical cavities. in SBMO/IEEE MTT-S International Conference on Microwave and Optoelectronics, 2005.
- [3] J.J. Barroso, P.J. Castro, J.P. Leite Neto, and O.D. Aguiar, Analysis and simulation of reentrant cylindrical cavities. International journal of infrared and millimeter waves, 2005.
- [4] P. Pankaj, Design OF RF Cavities and RF Section Of S Band Klystron. 2014.
- [5] R.K. Silva, and C.C. Motta. Design of multiple-beam klystron cavities. in IVEC 2012. 2012. IEEE.
- [6] P.D. Thakur, et al., Design and Simulation of Cavity and RF Section for High Power (CW) Klystron. 2011.
- [7] A.K. Tiwari, R.K. Arora, and P. Hannurkar. Design and simulation of multibeam klystron cavity. in Proceedings of Asian Particle Accelerator Conference. 2007.
- [8] X. Xu, et al., G-Band Broad Bandwidth Extended Interaction Klystron with Traveling-Wave Output Structure. Electronics, 2022.
- [9] G. Caryotakis, High power klystrons: Theory and practice at the stanford linear accelerator center. Stanford Linear Accelerator Center, SLAC-PUB, 2004.
- [10] J. Cai, I. Syratchev, and Z. Lui, Scaling procedures and post-optimization for the design of high-efficiency klystrons. IEEE Transactions on Electron Devices, 2018.
- [11] J. Cai, I. Syratchev, and G. Burt. Development of X-band high power high efficiency klystron. in High Gradient Workshop, Virtual. 2021.