استفاده از تشدیدکننده محفظه گروهی با شکاف اصلاح شده به منظور افزایش تاثیر بر روی دسته‌بندی الکترون‌ها و افزایش بازدهی خروجی لامپ کلایسترون

تاریخ دریافت:
۲۸ خرداد ماه ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش:
۲۰ مرداد ماه ۱۴۰۳

علی جعفری*[۱]، یعقوب قانع قره باغ، عماد حمیدی[۳]، سید احمد اشرفی قریه علی[۴]
۱. دانشجو دکتری، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران.
۲. استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران.
۳. استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.
۴. دانشکده سایبری، دانشگاه جامع امام حسین، تهران(ع)، ایران.

چکیده

دستاوردهای سال‌های اخیر در زمینه‌ی شتاب‌دهنده‌های ذرات بنیادی، ماهواره‌ها و رادارها کاملاً به طراحی کلایسترون‌های پرتوان مربوط می‌گردد. افزایش بازدهی چنین کلایسترون‌هایی یک مساله‌ی منحصر به فرد می‌باشد، که نیاز به تحقیقات اساسی در فرآیندهای برهمکنش باریکه الکترونی با میدان تشدیدکننده‌ها دارد. هدف این مقاله، ارائه ایده‌ای جدید برای افزایش بازدهی خروجی لامپ کلایسترون با استفاده از تشدیدکننده‌های گروه محفظه‌ای با استفاده از جابه‌جایی شکاف تشدیدکننده می‌باشد. از تشدیدکننده‌های محفظه گروهی، در طراحی دسته‌بندی الکترون‌ها برای تعیین میزان بهبود تاثیرگذاری آن‌ها بر روی دسته‌بندی و بازده خروجی لامپ کلایسترون استفاده شده‌است. برای بهبود بازدهی یک لامپ کلایسترون طراحی شده با پنج تک محفظه، ابتدا با استفاده از یک محفظه گروهی در طراحی مجدد ساختار، افزایش بازدهی ۲/۶۳ درصد و برای سه محفظه گروهی ۶/۱۱ درصد حاصل گردیده است. این افزایش بازدهی بدون افزایش طول ناحیه برهمکنش موج با پرتو صورت گرفته است. برای اثبات این ادعا از نرم‌افزارهای CST و KLYC استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی: کلایسترون، بازده، باریکه الکترونی، رزوناتور، گروه محفظه‌ای، دسته‌بندی

Using a clustered cavity resonator with a modified gap in order to increase the effect on the bunching of electrons and increase the output efficiency of the klystron tube

Ali Jafari*[1], Yaghoub Qaneh Qarehbagh[2], Emad Hamidi[3], Seyed Ahmad Ashrafi gharyehali[4]

1. Ph.d Student, Department of Electrical Engineering, Imam Hussein University, Tehran, Iran.
2. Assistant professor, Department of Electrical Engineering, Imam Hussein University, Tehran, Iran.
3. Assistant professor, Department of Electrical Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.
4. Department of Cyber, Imam Hussein University, Tehran, Iran.

Abstract

Recent years in the fields of accelerators of fundamental particles, satellites and radars are completely devoted to the design of the high power klystrons. Increasing the efficiency of such klystrons is an exclusive problem, which requires fundamental research in the processes of interaction of the electron beam with the field of resonators. The aim of this paper is to present new ideas for increasing the output efficiency of klystron tubes using clustered cavity with gap displacement. In this paper,clustered cavity resonators are used in the design of electron bunching to determine the effect on the bunching and output efficiency of the klystron tube. To improve the efficiency of a klystron tube designed with five single cavity, first by using a clustered cavity in the redesign of the structure, an increase in efficiency of 2.63% and 6.11% for three clustered cavity has been achieved. This increase in efficiency has been done without increasing the length of the wave-beam interaction area. CST and KLYC software have been used to prove this claim.

Key words: Klystron, Efficiency, Electron beam, Resonator, Clustered cavity, Bunching.

ایمیل نویسنده مسئول: ali_jafari@ihu.ac.ir

۱-مقدمه

با توجه به اهمیت روزافزون لامپ‌های کلایسترون[i] در صنعت مخابرات، نیازمند دستیابی به لامپ‌هایی با توان و بازدهی بالا می‌باشیم. با توجه به این‌که ناحیه برهمکنش لامپ تاثیر بسیار زیادی بر روی بازدهی آن می‌گذارد، بنابراین برای افزایش بازدهی لامپ کلایسترون بر روی این قسمت بیشتر تمرکز شده است[۱]. مهمترین عامل تاثیرگذار بر روی بازدهی کلایسترون، مربوط به دسته‌بندی کردن الکترون‌ها می‌باشد. فرآیند دسته‌بندی کردن بهینه الکترون‌ها، فرآیند پیچیده‌ای می‌باشد که به دقت بالایی نیاز دارد. در سال‌های اخیر روش‌های جدید CSM [۲]، BAC [۳] و COM [۴] برای دسته‌بندی الکترون‌ها پیشنهاد شده‌است که هر کدام دارای نقاط ضعفی می‌باشند. نقطه ضعف روش COM، افزایش طول لامپ در اثر افزایش ناحیه تعاملی موج با پرتو و برای روش‌های BAC و CSM، پیچیدگی ناحیه تعاملی موج با پرتو در اثر افزایش تعداد محفظه‌های دسته‌بندی کننده می‌باشد. در این مقاله با استفاده از محفظه گروهی در طراحی دسته‌بندی الکترون‌ها، افزایش بازدهی بدون افزایش در طول و تعداد محفظه لامپ صورت گرفته است. این روش را می‌توان اصلاحی بر روش افزایش طول COM، در نظر گرفت.

در این مقاله برای افزایش بازدهی کلایسترون، مدل طراحی دسته‌بندی جدید با استفاده از جایگزینی محفظه گروهی به جای تک محفظه برای بهبود نیروی دسته‌بندی کننده استفاده گردیده است. از محفظه گروهی، معمولا در محفظه خروجی برای بهبود پهنای باند کلایسترون استفاده می‌شود. برای اولین بار از محفظه گروهی برای اصلاح دسته‌بندی الکترون‌ها به منظور افزایش بازدهی در محفظه‌های میانی استفاده گردیده است. در بخش ۲، علت بهبود تاثیر محفظه گروهی نسبت به تک محفظه بر روی بهبود دسته‌بندی الکترون‌ها تشریح شده است. در بخش۳، برای اثبات این ادعا، مقایسه شبیه‌سازی یک لامپ کلایسترون در دو بعد و سه بعد، با محفظه گروهی و بدون استفاده از آن ارائه گردیده است.

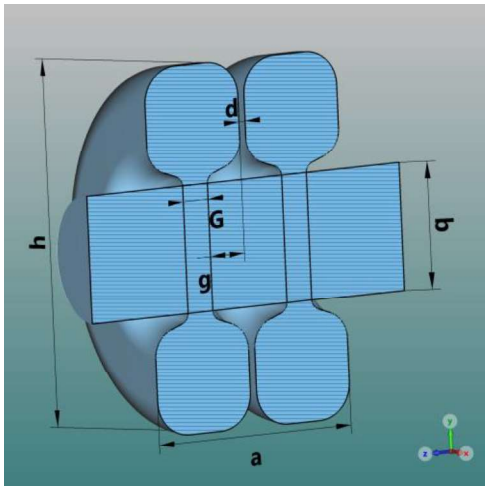
تاکنون از تشدیدکننده محفظه گروهی برای افزایش پهنای باند بیشتر در محفظه آخر، بهره برده‌اند که با ثابت ماندن و یا کاهش اندکی در بازدهی همراه بوده‌است[۵]. در این مقاله با جایگزین کردن تشدیدکننده‌های میانی تک محفظه با گروه محفظه‌ای نه‌تنها بازدهی کاهش نیافته بلکه برای افزایش بازدهی لامپ کلایسترون نیز استفاده شده‌است. در ادامه به معرفی و مقایسه این نوع محفظه‌ها پرداخته شده است و به مزیت آن در بهبود دسته‌بندی نسبت به محفظه‌های ساده اشاره شده است.

۲-رزوناتورهای تک محفظه و گروه محفظه‌ای

مفهوم اصلی تشدیدکننده محفظه گروهی[ii] توسط سیمونز[۶] مطرح گردید. در تشدیدکننده محفظه گروهی مقدار M کاهش و R/Q افزایش پیدا می‌کند. با وجود اینکه دسته‌بندی توسط دو یا چند محفظه که در کنار هم قرار گرفته‌اند انجام می‌شود و طول تعامل بیشتری نسبت به تک محفظه دارد، مقدار دسته‌بندی با توجه به رابطه۱ کاهش می‌یابد[۷].

$$F = M^2 \times R/Q \qquad (۱)$$

در رابطه۱، F، معرف شاخص دسته‌بندی پرتو است که با M، ضریب تزویج پرتو و R/Q، پارامتر وابسته به هندسه محفظه رابطه دارد. این مقادیر رابطه مستقیمی با طول شکاف[iii] محفظه دارند به طوریکه افزایش طول شکاف باعث افزایش R/Q می‌شود اما مقدار M را کاهش می‌دهد. بنابراین در طراحی بهینه باید اندازه مناسب شکاف با توجه به میزان خروجی برای شاخص دسته‌بندی پرتو F در رابطه۱ برای محفظه تعیین گردد در ادامه نشان خواهیم داد که مقدار F برای گروه محفظه‌ای بیشتر از تک محفظه است بنابراین تاثیر گروه محفظه بر روی دسته‌بندی پرتوها بیشتر خواهد بود که در نتیجه آن می‌توان ساختاری برای رسیدن به بازدهی‌های بالا طراحی کرد[۸]. در شکل۱ پارامترهای ابعادی محفظه گروهی قابل مشاهده است. در ادامه به بهبود پارامترهای الکتریکی آن با توجه به جابه‌جایی شکاف محفظه پرداخته خواهدشد.



شکل ۱- پارامترهای رزوناتور محفظه گروهی

یکی از پارامترهای مهم در طراحی لامپ کلایسترون، ضریب تزویج پرتو (M Factor) است. این ضریب، تعامل بین پرتو و میدان‌های محفظه تشدید را توصیف می‌کند و نشان می‌دهد که چقدر از توان پرتو با طول شکاف داده شده جفت می‌شود. بازده لامپ کلایسترون با توان 2n از M Factor رابطه دارد که n تعداد محفظه را مشخص می‌کند. بنابراین افزایش M Factor باعث بهتر شدن تعامل بین پرتو و میدان محفظه و افزایش چشمگیری در بازده لامپ کلایسترون می‌گردد. پارامتر M به صورت نسبت بین ولتاژ موثر روی مدولاسیون پرتو به ولتاژ RF در امتداد ناحیه تعامل تعریف می‌شود (رابطه۲)[۹].

$$M = \frac{V_{eff}}{V_{RF}} = \frac{\left| \int_{-\infty}^{+\infty} E_z(z) e^{-jB_e z} dz \right|}{\int_{-\infty}^{+\infty} |E_z(z)| dz} \qquad (۲)$$

که $E_z(z)$ میدان الکتریکی می‌باشد.

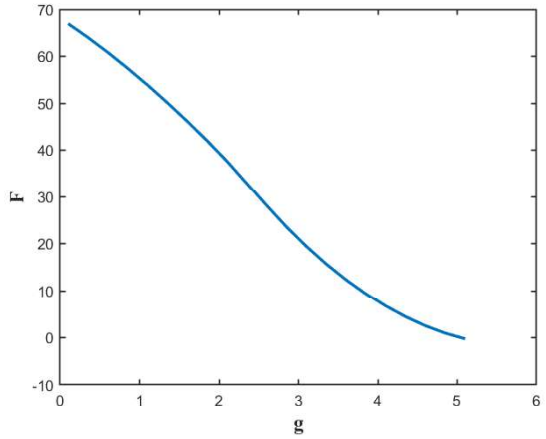
پارامتر بعدی نسبت امپدانس شنت[iv] محفظه (نسبت ولتاژ در شکاف به تلفات دیواره محفظه) به Q محفظه (نسبت انرژی ذخیره شده در محفظه به تلفات دیواره محفظه)، R/Q است که به صورت رابطه۳ تعریف می‌گردد.

$$R/Q = \frac{\frac{|V|^2}{W}}{\frac{2\omega U}{W}} = \frac{\left(\int_{-\infty}^{+\infty} |E_z|\,dz\right)^2}{2\omega U} \qquad (۳)$$

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 می‌توانند دارای R/Q یکسانی باشند. R/Q یکی از پارامترهای مهم در طراحی لامپ کلایسترون است که با بازده لامپ رابطه مستقیمی دارد و افزایش آن باعث افزایش بازدهی لامپ می‌گردد[۹].

۳-نتایج و بحث

از آنجایی که تاثیر میدان تشدیدکننده بر روی دسته‌بندی پرتوها در یک محفظه طبق رابطه۱ با M^2 و R/Q رابطه دارد و این دو پارامتر با تغییر طول شکاف تغییر می‌کنند، باید از طول شکافی استفاده شود که مقدار F بیشینه گردد. از آنجایی که طول شکاف محفظه گروهی بزرگتر است و افزایش طول شکاف باعث افزایش R/Q ولی کاهش M می‌شود. بنابراین چون شاخص F با مقدار پارامتر M از مرتبه دوم رابطه دارد و تاثیر بیشتری می‌پذیرد، بنابراین مقدار این شاخص برای تک محفظه بیشتر خواهد شد. با استفاده از جابه‌جایی شکاف برای محفظه گروهی وکاهش مقدار g، میزان کاهش M کمتر خواهد شد و درنتیجه موجب افزایش F با توجه به شکل۲ می‌گردد. در ادامه با طراحی محفظه گروهی با شکاف اصلاح شده، میزان شاخص F بالاتری نسبت به تک محفظه حاصل گردیده که منجر به طراحی لامپ کلایسترون با بازدهی بیشتری نسبت به تک محفظه شده‌است.

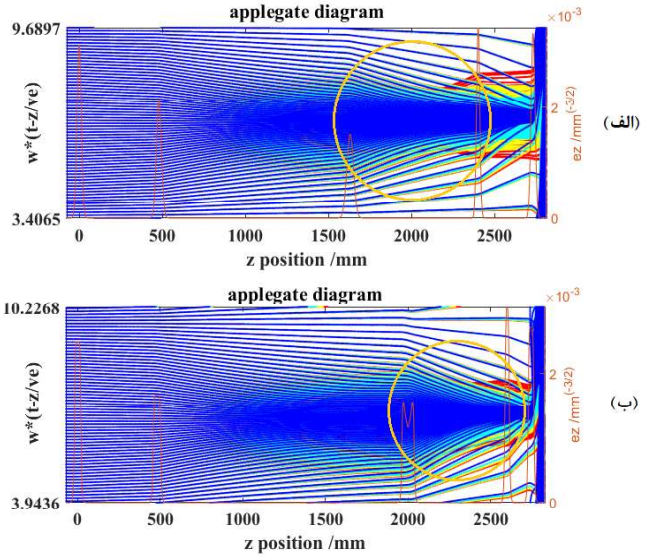


شکل ۲- تغییرات شاخص F با پارامتر g.

برای بررسی میزان تاثیر استفاده از تشدیدکننده محفظه گروهی، اصلاح ساختار از قبل طراحی شده با استفاده از تک محفظه و جایگزینی محفظه گروهی و تاثیر افزایش بازدهی بررسی شده‌است. در شکل۳ (الف) ملاحظه می‌کنید دیاگرام اپلگیت[v] ساختار طراحی شده با پنج تک محفظه[۲] برای فرکانس ۱گیگاهرتز نشان داده شده‌است. با جایگزین کردن محفظه سوم از این ساختار با محفظه گروهی با همان فرکانس ولی با پارامترهای الکتریکی متفاوت (جدول۱) و طراحی دوباره، شکل۳ (ب) حاصل گردیده‌است. با مقایسه این دو ساختار در شکل۳ (الف) و (ب) مشاهده می‌کنید که سرعت الکترون‌ها با شیب تندتری در شکل (ب) نسبت به (الف) به سمت هسته دسته‌بندی متمایل شده‌است. بنابراین محفظه گروهی استفاده شده میزان دسته‌بندی پرتو را افزایش داده‌است. در این ساختار قبل از محفظه گروهی بازدهی ۷۳.۳۵ درصد و بعد از استفاده، ۷۵.۹۸ درصد در طول دسته‌بندی یکسان، حاصل گردیده‌است. مشخصات لامپ کلایسترون و پارامترهای به کاربرده شده در طراحی با محفظه گروهی در شکل۴ قابل ملاحظه است.

جدول ۱- مقایسه تک محفظه، محفظه گروهی اولیه (برای محفظه‌های مشابه همدیگر) و محفظه گروهی بهینه‌شده.

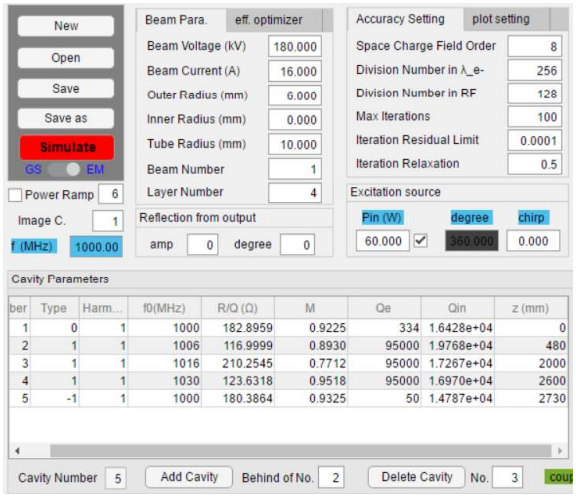
نوع رزوناتور	M	R/Q	F
تک محفظه	0.8192	102.0570	68.49
محفظه گروهی بهینه‌شده	0.7712	210.2545	125.05



شکل ۳- شبیه‌سازی دسته‌بندی الکترون‌ها در نرم‌افزار KLYC (الف) با استفاده از تک محفظه (ب) با محفظه گروهی

شکل۵، تشدیدکننده محفظه گروهی استفاده شده در ساختار بازطراحی شده را نشان می‌دهد که اندازه‌های مربوط به آن در جدول۲ آورده شده‌است. در جدول۱ میزان شاخص F برای تک محفظه و محفظه گروهی بهینه‌شده با شکاف اصلاح شده، نشان داده شده‌است. توزیع میدان‌های الکتریکی، مغناطیسی و انرژی ذخیره شده در تشدید کننده

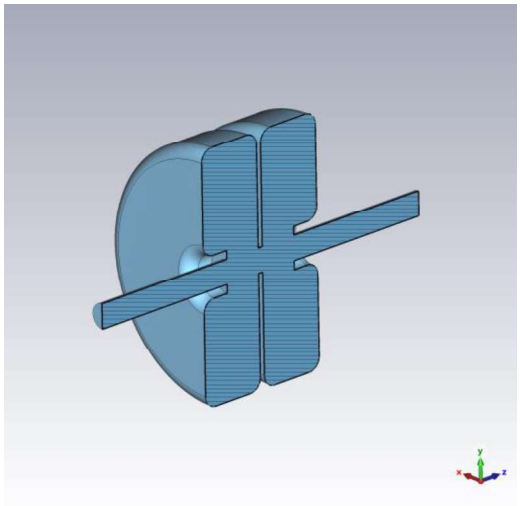
محفظه گروهی توسط نرم‌افزار KLYC در شکل ۶ قابل مشاهده است.



شکل ۴- داده‌های شبیه‌سازی برای محفظه گروهی.

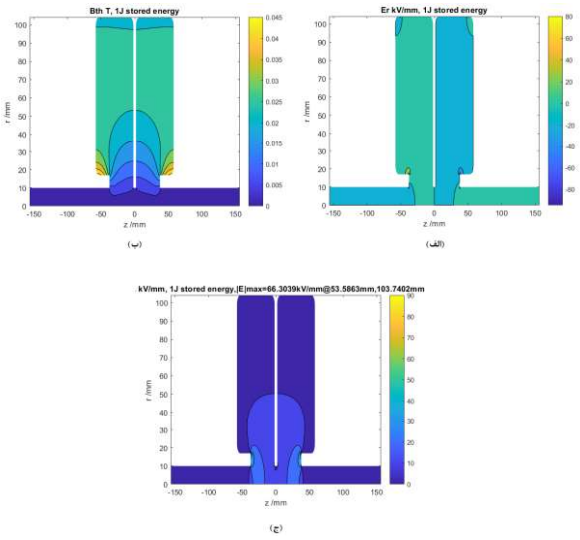
جدول ۲- اندازه‌های بهینه شده برای محفظه گروهی برای فرکانس تشدید ۱۰۱۶ مگاهرتز

پارامترهای رزوناتور محفظه گروهی	اندازه (mm)
a	112
b	20
h	204
G	31
d	4
g	0.1

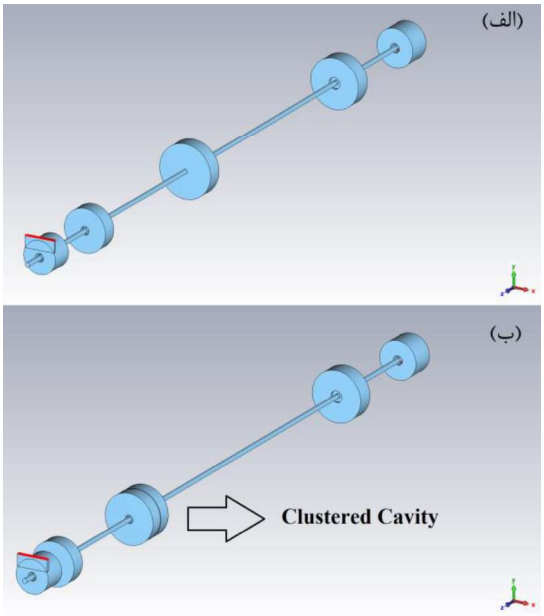


شکل ۵- تشدیدکننده استفاده شده در شبیه‌سازی محفظه گروهی که برای فرکانس ۱۰۱۶ مگاهرتز طراحی شده‌است.

در ادامه برای اطمینان از صحت نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی دوبعدی، لامپ طراحی شده، در سه بعد نیز پیاده سازی گردیده‌است. در شکل۷، نمای سه‌بعدی لامپ کلایستروِن با محفظه گروهی و بدون آن، نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌کنید، محفظه سوم در شکل۷ (ب) از نوع محفظه گروهی با دو محفظه می‌باشد که جایگزین محفظه سوم در شکل۷ (الف) شده است.



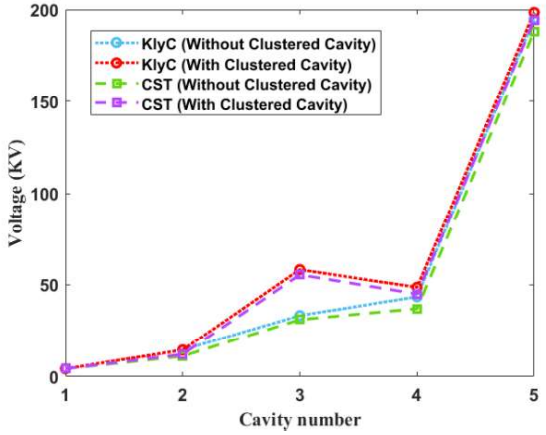
شکل ۶- میدان تشدیدکننده محفظه گروهی. (الف) میدان الکتریکی (ب) میدان مغناطیسی (ج) انرژی ذخیره شده.



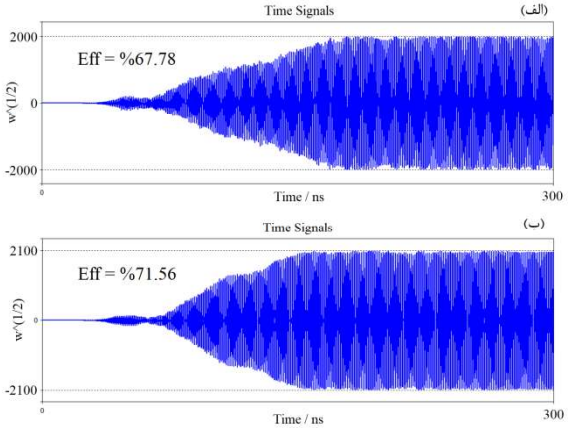
شکل ۷- الف) نمای سه‌بعدی از لامپ در حالت بدون استفاده از محفظه گروهی، ب) نمای سه بعدی لامپ در حالت با استفاده از محفظه گروهی.

در شکل۸، ولتاژ محفظه‌های لامپ کلایستروِن برای محفظه گروهی و بدون استفاده از محفظه گروهی، با استفاده از دو نرم‌افزار CST و KlyC، نشان داده‌شده است. همانطور که ملاحظه می‌کنید، ولتاژ شکاف محفظه سوم، در حالت محفظه گروهی نسبت به محفظه ساده، با جهش بزرگی مواجه شده است. این جهش ولتاژ، در بهبود دسته‌بندی پرتو الکترونی و بازدهی خروجی تاثیر مثبت گذاشته است. با پیاده سازی تست گرم برای دو لامپ نشان داده شده در شکل۷، ملاحظه می‌کنید، توان خروجی 1.952MW و بازدهی 67.78% برای حالت بدون محفظه گروهی حاصل گردیده است که در شکل۸ (الف) قابل مشاهده است. همچنین برای لامپ طراحی شده با استفاده از محفظه گروهی،

توان خروجی 2.061MW و بازدهی 71.56% حاصل گردیده است که در شکل۸ (ب) توان خروجی بر حسب زمان برای حالت با استفاده از محفظه گروهی قابل مشاهده می‌باشد. دقت کنید که در شکل ۸، برای به‌دست آوردن توان خروجی، باید بعد از پایدار شدن خروجی بر حسب زمان، اندازه متوسط خروجی پایدار شده تعیین گردیده و سپس با محاسبه نصف مجذور آن توان خروجی به‌دست خواهد آمد. بازدهی خروجی، برابر نسبت درصد توان خروجی به توان ورودی اعمالی می‌باشد.

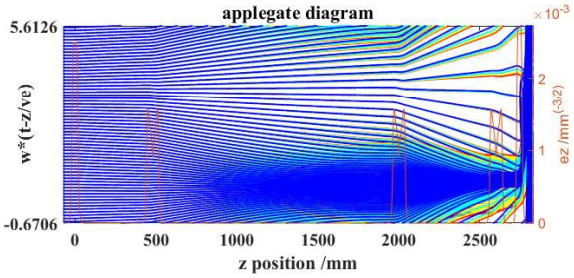


شکل ۸- مقایسه ولتاژ محفظه‌ها برای دو بعدی و سه‌بعدی در حالت بدون محفظه گروهی و با محفظه گروهی.

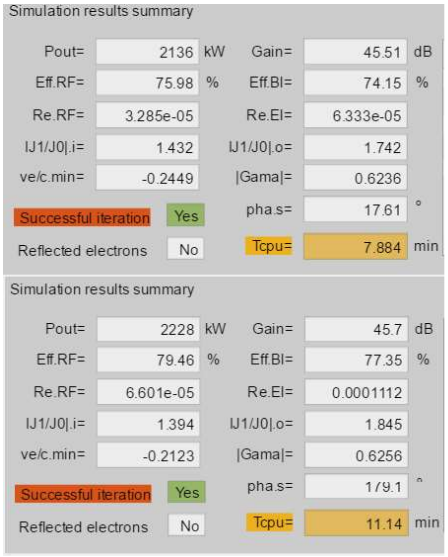


شکل ۹- توان خروجی بر حسب زمان در تست گرم، الف) بدون محفظه گروهی، ب) با محفظه گروهی

لامپ طراحی شده با سه محفظه گروهی در همان طول لامپ قبلی طراحی گردیده‌است. میزان بازهی حاصل شده برای لامپ طراحی شده با یک محفظه گروهی و سه محفظه گروهی در شکل۱۱ نشان داده شده‌است. همانطور که ملاحظه می‌کنید برای یک محفظه گروهی افزایش بازدهی ۲/۶۳ درصد و برای سه محفظه گروهی ۶/۱۱ درصد حاصل شده‌است. برای دستیابی به بازدهی بیشتر، تمامی محفظه‌های میانی لامپ طراحی شده با محفظه گروهی جایگزین شده و ساختار جدیدی طراحی گردیده‌است که در شکل۱۰ دیاگرام آن را ملاحظه می‌کنید. اطلاعات پارامترهای الکتریکی لامپ طراحی شده در جدول۳ نشان داده شده‌است.



شکل ۱۰- دیاگرام اپلگیت برای طراحی با سه محفظه گروهی.



شکل ۱۱- نتایج شبیه‌سازی برای (الف) استفاده از یک محفظه گروهی (ب) سه محفظه گروهی.

Cavity Parameters

ber	Type	Harm...	f0(MHz)	R/Q (Ω)	M	Qe	Qin	z (mm)
1	0	1	1000	182.8959	0.9225	334	1.6428e+04	0
2	1	1	1006	209.6749	0.6905	95000	1.8428e+04	480
3	1	1	1016	206.9464	0.7131	95000	1.9428e+04	1996
4	1	1	1030	201.4851	0.7342	95000	1.7428e+04	2604
5	-1	1	1000	180.3864	0.9325	50	1.4787e+04	2730

جدول ۳- پارامترهای محفظه‌های استفاده شده برای طراحی با سه محفظه گروهی.

۳-نتیجه‌گیری و بحث

در این مقاله، نشان داده شد که با توجه به مزیت نیروی دسته‌بندی کننده بیشتر محفظه گروهی، می‌توان به طراحی‌های مناسبی برای دسته‌بندی بهتر الکترون‌ها دست پیدا کرد و دسته‌بندی بهتر موجب افزایش بازدهی و توان خروجی کلایسترون می‌گردد. بنابراین با استفاده از جایگزینی رزوناتورهای محفظه گروهی با شکاف اصلاح شده به جای تک محفظه، می‌توان به بازدهی‌های بالاتر بدون افزایش در طول لامپ کلایسترون، دست یافت. در آینده برای ادامه روش پیشنهادی این مقاله، برای بهبود بیشتر بازدهی، می‌توان کلایسترون‌هایی با تعداد زیر محفظه‌های بیشتر برای گروه محفظه‌ای استفاده کرد. همچنین می‌توان این روش را با روش‌های دسته‌بندی جدید COM برای بهبود دسته‌بندی و یا کاهش طول موثر دسته‌بندی الکترون‌ها در لامپ کلایسترون، ترکیب کرد.

٤-مراجع

[1] Liu, Z., H. Zha, J. Shi, and H. Chen, Study on the efficiency of klystrons. IEEE Transactions on Plasma Science, 2020. 48(6): p. 2089-2096.

[2] Baikov, A.Y. and O. Baikova. *On the Synthesis of High-Efficiency CSM Klystrons by the «Embedding» Method*. in *2018 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE)*. 2018. IEEE.

[3] Guzilov, I. *BAC method of increasing the efficiency in klystrons*. in *2014 Tenth International Vacuum Electron Sources Conference (IVESC)*. 2014. IEEE.

[4] Baikov, A. and O .Baikova, *New high-efficiency resonant O-type devices as the promising sources of microwave power.* Energies, 2020. **13**(10): p. 2514.

[5] Bansiwal, A., et al., *A post-loaded rectangular reentrant cavity for broadband multiple-beam klystron.* IEEE Electron Device Letters, 2020. **41**(6): p. 916-919.

[6] Miao, Y., et al., *Prebunching of electrons in harmonic-multiplying cluster-cavity gyro-amplifiers.* IEEE transactions on plasma science, 2004. **32**(3): p. 970-980.

[7] Swati, M., M. Chauhan, and P. Jain, *Clustered-cavity approach for the performance improvement of a Ka-band second-harmonic gyroklystron amplifier.* IEEE Transactions on Electron Devices, 2020. **67**(3): p. 1240-1247.

[8] Gilmour, A., *Klystrons, traveling wave tubes, magnetrons, crossed-field amplifiers, and gyrotrons*. 2011: Artech House.

[9] Cai, J. and I. Syratchev, *KlyC. The 1D/1.5 D large signal computer code for the klystron simulations. User manual*. 2018.