Applied Electromagnetics

Vol. 12, No.2, 2024 (Serial No. 28), pp. 1-5
ISSN: 2645-5153 , E-ISSN: 2821-2711

Using a clustered cavity resonator to improve the output efficiency of the klystron tube

A. Jafari , Y. Qaneh Qarehbagh , E. Hamidi , S.A. Ashrafi gharyehali

❋Assistant Professor, Imam HusseinUniversity, Tehran, Iran.

(Received: 2024/07/03 revised: 2024/09/25 Accepted:2024/10/09 published: 2024/11/06)

Abstract

In this article, the method of replacing the clustered cavity resonator instead of a single cavity is used in order to increase the interaction of the cavity field with the electron beam. In this method, the length of the electrons bunching is reduced, which reduces the weight and dimensions of the klystron tube. In this article, three designs have been made using clustered cavity resonator. In the first design, by placing a clustered cavity resonator instead of one of the middle cavity of the klystron tube designed for a frequency of 1 GHz, almost the same efficiency has been achieved in a shorter length. In the second design, we have achieved a 4.51% increase in efficiency for the same length. In the third design, by combining the core oscillation method (COM) with the clustered cavity resonator, an efficiency of 84.67% has been achieved, which compared to the COM method without clustered cavity, an increase in efficiency of 5.25% and a total of 11.32% compared to the prototype.

Keywords: Klystron, L-band, KlyC, CST, Output power, Efficiency, Clustered cavity

Cite this article: A. Jafari , Y. Qaneh Qarehbagh , E. Hamidi , S.A. Ashrafi gharyehali"Using a clustered cavity resonator to improve the output efficiency of the klystron tube," Applied Electromagnetics , vol.12 , no.2 , pp.1-5 .

DOR: https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455153.1403.12.2.1.1

OPEN ACCESS © The Author(s).

Publisher: Imam Hossein University

*Corresponding Author Email: yqane@ihu.ac.ir

«الکترومغناطیس کاربردی»
سال دوازدهم، شماره ۲،پاییز و زمستان ۱۴۰۳؛ ص ۵-۱
شاپا الکترونیکی: ۲۷۱۱-۲۸۲۱ شاپا چاپی: ۵۱۵۳-۲۶۴۵

علمی – پژوهشی

استفاده از رزوناتور محفظه گروهی به‌منظور بهبود بازده خروجی لامپ کلایسترون

علی جعفری[۱]، یعقوب قانع قره‌باغ[۲*]، عماد حمیدی[۳]، سید احمد اشرفی قریه علی[۴]

۱- دانشجوی دکتری، ۲- استادیار، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران ۳- استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر ، تهران، ایران
۴- پژوهشگر، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۱۳، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۰۴، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۱۸، انتشار: ۱۴۰۳/۰۸/۱۶)

چکیده

در این مقاله از روش جایگزین کردن تشدیدکننده محفظه گروهی به‌جای تک محفظه به‌منظور افزایش تعامل میدان محفظه با پرتو الکترونی استفاده‌شده است. در این روش، طول دسته‌بندی الکترون‌ها کاهش می‌یابد که موجب کاهش وزن و ابعاد ساخت لامپ کلایسترون می‌گردد. در این مقاله سه طراحی با استفاده از تشدیدکننده محفظه گروهی انجام‌شده است. در طراحی اول با جایگذاری یک تشدیدکننده محفظه گروهی به‌جای یکی از محفظه‌های میانی لامپ کلایسترون طراحی‌شده برای فرکانس یک گیگاهرتز میزان بازدهی تقریباً یکسان در طول کم‌تر حاصل گردیده است. در طراحی دوم به میزان ۴/۵۱ درصد افزایش بازدهی در طول یکسان دست‌یافته‌ایم. در طراحی سوم با ترکیب روش نوسانات هسته (COM) با تشدیدکننده محفظه گروهی، بازدهی ۸۴/۶۷ درصد حاصل گردیده است که در مقایسه با روش COM بدون محفظه گروهی افزایش بازدهی ۵/۲۵ درصدی و در کل نسبت به نمونه اولیه ۱۱/۳۲ درصد ایجاد گردیده است.

کلیدواژه‌ها: رزوناتور، محفظه گروهی، روش نوسانات هسته، کلایسترون، دسته‌بندی الکترون‌ها.

۱- مقدمه

دستاوردهای سال‌های اخیر درزمینه‌ی شتاب‌دهنده‌های ذرات بنیادی، ماهواره‌ها و رادارها به طراحی کلایسترون‌ها مربوط می‌گردد. کلایسترون‌ها، تقویت‌کننده‌های امواج ماکروویوی هستند. در این تقویت‌کننده‌ها، سیگنال خروجی تقویت‌شده، انرژی خودش را از منبع DC یا منبع توان پالسی می‌گیرد. پرتو الکترونی به‌واسطه ولتاژ منبع، انرژی لازم برای شتاب گرفتن را دریافت می‌کند. سپس به‌واسطه محفظه‌های تعبیه‌شده در مسیر حرکت الکترون‌ها، پرتو الکترونی، دسته‌بندی می‌شود. در محفظه آخر، شتاب الکترون‌ها، توسط میدان ماکروویوی گرفته می‌شود و انرژی جنبشی پرتو به موج ماکروویو منتقل می‌شود[۱].

افزایش بازدهی چنین کلایسترون‌هایی یک مسئله‌ی منحصربه‌فرد است، که نیاز به تحقیقات اساسی در فرآیندهای برهمکنش باریکه الکترونی با میدان محفظه‌ها دارد. کارهای بسیار زیادی برای افزایش بازدهی در راستای کاهش مصرف و سایز لامپ‌های کلایسترون مورداستفاده، صورت گرفته است. اخیراً، روش‌های جدید دسته‌بندی پرتو الکترونی COM[۲]، CSM[۳] و BAC[۴] برای دستیابی به بازدهی بالا پیشنهادشده‌اند. با بررسی این روش‌های نوین برای افزایش بازدهی و تغییر در ساختار محفظه‌های لامپ کلایسترون، مشاهده می‌شود که بازدهی لامپ کلایسترون تا حدودی نسبت به مدل‌های قبلی افزایش‌یافته است. این روش‌های جدید نیز دارای ایراداتی هستند. در این مقاله، به اصلاح ایراد کلایسترون COM با طراحی دوباره آن پرداخته‌شده است. برای اصلاح، از رزوناتور محفظه گروهی و تغییر در ساختار قرارگیری محفظه‌ها در طول لوله رانش[۱]، برای افزایش بازدهی خروجی استفاده‌شده است. طول بزرگ برای فرکانس‌های زیر ۱ گیگاهرتز یک مشکل اساسی به‌حساب می‌آید (طول استاندارد برای

[۱] Drift tube

استناد: جعفری،علی، قانع قره باغ ، یعقوب ،حمیدی ، عماد، اشرفی قریه علی ، سید احمد،" استفاده از رزوناتور محفظه گروهی به منظور بهبود بازده خروجی لامپ کلایسترون...."، الکترو مغناطیس کاربردی، ۱۲ (۲)، ۵-۱، ۱۴۰۳. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455153.1403.12.2.1.1

ناشر: **دانشگاه جام امام حسین(ع).**

OPEN ACCESS
© **نویسندگان.**

* رایانامه نویسنده مسئول: yqane@ihu.ac.ir

این فرکانس حدود ۲متر یا بیشتر تشخیص داده‌شده است). همچنین لامپ با طول بزرگ‌تر دارای معایب هزینه و وزن بالا است. با توجه به مقالات گزارش‌شده، کلایسترون COM از طول استاندارد ۶۰ درصد بلندتر است که نشان می‌دهد طول این‌گونه لامپ‌ها بلندتر و به طبع آن گران‌تر نیز هستند. در ادامه به پیاده‌سازی روش پیشنهادی برای رفع عیب روش COM پرداخته‌شده است[۵].

۲- بررسی تأثیر تشدیدکننده محفظه گروهی بر روی دسته‌بندی الکترون‌ها

دسته‌بندی الکترون‌ها در تشدیدکننده محفظه گروهی، توسط چند محفظه کوتاه که فاصله بسیار نزدیکی با همدیگر دارند و همگام با یکدیگر عمل می‌کنند، انجام می‌شود. فاصله بین شکاف محفظه‌ها در تشدیدکننده محفظه گروهی، باید به‌قدری به همدیگر نزدیک شوند تا جفت‌شدگی[1] قابل‌ملاحظه‌ای بین آن‌ها شکل نگیرد. فرکانس تشدید محفظه‌ها در محفظه گروهی، می‌تواند شبیه یکدیگر یا متفاوت از همدیگر باشد. اگر فرکانس‌ها متفاوت از همدیگر باشند، باید حتماً همپوشانی داشته باشند. یکی از راه‌های توضیح بهبود بازدهی در رزوناتورهای محفظه گروهی این است که فرض کنیم تمامی محفظه‌ها در فرکانس تشدید یکسان تنظیم‌شده‌اند. به‌طوری‌که، به‌صورت هماهنگ، دسته‌بندی پرتو را توسط چند محفظه انجام می‌دهند. اگر با دیدگاه مداری به این قضیه نگاه کنیم، در تحلیل سیگنال کوچک، ولتاژ دو سر مدار برای تک محفظه نشان داده‌شده در شکل (۱). (الف) از رابطه (۱) به دست می‌آید[۶].

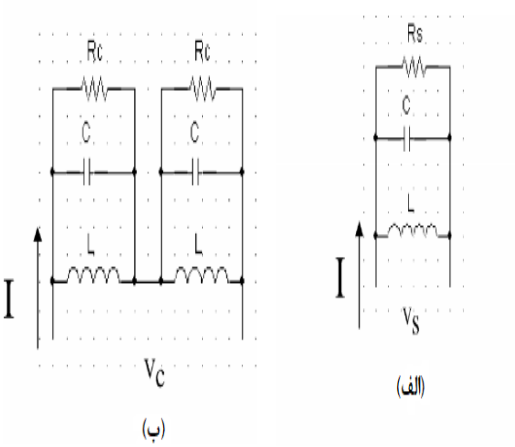
$$V_s = I\sqrt{\frac{L}{C}}\frac{Q_s}{1-j2Q_s\dfrac{(\omega-\omega_{res})}{\omega_{res}}} \qquad (۱)$$

Q_s ضریب کیفیت‌مدار و ω_{res} فرکانس رزونانس مدار است.

برای m محفظه در رزوناتور محفظه گروهی (برای دو محفظه در شکل (۱). (ب) نشان داده‌شده است) ولتاژ محفظه‌ها به‌صورت سری باهم جمع می‌شوند و ولتاژ کل حاصل، طبق رابطه (۲) به دست می‌آید[۶].

$$V_c = I\sqrt{\frac{L}{C}}\frac{mQ_c}{1-j2Q_c\dfrac{(\omega-\omega_{res})}{\omega_{res}}} \qquad (۲)$$

Q_c، ضریب کیفیت[2] برای هرکدام از محفظه‌ها در رزوناتور محفظه گروهی است.



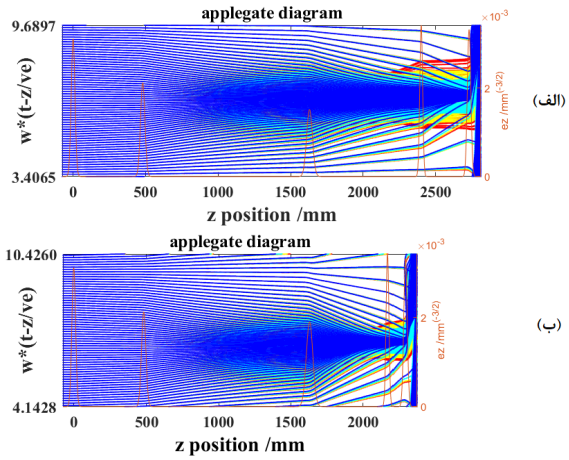
شکل (۱). (الف) مدار معادل تشدیدکننده تک محفظه و (ب) محفظه گروهی.

برای اثبات افزایش ولتاژ دسته‌بندی پرتو می‌توانیم از دیدگاه مداری به این قضیه نگاه کنیم. بنابراین، دو محفظه یکسان با تک محفظه، برای محفظه گروهی داریم. این دو محفظه کنار هم، دارای دو امپدانس سری می‌باشند که هرکدام با امپدانس تک محفظه برابر هستند. درنتیجه امپدانس شکاف محفظه گروهی، دو برابر امپدانس شکاف تک محفظه است. در دیدگاه مداری امپدانس بزرگ‌تر در جریان یکسان، میزان ولتاژ بزرگ‌تری ایجاد می‌کند که نتیجه می‌گیریم، ولتاژ دسته‌بندی بیشتر می‌شود.

۳- نتایج و بحث

در این قسمت برای مقایسه میزان تأثیر استفاده از محفظه‌های گروهی بر روی بازدهی، از طراحی انجام‌شده برای یک کلایسترون با فرکانس کاری ۱ گیگاهرتز استفاده‌شده است. در طراحی این کلایسترون، یک پرتو توپر به شعاع ۶ میلی‌متر، با ولتاژ پرتو ۱۸۰ کیلوولت و جریان پرتو ۱۶ آمپر، به‌کاربرده شده است. همچنین در ساختار برهمکنش کلایسترون، از پنج محفظه ساده، استفاده‌شده است. برای کلایسترون‌های طراحی‌شده با محفظه گروهی نیز از همین مشخصات استفاده‌شده است. در شکل(۲). (الف) شبیه‌سازی دسته‌بندی الکترون‌ها، برای کلایسترون پنج محفظه‌ای، با استفاده از نرم‌افزار KLYC دوبعدی نشان داده‌شده است. نرم‌افزار KLYC، دقیق‌تر است و میزان بازدهی کمتری به ترتیب، حدوداً ۳ الی ۶ درصد و ۶ الی ۱۰ درصد را نسبت به نرم‌افزارهای Ajdisc و KlypWin در شرایط یکسان دارد[۹-۷]. این کلایسترون، از روش کلاسیک دسته‌بندی الکترون‌ها برای افزایش بازدهی لامپ کلایسترون، بهره می‌برد که تمام محفظه‌ها از نوع تک محفظه می‌باشند. میزان بازدهی به‌دست‌آمده برای این کلایسترون برابر ۷۳/۳۵ درصد با طول لوله رانش ۲۷۳۰ میلی‌متر است[۱۰].

[1] Coupling
[2] Quality factor



شکل (۲). شبیه‌سازی دسته‌بندی الکترون‌ها (الف) طراحی‌شده برای فرکانس ۱ گیگاهرتز با محفظه‌های ساده و (ب) استفاده از جایگزینی محفظه سوم با یک محفظه گروهی.

همان‌طور که در شکل(۲). (ب) مشاهده می‌کنید، برای نشان دادن میزان تأثیر محفظه گروهی بر روی دسته‌بندی الکترون‌ها، محفظه سوم این کلایسترون با یک محفظه گروهی جایگزین گردیده است.

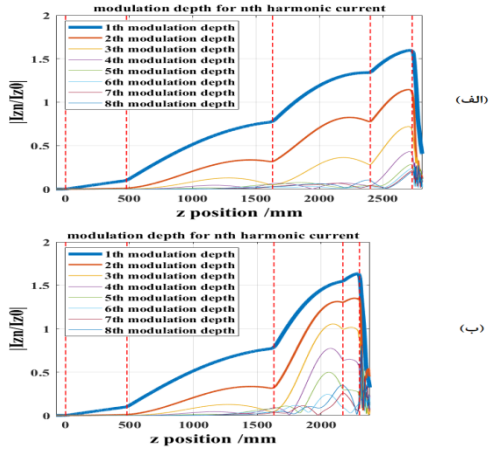
بعد از جایگزینی و شبیه‌سازی دوباره دسته‌بندی الکترون‌ها، مشاهده می‌کنید که سرعت الکترون‌ها با شیب تندتری بعد از محفظه گروهی به همدیگر نزدیک شده‌اند که موجب کوتاه شدن طول دسته‌بندی الکترون‌ها می‌شود. در طراحی انجام‌شده با این روش، میزان بازدهی ۷۲/۹۷ درصد در طول ۲۲۹۰ میلی‌متر حاصل گردیده است. با استفاده از این روش، در بازدهی تقریباً یکسان، اندازه طول لامپ ۴۴۰ میلی‌متر کاهش پیداکرده است. کاهش طول لامپ، موجب کاهش ابعاد آن و به طبع آن کاهش مصرف مواد خام به‌کاررفته در ساخت و درنتیجه کاهش هزینه می‌گردد. در جدول (۱) فرکانس کاری و فاصله محفظه‌ها از همدیگر برای طراحی با استفاده از محفظه گروهی نشان داده‌شده است.

جدول (۱). مشخصات محفظه‌ها برای طراحی با استفاده از یک عدد محفظه گروهی.

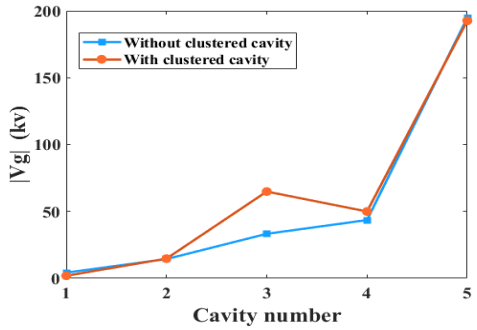
Z (mm)	R/Q	M	(Hz) Frequency
0	182.8959	0.9225	1000
480	116.9999	0.8930	1006
1640	210.0524	0.7715	1016
2170	123.6318	0.9518	1030
2290	180.3864	0.9325	1000

در شکل (۳) نمودار جریان القایی دو لامپ طراحی‌شده نشان داده‌شده است. همان‌طور که از شکل پیداست، جریان‌های القایی دو طراحی با همدیگر برابر هستند، ولی لامپی که از محفظه گروهی استفاده کرده است در طول کمتر به جریان القایی یکسان، دست پیداکرده است.

برای درک بهتر موضوع و مشاهده افزایش ولتاژ دسته‌بندی، ولتاژ شکاف محفظه‌های دو لامپ کلایسترون طراحی‌شده با محفظه گروهی و بدون محفظه گروهی در شکل (۴) نشان داده‌شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌کنید، ولتاژ محفظه سوم از نوع محفظه گروهی، خیلی بیشتر از نوع تک محفظه است. هر دو لامپ درنهایت، تقریباً به یک ولتاژ رسیده‌اند، ولی تأثیر محفظه گروهی طبق شکل (۲) باعث شده است که لامپ دارای محفظه گروهی، در طول کمتر این کار را انجام دهد.



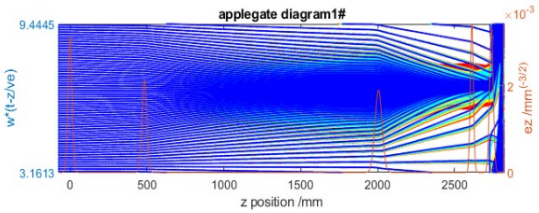
شکل (۳). عمق مدولاسیون برای هارمونیک‌های جریان، (الف) طراحی بدون محفظه گروهی، (ب) طراحی با محفظه گروهی.



شکل (۴). مقایسه ولتاژ محفظه‌های لامپ‌های طراحی‌شده با استفاده از محفظه گروهی و بدون استفاده از محفظه گروهی.

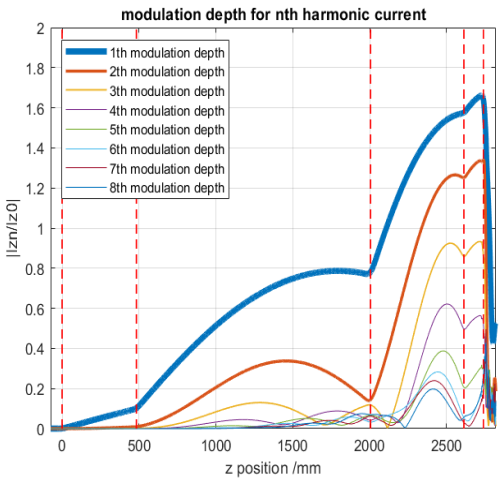
برای بررسی میزان افزایش بازدهی توسط تغییر ساختار یک محفظه از پنج محفظه کلایسترون طراحی‌شده قبلی، طراحی دیگری با استفاده از یک تشدیدکننده محفظه گروهی به‌جای محفظه سوم انجام‌شده است. این بار در همان طول ۲۷۳۰ میلی‌متر، بازدهی ۷۷/۸۶ درصد با استفاده از بهینه‌سازی توسط نرم‌افزار Klyc حاصل‌شده است. در این طراحی، افزایش میزان بازدهی ۴/۵۱ درصد با تغییر یک محفظه تشدید با محفظه گروهی حاصل گردیده است که در شکل (۵) قابل‌ملاحظه است.

در طراحی این کلایسترون جایگاه دو محفظه اول با طراحی قبلی یکی است ولی به دلیل ماهیت دسته‌بندی بیشتر محفظه گروهی، فرصتی فراهم‌شده است که طول نوسان ادامه پیدا کند. با افزایش طول نوسان، الکترون‌های خارج دسته‌بندی زمان بیشتری پیدا می‌کنند تا به دسته ملحق شوند. این افزایش طول با استفاده از محفظه گروهی جبران شده است و درنتیجه افزایش مقدار بازدهی، بدون افزایش طول بیشتر صورت گرفته است. درواقع یک هسته نوسان بین محفظه دوم و سوم شکل‌گرفته است. در فرآیند دسته‌بندی الکترون‌ها، ایجاد هسته نوسان نیازمند افزایش طول لامپ است. با توجه به این‌که بعد از محفظه گروهی، یک هسته نوسان شکل‌گرفته، این افزایش طول جبران می‌گردد. لذا با ترکیب روش COM با محفظه گروهی، می‌توان به بازدهی بیشتر در طول‌هایی برابر با طول دسته‌بندی کلاسیک دست‌یافت. همچنین، با این روش مشکل افزایش طول درروش COM نیز برطرف می‌گردد.



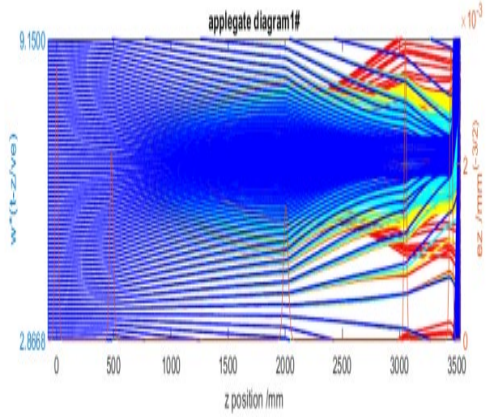
شکل (۵). نمودار دسته‌بندی الکترون‌ها با استفاده از جایگزینی محفظه گروهی با محفظه سوم.

در شکل (۶) نوسان هسته، بین محفظه دوم و سوم بر روی نمودار عمق مدولاسیون هارمونیک‌های جریان، قابل‌مشاهده است.

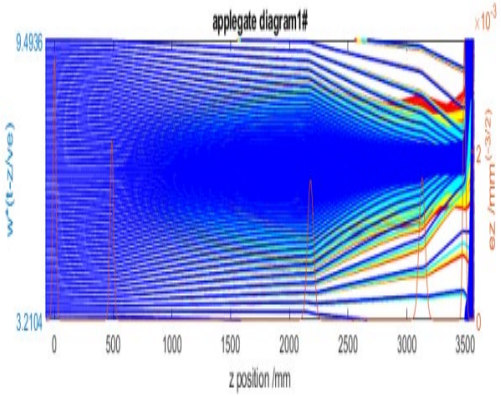


شکل (۶). عمق مدولاسیون برای هارمونیک‌های جریان برای محفظه گروهی با ترکیب یک نوسان هسته.

در ادامه برای دستیابی به بازدهی بیشتر، از طراحی با دو هسته نوسان با پنج محفظه که شامل دو محفظه گروهی میانی و سه محفظه ساده است، استفاده کرده‌ایم که شبیه‌سازی آن در شکل (۸) قابل‌ملاحظه است. میزان بازدهی به‌دست‌آمده ۸۴/۶۸ درصد در طول ۳۴۶۷ میلی‌متر با استفاده از بهینه‌سازی توسط نرم‌افزار Klyc حاصل‌شده است. بازدهی حاصل، نسبت به طراحی قبلی ۱۱/۳۳ درصد و نسبت به روش COM با پنج تک محفظه (شکل‌های ۷ و ۹)، ۵/۲۵ درصد افزایش پیداکرده است. در این طراحی لامپ کلایسترون، بعد از هر هسته نوسان، یک محفظه گروهی برای جبران طول هسته نوسان ایجادشده، استفاده‌شده است. در شکل (۸) هسته نوسان دوم ایجادشده بین محفظه سوم و چهارم به دلیل دسته‌بندی بسیار بالای محفظه گروهی، به‌صورت واضح نمایان نشده است که برای درک بهتر در شکل (۱۰) قله این هسته نوسان قابل‌مشاهده است.



شکل (۷). طراحی روش COM بدون استفاده از محفظه گروهی با ایجاد دو نوسان هسته.



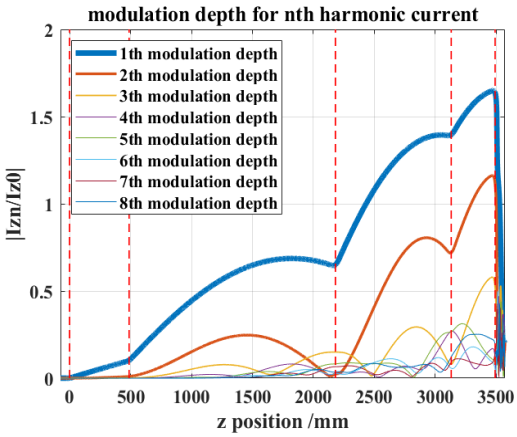
شکل (۸). طراحی روش COM با استفاده از محفظه گروهی با ایجاد دو نوسان هسته.

در جدول (۲) مشخصات محفظه‌ها و فاصله آن‌ها از همدیگر آورده شده است.

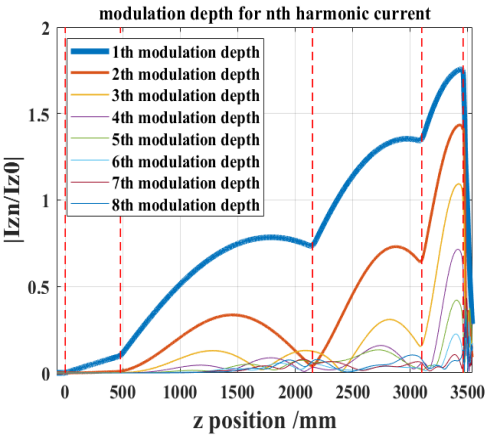
جدول (۲). مشخصات محفظه‌ها برای طراحی با استفاده از سه عدد محفظه گروهی.

Z (mm)	R/Q	M	Frequency (Hz)
0	182.8959	0.9225	1000
478	116.9999	0.8930	1006.5
2151	190.0856	0.8002	1015.5
3109	210.0524	0.7715	1029
3467	180.3864	0.9325	999.5

در شکل عمق مدولاسیون هارمونیک‌های نوسان هسته بین محفظه دوم- سوم و سوم- چهارم قابل‌مشاهده است. بعد از هر قله جریان پایین‌تر می‌آید و همان‌طور که در شکل (۱۰) قابل‌ملاحظه است، فرصتی ایجاد می‌شود تا الکترون‌های خارج دسته‌بندی به هسته نوسان اضافه شوند.



شکل (۹). عمق مدولاسیون برای هارمونیک‌های جریان برای طراحی بدون محفظه گروهی.



شکل (۱۰). عمق مدولاسیون برای هارمونیک‌های جریان برای طراحی توسط محفظه گروهی با ترکیب دو نوسان هسته.

۴- نتیجه‌گیری

استفاده از رزوناتور محفظه گروهی تأثیر بیشتری بر روی دسته‌بندی الکترون‌ها نسبت به تک محفظه می‌گذارد. با استفاده از جایگزین کردن محفظه گروهی با تک محفظه، می‌توان ایراد روش COM را که طول زیادی به ساختار می‌دهد، بهبود داد. با بهبود طول ساختار، وزن ساختار و مواد خام به‌کاررفته شده در فرآیند ساخت آن کمتر می‌شود. رسیدن به بازدهی‌های بیشتر در طول یکسان، نیز مزیت دیگر این روش است.

۵- مراجع

[1] Z.-c. Zhang, B.-l. Shen, C.-j. Fu, X.-j. Yu, F. Zhang, and Y.-p. Huang, "18.5: Development of an S-band, 200 MHz instantaneous bandwidth, 22 kW average power klystron," in 2010 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC), 2010: IEEE, pp. 4 .۴۳۸-۳۷

[2] A. Baikov and O. Baikova, "Simulation of High-Efficiency Klystrons with the COM and CSM bunching," in 2019 International Vacuum Electronics Conference (IVEC), 2019: IEEE, pp. 1-2 .

[3] A. Y. Baikov 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, pp. 17-20 .

[4] I. Guzilov, "BAC method of increasing the efficiency in Klystrons," in 2014 Tenth International Vacuum Electron Sources Conference (IVESC), 2014: IEEE, pp. 1-2 .

[5] A. Baikov and O. Baikova, "New high-efficiency resonant O-type devices as the promising sources of microwave power," Energies, vol. 13, no. 10, p. 2514, 2020.

[6] Y. Miao ,T. M. Antonsen, G. S. Nusinovich, A. N. Vlasov, H. Guo, and V. L. Granatstein, "Prebunching of electrons in harmonic-multiplying cluster-cavity gyro-amplifiers," IEEE transactions on plasma science, vol. 32, no. 3, pp. 970-980, 2004.

[7] D. A. Constable ,C. Lingwood, G. Burt, A. Y. Baikov, I. Syratchev, and R. Kowalcyzk, "MAGIC2-D simulations of high efficiency klystrons using the core oscillation method," in 2017 Eighteenth International Vacuum Electronics/ Conference (IVEC), 2017: IEEE, pp. 1-2 .

[8] C .Marrelli, "High efficiency klystron design," in RF CLIC Meeting, 2014 .

[9] J. Cai, I. Syratchev, and Z. Liu, "Klyc: Large signal simulation code for klystrons," submitted to IEEE TED, 2017.

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