



## Design and Simulation of Ka to W band Klystron Harmonic Generator using Core Oscillation Method (COM)

S. M. Razavi <sup>1</sup>, E. Hamidi<sup>2\*</sup>, S.M.J. Razavi <sup>3</sup>

\* Assistant Professor, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

(Received: 2024/03/08 revised: 2024/06/07 Accepted:2024/06/28 published: 2024/07/24)

### Abstract

*In this article, a harmonic generator based on klystron is presented, whose input signal is in Ka band and its amplified output signal is in W band. Harmonic generator design is based on Ka-band klystron, which reduces the electron beam current density in the interaction region, reduces the cathode density in the electron gun, and reduces the DC magnetic field required for electron beam convergence. Reducing the mentioned parameters reduces the challenges and complications related to the construction and increases the possibility of achieving high powers in the W band. One of the challenges of harmonic generators is their low efficiency, which has been tried to increase the electron efficiency by using the core oscillation method, which is one of the new methods for increasing the efficiency of klystron amplifiers. The designed harmonic generator structure consists of four Ka band cavity and one W band cavities. The design is done using AJDisk software and a indigenous code. The designed structure is simulated using the PIC studio of CST software. RF output power in W band (93.9 GHz frequency) is 6.4 kW with 16% efficiency. The input frequency is in the Ka band (31.3 GHz frequency). The gain of this device, which is equivalent to the ratio of output power to input power, is 53.9 dB. Extended interaction cavities have been used to reduce the voltage on the gap of the output cavity that prevents the RF breakdown..*

**Keywords:** Klystron Harmonics Generator(KHG), Vacuum Electron Device(VED), Millimeter(mm) Wave

\* Corresponding author E-mail: ehamidi@mut.ac.ir

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

**Publisher:** Imam Hussein University

© Authors





## طراحی و شبیه‌سازی مولد هارمونیک مبتنی بر لامپ کلايسترون باند Ka به W با استفاده از

## روش نوسان هسته

سید محسن رضوی<sup>۱</sup>، عماد حمیدی<sup>۲\*</sup>، سید محمدجواد رضوی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، ۲- استادیار،

۳- دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، تهران، ایران.

(دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۸، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۱۸، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۰۸، انتشار: ۱۴۰۳/۰۵/۰۳)



\* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY) توزیع شده است.

نویسندگان ©

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

## چکیده

در این مقاله، یک مولد هارمونیک مبتنی بر لامپ کلايسترون ارائه شده است که سیگنال ورودی آن در باند Ka و سیگنال خروجی تقویت شده آن در باند W است. طراحی مولد هارمونیک بر اساس کلايسترون باند Ka انجام شده است که موجب کاهش چگالی جریان پرتوی الکترونی در ناحیه برهم‌کنش، کاهش چگالی کاتد در تفنگ الکترونی و کاهش میدان مغناطیسی DC مورد نیاز برای همگرا نگه داشتن پرتوی الکترونی می‌شود. کاهش پارامترهای ذکر شده، چالش‌ها و پیچیدگی‌های مربوط به ساخت را کاسته و امکان دستیابی به توان‌های بالا در باند W را افزایش می‌دهد. یکی از چالش‌های مولدهای هارمونیک کم‌بودن بازدهی آنها است که سعی شده است با استفاده از روش نوسان هسته<sup>۱</sup> که از روش‌های جدید در افزایش بازدهی لامپ‌های کلايسترون می‌باشد، بازدهی الکترونی را افزایش داد. ساختار مولد هارمونیک طراحی شده مشتمل بر چهار محفظه باند Ka و یک محفظه باند W است. طراحی با استفاده از نرم‌افزار AJDisk<sup>۲</sup> و یک کد بومی انجام شده است. ساختار طراحی شده با استفاده از بخش PIC<sup>۳</sup> نرم‌افزار CST<sup>۴</sup> شبیه‌سازی شده است. توان خروجی RF<sup>۵</sup> در باند W (فرکانس ۹۳/۹ گیگاهرتز) ۶/۴ کیلووات با بازدهی ۱۶٪ به دست آمده است. فرکانس ورودی در باند Ka (فرکانس ۳۱/۳ گیگاهرتز) می‌باشد. بهره این دستگاه که معادل است با نسبت توان خروجی به توان ورودی ۵۳/۹ دسی‌بل به دست آمده است. برای کاهش ولتاژ روی شکاف محفظه خروجی و جلوگیری از پدیده شکست در بخش خروجی از محفظه‌های تعامل گسترده استفاده شده است.

کلیدواژه‌ها: مولد هارمونیک کلايسترونی، ادوات الکترونی، خلأ، موج میلیم.

## ۱- مقدمه

تولید توان در حدود چند کیلووات استفاده می‌شود. این ادوات عبارت‌اند از: نوسان‌سازهای موج برگشتی<sup>۷</sup>، کلايسترون‌های تعامل گسترده<sup>۸</sup> و لامپ‌های موج رونده<sup>۹</sup> [۵، ۶]. لامپ‌های خانواده جابرو مانند جابروترون یک گزینه عالی برای تولید توان در حدود ۱۰۰ کیلووات در باند W (استاندارد IEEE محدوده ۷۵ تا ۱۱۱ گیگاهرتز) می‌باشند اما برخلاف سایر لامپ‌ها فناوری بسیار پیچیده‌ای دارند. این فناوری‌ها عبارت‌اند از تفنگ الکترونی مگنترونی، سلونوئید ابرسانا برای تولید میدان مغناطیسی در حدود ۳/۵ تسلا برای فرکانس حدود ۹۴ گیگاهرتز و پنجره‌های RF توان بالا که موجب بالا رفتن قیمت تمام شده آن می‌شوند. از فرکانس‌های نزدیک به ۹۴ گیگاهرتز به دلیل تلف جوی کمتر و

تقویت‌کننده‌ها و نوسانگرهای موج میلی‌متری، به‌ویژه در به‌طور گسترده در صنایع تجاری و دفاعی استفاده می‌شوند. برخی از کاربردهای آن‌ها شامل رادارها، تصویربردارهای موج میلی‌متری فعال، سنجش جو و تحلیل اجسام نزدیک می‌باشند [۱، ۲]. نوع حالت جامد آنها توان خروجی در حد ۱-۱۰ وات دارند [۳، ۴]. انواع مختلفی از ادوات الکترونی خلأ وجود دارد که معمولاً برای

\* رایانامه نویسنده مسئول:

ehamidi@mut.ac.ir

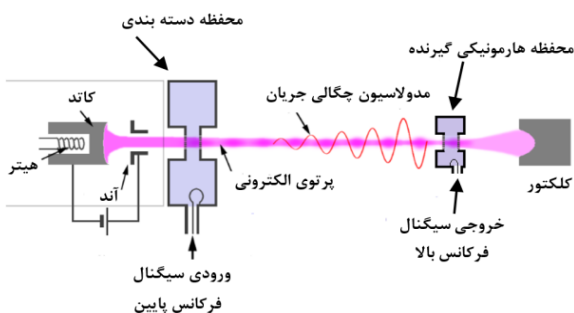
<sup>۱</sup> Core Oscillation Method<sup>۲</sup> Aaron Jensen Disk<sup>۳</sup> Particle In Cell<sup>۴</sup> Computer Simulation Technology<sup>۵</sup> Radio Frequency<sup>۶</sup> Vacuum Electron Device (VED)<sup>۷</sup> Backward Wave Oscillator (BWO)<sup>۸</sup> Extended Interaction Klystron (EIK)<sup>۹</sup> Travelling Wave Tube (TWT)

(فرکانس خروجی ۹۳/۹ گیگاهرتز) ارائه شده است. ناحیه برهم کنش مولد هارمونیک شامل دو بخش اساسی است، یک بخش فرکانس پایین (باند Ka) و یک بخش فرکانس بالا (باند W) که هریک از این بخش‌ها می‌تواند شامل یک یا چند محفظه باشد. امکان غلبه بر چالش‌های ساخت و همچنین قابلیت تحمل توان بالا با کاهش فرکانس در لامپ‌های کلاسیک افزایش می‌یابد؛ بنابراین این طراحی بر اساس کلاسیک‌ترین باند Ka پایه‌گذاری شده است. علاوه بر این باعث کاهش چگالی جریان پرتوی الکترونی، چگالی جریان سطح کاتد و میدان مغناطیسی DC همگراکننده پرتوی الکترونی می‌شود.

در بخش دوم مقاله، اصول عملکرد و اساس کارکرد این ساختار به طور مختصر بیان شده و در بخش سوم یک مدل تحلیلی برای تحلیل و طراحی مولد هارمونیک بیان شده است. ادامه اجزای ریزموج<sup>۳</sup> ناحیه برهم کنش که محفظه‌های تشدید هستند مورد بررسی و شبیه‌سازی قرار می‌گیرند. در نهایت در دو بخش آخر، نتایج طراحی و شبیه‌سازی تست گرم بیان می‌شود.

## ۲- بیان اصول عملکرد

نمای کلی یک مولد هارمونیک مبتنی بر لامپ در شکل (۱) نشان داده شده است. این ساختار از سه بخش اصلی شامل بخش فرکانس پایین و بخش فرکانس بالا و پرتوی الکترونی تشکیل شده است. همچنین در شکل (۱) جزئیات این مولد هارمونیک مبتنی بر لامپ کلاسیک به صورت ساده آمده است. در این شکل یک محفظه به عنوان بخش فرکانس پایین و یک محفظه به عنوان بخش فرکانس بالا نشان داده شده است. بخش فرکانس پایین می‌تواند شامل یک یا چند محفظه در فرکانس ورودی و نزدیک به آن و بخش فرکانس بالا نیز شامل یک یا چند محفظه در فرکانس خروجی و نزدیکی آن باشد. در این پژوهش فرکانس خروجی سه برابر فرکانس ورودی در نظر گرفته شده است.



شکل (۱). نمای کلی یک مولد هارمونیک مبتنی بر کلاسیک هنگامی که پرتوی الکترونی خارج شده از تفنگ الکترونی وارد اولین محفظه می‌شود و با مؤلفه میدان الکتریکی تعامل می‌کند، مدولاسیون سرعت توسط سیگنال ورودی در باند Ka ایجاد

طول موج در حدود ۱ میلی‌متر در سلاح‌های الکترومغناطیسی ضد شخص و رادارهای با دقت بالا با کاربردهای نظامی و غیرنظامی (هواشناسی) استفاده می‌شود.

با افزایش فرکانس ادوات الکترونی خلأ، چالش‌های ساخت و هزینه‌های ساخت آنها افزایش می‌یابد. یکی از راهکارها برای کاهش هزینه و چالش‌های ساخت استفاده از مولدهای هارمونیک مبتنی بر لامپ است. این مولدهای هارمونیک به عنوان ضرب کننده‌های فرکانسی نیز شناخته می‌شوند.

انواع مختلفی از ضرب کننده‌های فرکانسی کلاسیک<sup>۱</sup> از دهه ۱۹۵۰ طراحی و ساخته شده‌اند [۷، ۸]. در ابتدا، امواج میلی‌متری در باند W با استفاده از ضرب کننده‌های فرکانس کلاسیک خود تحریک با قابلیت تولید توان خروجی ۰/۱ میلی وات تولید می‌شدند که بازدهی الکترونی آنها بسیار پایین بود [۹]. این اسیلاتور کلاسیک از یک محفظه فرکانس پایین با یک محفظه هارمونیک در ناحیه انتقال تشکیل شده است [۹].

در سال ۲۰۱۴ یک مبدل فرکانسی باند X به Ka (استاندارد IEEE محدوده ۲۶ تا ۴۰ گیگاهرتز) با توان خروجی ۱۴ کیلووات و بازدهی الکترونی ۳/۹٪ گزارش شده است. این ضرب کننده فرکانسی با تغییر یک کلاسیک باند X ساخته شده است [۷]. مطالعه دیگری در تولید موج میلی‌متری با عنوان مبدل Ka به W، در سال ۲۰۱۸ منتشر شده است. فرکانس خروجی آن ۱۰۵ گیگاهرتز و توان خروجی آن ۹۰ وات با بازدهی الکترونی ۱/۵ درصد گزارش شده است [۱۰]. با توجه به اندازه کوچک این ساختار، محفظه خروجی در باند W در مود مرتبه بالا طراحی شده است [۱۰]. یکی از آخرین تحقیقات در این مورد، طراحی و شبیه‌سازی ضرب کننده فرکانسی باند X به باند Ka با توان خروجی ۲۰ مگاوات و بازدهی نزدیک به ۴۰ درصد می‌باشد [۱۱]. در این مرجع شعاع ناحیه انتقال<sup>۲</sup> پرتوی الکترونی متناسب با محفظه‌ی باند Ka (محفظة خروجی) طراحی شده است که نقش اساسی در افزایش بازدهی الکترونی دارد، اما باعث افزایش چگالی پرتوی الکترونی و میدان مغناطیسی همگرا کننده‌ی پرتوی الکترونی می‌شود. در حال حاضر، برخی از محققان در حال کار بر روی منابع الکترونی خلأ موج میلی‌متری و ضرب کننده فرکانس ترا هرتز هستند. یکی از دلایلی که این موضوع مورد توجه قرار گرفته است، توسعه کدهای دو و سه بعدی ذرات در سلول (PIC) می‌باشد. به کمک این کدها می‌توان ادوات الکترونی خلأ را به طور قابل توجهی کارآمدتر طراحی کرد.

در این مقاله طراحی ناحیه برهم کنش یک مولد هارمونیک مبتنی بر لامپ کلاسیک با فرکانس ورودی در باند Ka (فرکانس ورودی ۳/۱۳ گیگاهرتز) و فرکانس خروجی در باند W

<sup>۳</sup> Microwave

<sup>۱</sup> Klystron Frequency Multiplier (KFM)

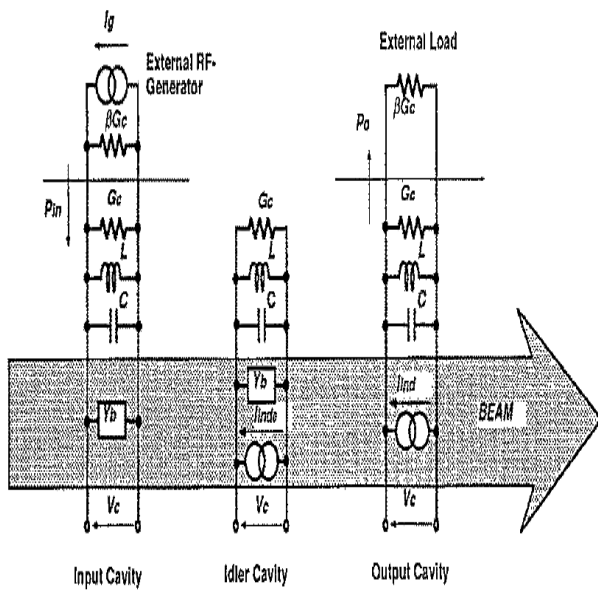
<sup>۲</sup> Drift Region

بزرگ و تأثیر چند محفظه بر روی دامنه هارمونیک‌های جریان پرتوی الکترونی باید کد سیگنال بزرگ برای این ساختار پیاده‌سازی شود. در این پژوهش این کد، پیاده‌سازی شده (کد بومی) و طراحی بر اساس آن انجام شده است. در نهایت در بخش فرکانس بالا، هارمونیک سوم پرتو الکترونی مدوله شده، محفظه خروجی باند W را تحریک می‌کند و موج RF از موجبر خروجی باند W خارج می‌شود.

### ۳- مدل‌سازی نرم‌افزاری مولد هارمونیک کلاسترونی

داشتن ابزار مناسب برای طراحی ادوات الکترونی خلأ یکی از نیازهای اساسی است. این ابزار باعث صرفه‌جویی در هزینه و زمان می‌گردد. در این پژوهش ساختار پیشنهادی به صورت مداری مدل‌سازی شده و کد نرم‌افزاری برای آن توسعه یافته است.

هریک از محفظه‌های تشدید ساختار پیشنهادی به صورت مدار موازی RLC مطابق شکل (۲) مدل می‌شود. مقادیر R، L و C وابسته به فرکانس تشدید و ضریب کیفیت محفظه Q می‌باشند [۱۴].



شکل (۲). معادل‌سازی ساختار کلاسترون و مولد هارمونیک به صورت مداری [۱۴]

عنصر بعدی در این ادوات، پرتوی الکترونی است که مطابق شکل (۳) به صورت دیسک‌های یک‌بعدی مدل می‌شود. حضور پرتوی الکترونی بر روی مدار معادل محفظه تشدید تأثیر می‌گذارد. این تأثیر در مدار معادل محفظه‌ها به صورت یک ادمیتانس  $Y_b$  بیان می‌شود [۱۵].

می‌شود. در ناحیه انتقال، مدولاسیون سرعت به مدولاسیون چگالی جریان تبدیل می‌شود. در پرتو الکترونی مدوله شده با چگالی جریان هارمونیک‌های مختلفی به وجود می‌آید. با توجه به نظریه سینماتیک مدولاسیون سرعت در رژیم سیگنال کوچک، جریان پرتو الکترونی با هارمونیک آن قابل محاسبه است [۱۲]. فرض کنید ولتاژ روی شکاف محفظه  $V \cos(\omega_0 t)$  باشد. زمان  $t$  که در آن الکترون به مکان  $Z$  می‌رسد به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$t = t_0 + \frac{z}{v_0} \frac{1}{1 + \frac{1}{2} (V/V_0) \cos(\omega_0 t)} \quad (1)$$

بر اساس پایستگی بار ( $I_0 dt_0 = Idt$ )، جریان پرتوی در زمان  $t_0$  و در مکان  $Z$  به صورت رابطه (۲) بیان می‌شود.

$$I(z, t_0) = \frac{I_0}{1 + \frac{1}{2} \frac{z}{v_0} (V/V_0) \omega \sin(\omega_0 t_0)} \quad (2)$$

باتوجه به اینکه این تابع برحسب زمان یک تابع متناوب است می‌توان جریان  $I(z, t_0)$  را با استفاده از سری فوریه مطابق با رابطه (۳) نوشت.

$$I(z, t_0) = I_0 + 2I_0 \sum_{n=1}^{\infty} J_n(nX) \cos[n\omega(t - z/u_0)] \quad (3)$$

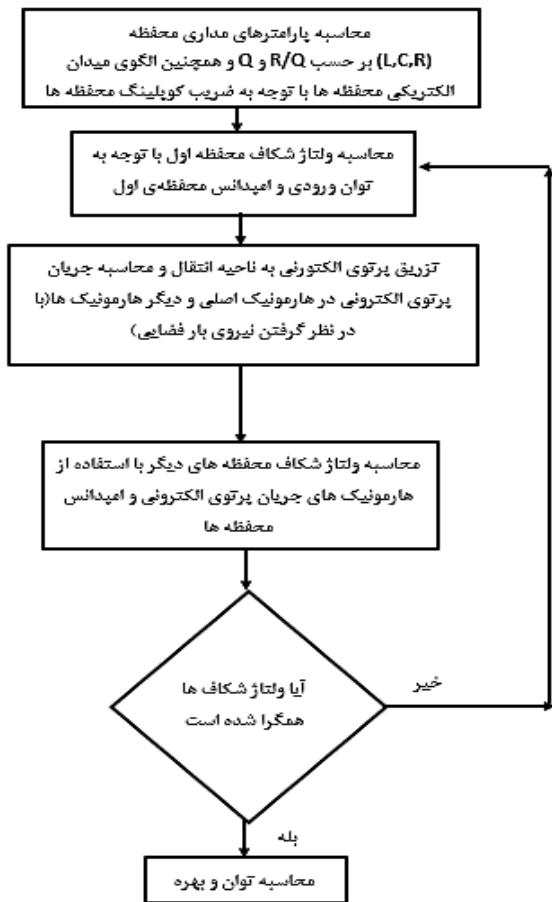
$$X = \frac{1}{2} \frac{z}{u_0} (V/V_0)$$

در رابطه (۳) کمیت  $X$  را پارامتر دسته‌بندی می‌نامند و  $u_0$  سرعت انتشار پرتو الکترونی است. در این روابط اثر بارفضایی در نظر گرفته نشده است. همچنین ولتاژ شکاف محفظه ورودی  $V$  باید کوچک‌تر از ولتاژ پرتو الکترونی  $V_0$  باشد. این روابط در حالت سیگنال کوچک و فقط برای تأثیر یک محفظه برقرار است. میهران<sup>۱</sup> در مرجع [۱۳] نشان داد که با در نظر گرفتن اثر بارفضایی متغیر ورودی تابع بسط کاهش پیدا می‌کند. این کاهش با مقدار  $(\sin hl / hl)$  مشخص می‌شود.

$$I_n = 2I_0 J_n(nX \sin(hl) / hl) \quad (4)$$

که  $h = \omega_p / u_0$  و  $l$  طول ناحیه انتقال می‌باشد.  $\omega_p$  نیز فرکانس پلاسما پرتوی الکترونی با شعاع بی‌نهایت است. با در نظر گرفتن پرتوی محصورشده، فرکانس پلاسما کاهش یافته ( $\omega_q$ ) جایگزین می‌شود. برای حالت‌های پیچیده‌تر و سیگنال

<sup>1</sup> Mihran

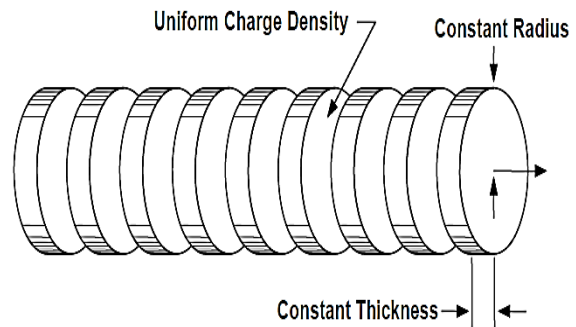


شکل (۵). الگوریتم استفاده شده در کد یک بعدی بومی [۱۶] [۱۴]

پرتوی الکترونی با عبور از شکاف محفظه‌های دیگر باعث ایجاد ولتاژ شکاف می‌شود و میدان این محفظه‌ها در ادامه بر روی دیسک‌ها تأثیر می‌گذارند و مدولاسیون را قوی‌تر می‌کنند. این فرآیند به صورت تکراری انجام می‌شود تا ولتاژ شکاف‌ها همگرا شود. از این الگوریتم در نرم‌افزار AJDisk نیز استفاده می‌شود؛ ولی در این نرم‌افزار هارمونیک‌های مختلف جریان RF بر روی پرتوی الکترونی استخراج نمی‌شود و نمی‌توان مولد هارمونیک را با استفاده از آن طراحی کرد. در بخش طراحی نتایج این کد با نرم‌افزار AJDisk مقایسه می‌شود.

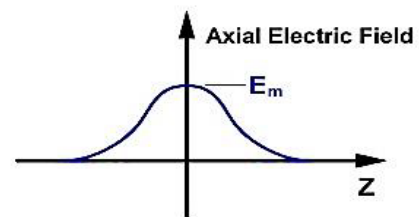
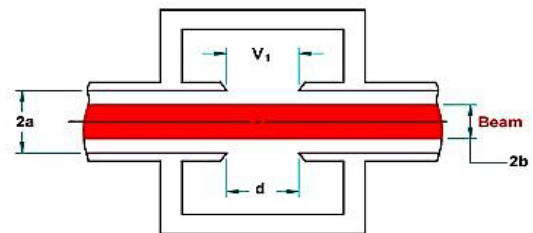
### ۳- طراحی ناحیه برهم‌کنش مولد هارمونیک

طراحی ناحیه برهم‌کنش مولد هارمونیک با هدف داشتن بازدهی بالا با استفاده از روش نوسان هسته<sup>(۱)</sup> (COM) انجام شده است. از این روش در طراحی لامپ‌های کلاسیک با بازدهی الکترونی بالا استفاده می‌شود. در این پژوهش برای اولین بار این روش برای طراحی مولد هارمونیک کلاسیک مورد استفاده قرار گرفته است. هدف این روش سوق دادن الکترون‌ها به سمت مرکز و ایجاد یک دسته‌بندی قوی می‌باشد. دسته‌بندی قوی حاصل شده



شکل (۳). مدل‌سازی پرتوی الکترونی به صورت دیسک‌های یک بعدی [۱۵]

فرآیند تقویت توان در این لامپ‌ها به این صورت است که ابتدا پرتوی الکترونی توسط میدان الکتریکی تشدید شده در محفظه اول که توسط توان ورودی تحریک شده است، مدوله می‌شود. در ادامه این پرتوی مدوله شده باعث تحریک و تشدید محفظه‌های بعدی شده و میدان الکتریکی با گذشت زمان افزایش می‌یابد و در نتیجه محفظه خروجی به اندازه کافی تشدید می‌شود و توان خروجی از آن خارج می‌شود. در شکل (۴) الگوی میدان الکتریکی نشان داده شده است. [۱۲]



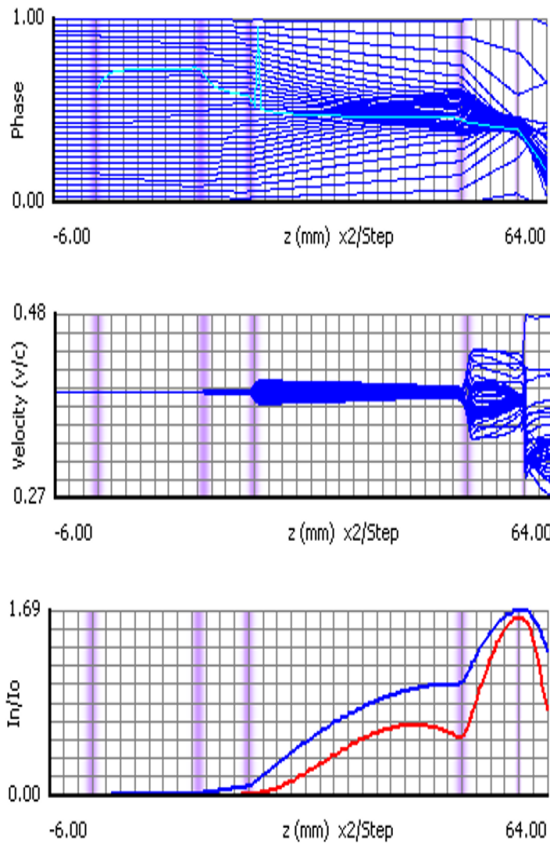
شکل (۴). ناحیه انتقال پرتوی الکترونی در محفظه‌های تشدید و الگوی

میدان الکتریکی در محل آن [۵]

فرآیند مدل‌سازی ساختار (فلوچارت شکل (۵))، به صورت یک کد نرم‌افزاری بومی توسعه داده شده است. فرآیند انجام بدین صورت است که ابتدا ولتاژ محفظه‌های اول با توجه به توان ورودی لامپ محاسبه می‌شود. در محل عبور پرتوی الکترونی از محفظه یک میدان الکتریکی به وجود می‌آید که این میدان بر دیسک‌های الکترونی بر اساس قانون نیروی لورنتز نیرو وارد می‌سازد (دیسک‌ها حافظه‌دار می‌شوند).

<sup>1</sup> Core Oscillation Method

نظیر ولتاژ، جریان و قطر پرتوی الکترونی می‌باشد. نتایج طراحی با استفاده از AJDisk در شکل (۶) و نتایج شبیه‌سازی با کد پیاده‌سازی شده بومی در شکل (۷) مشاهده می‌شود. در نمودار بالایی شکل (۶) فاز نسبی دیسک‌ها ( $\phi = \omega t$ ) بهنجارشده ( $\phi_n = \phi/2\pi$ ) نشان داده شده است. در ابتدای ناحیه برهم‌کنش فاز دیسک‌ها با فواصل مناسب  $1/N$  بین ۰ و ۱ در نظر گرفته می‌شوند. این فاصله مساوی بین فازها نشان‌دهنده پرتوی الکترونی بدون مدولاسیون می‌باشد. با عبور دیسک‌ها از محفظه‌های RF فاصله دیسک‌ها تغییر می‌کند و مدولاسیون چگالی بار به وجود می‌آید. در نمودار وسط شکل (۶) سرعت دیسک‌ها در طول ناحیه برهم‌کنش بهنجار شده با سرعت نور ( $v/c$ ) نشان داده شده است که مدولاسیون سرعت بر روی پرتوی الکترونی را نشان می‌دهد. در نمودار پایینی شکل (۶) نیز دامنه‌ی هارمونیک اول و دوم جریان RF به وجود آمده بر روی پرتوی الکترونی به صورت بهنجار شده با جریان پرتوی الکترونی ( $I_n/I_0$ ) مشاهده می‌شود.



شکل (۶). نتایج طراحی و شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار AJDisk، نمودار فاز دیسک‌ها (نمودار بالا)، سرعت دیسک‌ها (نمودار وسط)، دامنه‌ی هارمونیک‌های اول و دوم جریان RF پرتوی الکترونی (نمودار پایینی)

نیز باعث افزایش دامنه جریان RF مدوله‌شده در پرتوی الکترونی و در نتیجه باعث افزایش توان و بازدهی می‌شود [۱۷].

روش نوسان هسته مبتنی بر دسته‌بندی غیریکنواخت است، که در طول لامپ، الکترون‌های اطراف دسته به تدریج به مرکز دسته نزدیک می‌شوند و یک نوسان در فاز به وجود می‌آید. دلیل این نوسان وجود دینامیک بارفضایی و نیروی RF محفظه‌هاست که به ترتیب موجب انبساط و انقباض پرتوی الکترونی می‌شوند. میدان‌های RF محفظه اثر ضعیفی بر روی الکترون‌های محیطی دارند (فاز  $\pm\pi$  نسبت به هسته) که باعث افزایش طول ناحیه برهم‌کنش می‌شود. به همین علت این روش برای فرکانس پایین پیشنهاد نمی‌شود و برای فرکانس بالا مناسب است. [۱۸]

این روش در هر دو باند Ka و W اعمال شده است. اعمال این روش در باند Ka منتج به استفاده از چهار محفظه در باند Ka و یک محفظه در باند W شده است. همچنین اعمال آن در باند W موجب یک محفظه در باند Ka و هشت محفظه در باند W می‌شود. نتایج اعمال این روش در باند Ka بهتر از نتایج آن در باند W است، بنابراین در این پژوهش فقط نتایج روش در باند Ka شرح داده خواهد شد.

در این طراحی ولتاژ پرتو الکترونی ۴۵ کیلوولت و جریان آن ۱ آمپر می‌باشد. برای دستیابی به بازدهی الکترونی بالاتر و همچنین کاهش میدان مغناطیسی ساکن برای همگرایی پرتوی الکترونی، پروبانس  $0.1 \mu\text{perv}$  در نظر گرفته شده است. قطر ناحیه انتقال نیز  $0.8$  میلی‌متر با  $\gamma a = 0.6$  به دست می‌آید که باعث کاهش چگالی کاند می‌شود.  $\gamma a$  یک پارامتر طراحی است که حاصل ضرب شعاع ناحیه انتقال (a) و ثابت انتشار شعاعی ( $\gamma^2 = \beta_e^2 - k_0^2$ ) می‌باشد.  $\beta_e = \omega/u_0$  و  $k_0 = \omega/c$  به ترتیب ثابت انتشار پرتوی الکترونی و فضای آزاد می‌باشند. مقدار چگالی پرتوی الکترونی این طراحی  $353 A/cm^2$  بدست می‌آید. مشخصات پرتوی الکترونی شامل قطر ناحیه انتقال و چگالی جریان پرتوی الکترونی یک کلاسترون باند W با چنین نقطه کاری  $0.36$  میلیمتر و  $2450 A/cm^2$  می‌شود که نسبت به مقادیر بدست آمده برای مولد هارمونیک باند W بسیار بیشتر است.

در طراحی از نرم‌افزار AJDisk و همچنین کد پیاده‌سازی شده (بومی) استفاده شده است. در این نرم‌افزارها پرتوی الکترونی به صورت مجموعه‌ای از دیسک‌های یک‌بعدی در نظر گرفته می‌شود. ورودی این نرم‌افزار پارامترهای سرد محفظه‌ها شامل فرکانس تشدید، ضریب کیفیت، امپدانس محفظه و همچنین مشخصات پرتوی الکترونی

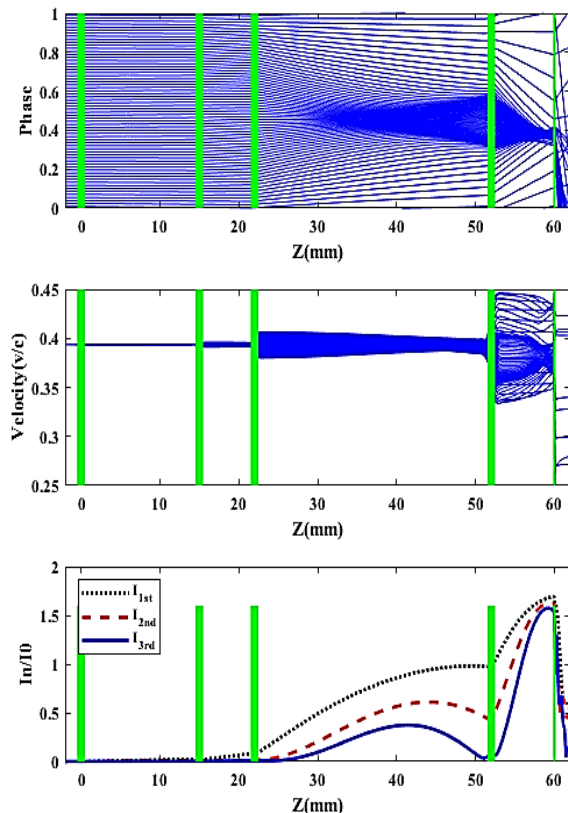
در این طراحی با استفاده از کد پیاده‌سازی شده، مکان محفظه‌ها و همچنین فرکانس محفظه‌ها استخراج می‌شود. در جدول ۱ مکان و فرکانس تشدید محفظه‌ها آمده است. در این طراحی دامنه جریان هارمونیک سوم نسبت به جریان پرتوی الکترونی  $1/6$  به دست آمده است. توان خروجی نیز برابر با  $7/5$  کیلووات به دست می‌آید در حالتی که  $R/Q$  ۵۰ اهم و ضریب تزویج  $0/4$  باشد.

جدول (۱). فرکانس تشدید محفظه‌ها به همراه مکان محفظه‌ها

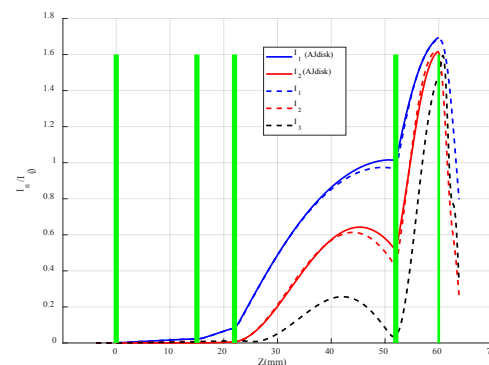
شماره محفظه‌ها	1	2	3	4	5
فرکانس بهنجار شده محفظه‌ها	$f_0$	$1.0004f_0$	$1.0006f_0$	$1.0021f_0$	$3f_0$
مکان محفظه‌ها برحسب میلی‌متر	0	15	22	52	60

#### ۴- طراحی و شبیه‌سازی محفظه‌ها

برای طراحی ناحیه برهم‌کنش این ساختار به صوت پارامتری به پارامترهای سرد محفظه شامل فرکانس تشدید  $M$  (ضریب تزویج) و  $R/Q$  (نسبت امپدانس محفظه به ضریب کیفیت) و  $Q$  (ضریب کیفیت) آنها نیاز است. این پارامترها با استفاده از بخش تحلیل مقادیر ویژه<sup>۱</sup> نرم‌افزار CST محاسبه می‌شود. هدف دستیابی به بیشترین مقدار این پارامترها در فرکانس تشدید موردنظر می‌باشد. با توجه به اندازه کوچک ساختار و پیچیدگی ساخت از محفظه مکعب‌مستطیل شکل استفاده می‌شود. ساخت این نوع محفظه‌ها نسبت به انواع دیگر محفظه‌ها ساده‌تر است که با روش‌های میکرو ماشین‌کاری مانند<sup>۲</sup> DRIE،<sup>۳</sup> LIGA،<sup>۴</sup> CNC و لیزر قابل انجام است. الگوی میدان الکتریکی در داخل محفظه اول و یکی از محفظه‌های میانی در شکل (۹) و شکل (۱۰) نشان داده شده است. این محفظه‌ها در مود اصلی  $TM_{110}$  کار می‌کنند. ابعاد حدودی این محفظه‌ها  $6 \times 6 \times 2$  میلی‌متر می‌باشد. شکاف این محفظه‌ها نیز در حدود ۱ میلی‌متر است. این محفظه با روش‌های معمول مکانیکی قابل پیاده‌سازی است.  $R/Q$  این محفظه نیز در حدود ۱۵۰ اهم با ضریب تزویج بین  $0/7$  تا  $0/8$  به دست آمده است.



شکل (۷). نتایج شبیه‌سازی با استفاده از کد پیاده‌سازی شده نتایج طراحی روش COM در باند  $Ka$  با کد بومی، نمودار فاز دیسک‌ها (نمودار بالا)، سرعت دیسک‌ها (نمودار وسط) دامنه هارمونیک‌های جریان پرتوی الکترونی (نمودار پایین) همین نمودارها با کد پیاده‌سازی شده در شکل (۷) آمده است با این تفاوت که در نرم‌افزار AJDisk فقط دامنه هارمونیک اصلی و دوم را به‌عنوان خروجی نشان می‌دهد؛ ولی در کد پیاده‌سازی شده می‌توان تمام هارمونیک‌ها را به هر تعداد که نیاز است در خروجی مشاهده کرد. برای راستی‌آزمایی نتایج، دامنه جریان هارمونیک‌های اول تا سوم از کد پیاده‌سازی و هارمونیک اول و دوم در نرم‌افزار AJDisk در شکل (۸) نشان داده شده است. نتایج جریان هارمونیک اول و دوم همخوانی قابل‌قبولی با یکدیگر دارد.



شکل (۸). دامنه جریان هارمونیک‌های اول تا سوم از کد پیاده‌سازی شده و هارمونیک اول و دوم در نرم‌افزار AJDisk

<sup>1</sup> Eigenmode Solver

<sup>2</sup> Deep Reactive Ion Etch

<sup>3</sup> LIGA is the German acronym of Lithographie (LI) Galvanoformung (G) Abformung (A)

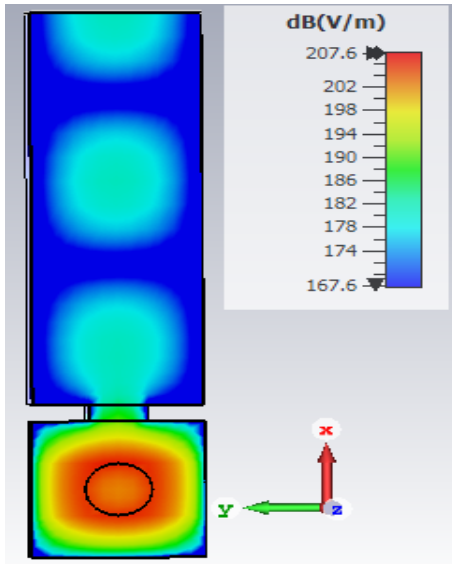
<sup>4</sup> Computer Numerical Control



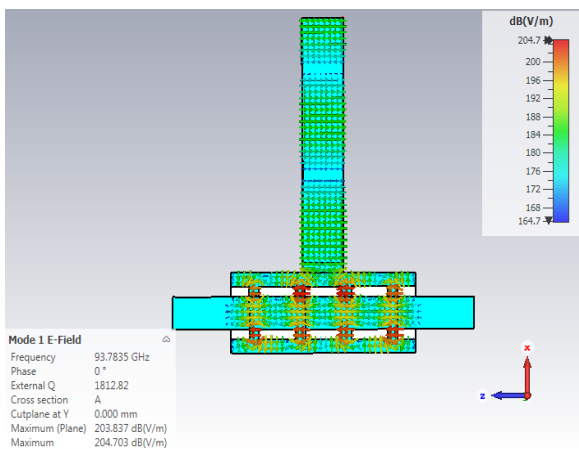
W با ۴ و ۵ شکاف نشان داده شده است.

### ۵- شبیه‌سازی گرم ناحیه برهم‌کنش

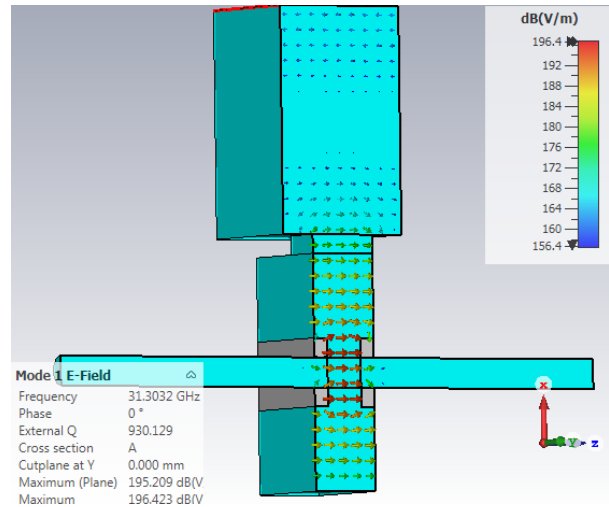
شبیه‌سازی برهم‌کنش پرتو-موج با استفاده از حل‌کننده حوزه زمان ذرات در سلول<sup>۲</sup> (PIC) نرم‌افزار CST و پارامترها و ابعاد محاسبه شده در بخش‌های قبلی انجام شده است. سیگنال ورودی در باند Ka با توان ۲۶ میلی‌وات می‌باشد. بخش RF در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی برهم‌کنش پرتو-موج در شکل (۱۲) نشان داد شده است. توان با موج‌بر استاندارد WR-28 (۷/۱۱) میلی‌متر × ۳/۵۵ میلی‌متر تزریق می‌شود و از موج‌بر استاندارد WR-9 (۲ میلی‌متر × ۱ میلی‌متر) استخراج می‌شود. یک میدان مغناطیسی طولی یکنواخت 0.4 تسلا برای همگرایی پرتو الکترونی در شبیه‌سازی PIC استفاده شده است.



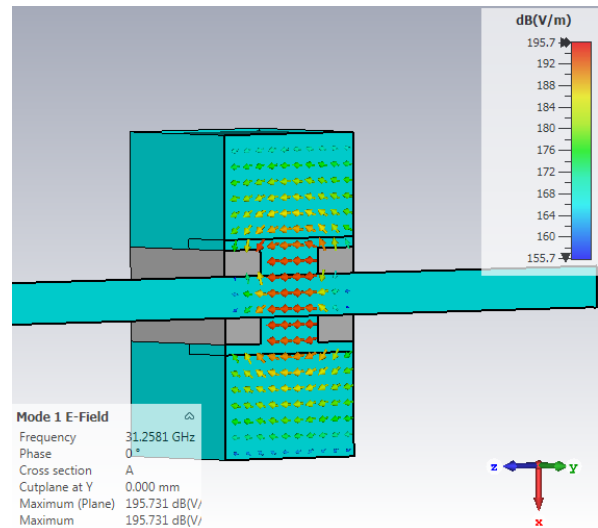
الف)



ب)



شکل (۹). الگوی میدان الکتریکی محفظه اول در باند Ka

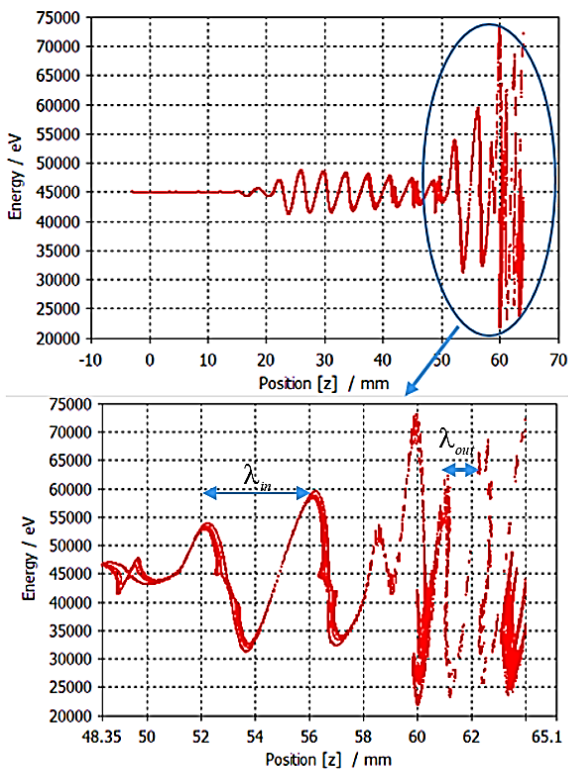


شکل (۱۰). الگوی میدان الکتریکی محفظه میانی در باند Ka

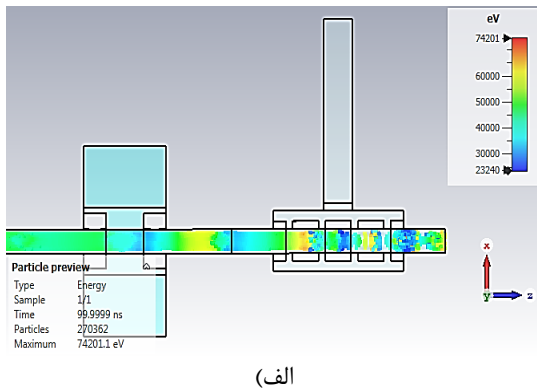
بخش کلیدی مولد هارمونیک کلاسترونی پیشنهادی در این مقاله، محفظه موج میلی‌متری باند W می‌باشد. باتوجه‌به توان زیاد و ولتاژ زیاد بر روی شکاف محفظه خروجی نیاز است که محفظه خروجی شامل چند شکاف باشد تا شدت ولتاژ بر روی شکاف‌ها کاهش‌یافته و شکست ولتاژ درون محفظه رخ ندهد. به این محفظه‌ها، محفظه‌های تعامل گسترده<sup>۱</sup> نیز اطلاق می‌شود. در محفظه خروجی دو طراحی با ۴ و ۵ شکاف استفاده شده است. ضریب تزویج محفظه خروجی ۰.۴ و R/Q آن در حدود ۵۰ اهم محاسبه شده است. ابعاد محفظه با ۴ شکاف ۴/۵×۱/۹۷×۱/۹ میلی‌متر و ابعاد محفظه با ۵ شکاف ۲×۱/۸۸ (۶/۳۵) میلی‌متر به‌دست آمده است. عرض شکاف‌ها در این محفظه نیز ۰/۲۷ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. به دلیل بسیار بالا بودن فرکانس، دقت‌های مکانیکی ساخت باید بالا باشد. در شکل (۱۱) الگوی میدان الکتریکی عرضی و طولی در محفظه تعامل گسترده باند

<sup>۲</sup> Particle In Cell (PIC)

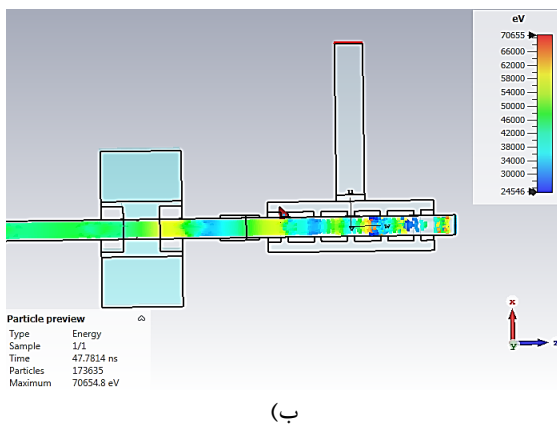
<sup>۱</sup> Extended Interaction Cavity



شکل (۱۳). نمودار فضای فاز پرتوی الکترونی در فرکانس ورودی ۳۱/۳ گیگاهرتز و فرکانس خروجی ۹۳/۹ گیگاهرتز (انرژی الکترون‌ها برحسب مکان در یک‌زمان ثابت)

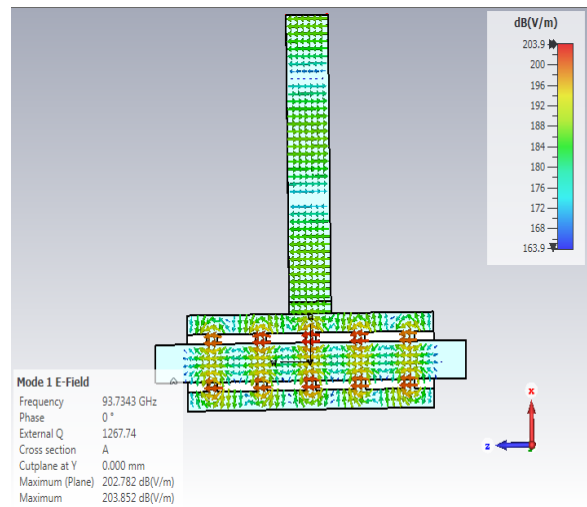


(الف)



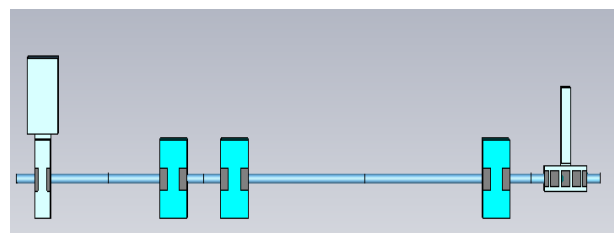
(ب)

شکل (۱۴). نمودار دسته‌بندی الکترون‌ها و تغییر طول دسته‌بندی (الف) محافظه تعامل گسترده با ۴ شکاف (ب) محافظه تعامل گسترده با ۵ شکاف (فرکانس ورودی ۳۱/۳ گیگاهرتز و فرکانس خروجی ۹۳/۹ گیگاهرتز است)

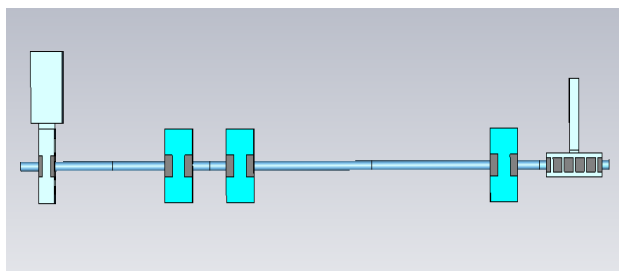


(ج)

شکل (۱۱). میدان الکتریکی محافظه باند W الف الگوی عرضی، (ب) الگوی محوری محافظه تعامل گسترده با ۴ شکاف، (ج) الگوی محوری محافظه تعامل گسترده با ۵ شکاف



(الف)



(ب)

شکل (۱۲). ساختار سه‌بعدی مدل شده در نرم‌افزار CST الف) با محافظه خروجی با ۴ شکاف، (ب) با محافظه خروجی با ۵ شکاف نمودار فضای فاز طولی پرتو الکترونی (انرژی ذرات پرتوی الکترونی برحسب مکان) در ناحیه برهم‌کنش مولد هارمونیک در شکل (۱۳) نشان داده شده است. مطابق با این نمودار، دسته‌بندی الکترون‌ها بر روی طول موج فرکانس ورودی، یعنی باند Ka شکل می‌گیرد و در ادامه در محافظه خروجی، این دسته‌بندی به طول موج فرکانس باند W تبدیل می‌شود. تغییر در طول موج در شکل (۱۳) نشان داده شده است. همچنین پرتوی الکترونی دسته‌بندی شده نیز در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود. در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) فرکانس ورودی ۳۱/۳ گیگاهرتز و فرکانس خروجی ۹۳/۹ گیگاهرتز است.

در جدول (۲) نتایج بدست آمده از این پژوهش با نتایج سایر مراجع در این زمینه مقایسه شده است. از نظر سطح توان در مبدل‌های باند Ka به W سطح توان آن بسیار بالاتر است. بازدهی الکترونی آن نیز در مبدل‌های ۱ به ۳ مانند Ka به W و X به Ka) با توجه به کاهش چگالی جریان پرتوی الکترونی بالاتر است. در مرجع [۱۱] شعاع ناحیه انتقال با توجه به باند Ka انتخاب شده است که به بازدهی بالایی دست یافته است ولی چگالی جریان پرتوی الکترونی و در نتیجه میدان مغناطیسی همگراکننده پرتوی الکترونی نیز افزایش می‌یابد که از نظر ساخت مطلوب نیست.

جدول (۲). مقایسه نتایج این پژوهش با مراجع مرتبط

مرجع	باند فرکانسی	توان خروجی (کیلووات)	بازدهی (درصد)	میدان مغناطیسی (تسلا)
[۷]	X to Ka	۱۴	۴	۰/۳۳
[۸]	X to Ku	۳۰	۱۵	۰/۳۳
[۱۰]	Ka to W	۰/۰۹	۱/۵	-
[۱۱]	X to Ka	۲۰۰۰۰	۴۰	۳/۵
این پژوهش	Ka to W	۶/۴	۱۶	۰/۴

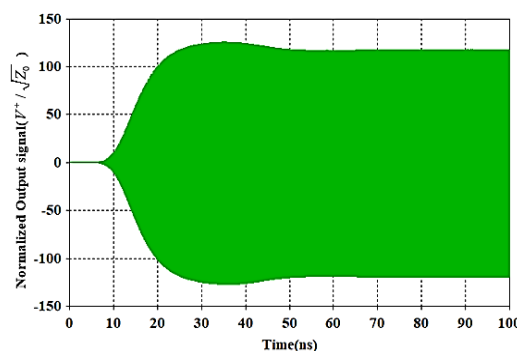
## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله طراحی و شبیه‌سازی مولد هارمونیک مبتنی بر لامپ کلاسترون شرح داده شد. از محفظه‌های مستطیل‌شکل باند Ka و باند W استفاده شد. دو ساختار مختلف با محفظه خروجی تعامل گسترده با ۴ و ۵ شکاف ارائه شد. با توجه به ضریب کیفیت پایین‌تر و ولتاژ شکاف پایین‌تر طراحی با محفظه خروجی با ۵ شکاف مناسب‌تر می‌باشد. در این حالت با توان ورودی ۲۶ میلی‌وات در باند Ka، توان خروجی حدود ۶/۴ کیلووات در فرکانس باند W با بازده پرتو ۱۶ درصد به دست می‌آید. این دستگاه قادر است در صورت افزایش توان پرتو الکترونی، توان خروجی حدود ۱۰۰ کیلووات نیز تولید کند.

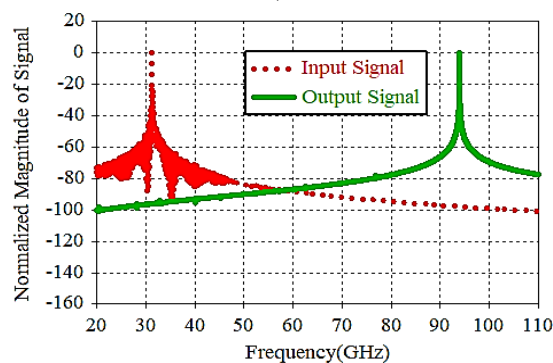
## ۷- مراجع

- [1] F. Toufexis, S. G. Tantawi, A. Jensen, V. A. Dolgashev, A. Haase, M. V. Fazio, and P. Borchard, "Experimental demonstration of a 5th harmonic mm-wave frequency multiplying vacuum tube," *Applied Physics Letters* vol. 110, 2017. doi:10.1063/1.4990970.
- [2] B. Steer, A. Roitman, P. Horoyski, M. Hyttinen, R. Dobbs, and D. Berry, "Advantages of Extended Interaction Klystron technology at millimeter and sub-millimeter frequencies," 2007. doi:10.1109/PPPS.2007.4652369.
- [3] F. Yang, J. Li, H.-X. Yu, H.-F. Zhao, Y. Zhao, X.-M. Chen, A.-X. Zhang, and Z.-H. Jin, "W

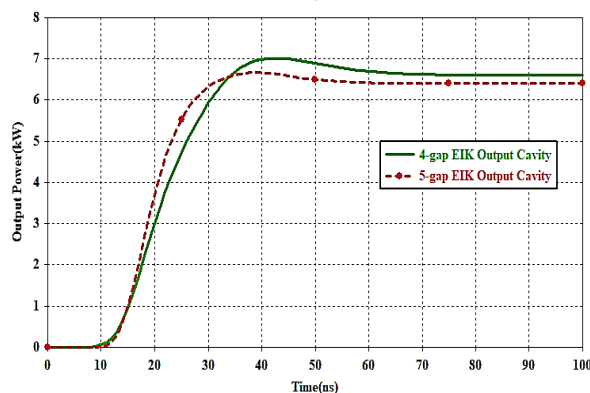
در شکل (۱۵) الف سیگنال خروجی بهنجار شده محفظه تعامل گسترده (باند W) با ۵ شکاف نشان داده شده است. در شکل (۱۵) ب نیز سیگنال ورودی و خروجی در حوزه زمان در حوزه زمان آمده است. در شکل (۱۵) ج نمودار توان خروجی برحسب زمان مشاهده می‌شود. در محفظه خروجی با ۴ شکاف توان خروجی ۶/۶ کیلووات با ضریب کیفیت محفظه خروجی ۱۸۰۰ بدست آمده است. در محفظه خروجی با ۵ شکاف توان خروجی ۶/۴ کیلووات با ضریب کیفیت خروجی ۱۲۰۰ حاصل شده است.



الف



ب



ج

شکل (۱۵). الف) سیگنال خروجی بهنجار شده با محفظه تعامل گسترده با ۵ شکاف، ب) سیگنال ورودی و خروجی در حوزه‌ی فرکانس، ج) نمودار توان خروجی برحسب زمان برای محفظه با ۴ و ۵ شکاف

- [15] A. S. Gilmour, *Microwave and Millimeter-Wave Vacuum Electron Devices: Inductive Output Tubes, Klystrons, Traveling-Wave Tubes, Magnetrons, Crossed-Field Amplifiers, and Gyrotrons*. Artech, 2020.
- [16] A. Jensen, M. Fazio, J. Neilson, and G. Scheitrum, "Developing Sheet Beam Klystron Simulation Capability in AJDISK," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 61, no. 6, pp. 1666-1671, 2014. doi:10.1109/TED.2014.2298753.
- [17] D. Constable, A. Baikov, G. Burt, I. Guzilov, V. [1], A. Jensen, R. Kowalczyk, C. Lingwood, R. Marchesin, C. Marrelli, and I. Syratchev, "High Efficiency Klystron Development for Particle Accelerators," presented at the Advanced Beam Dynamics Workshop on High Luminosity Circular e+e-Colliders, Daresbury, United Kingdom, 2017. doi:10.18429/JACoW-eeFACT2016-WET3AH2.
- [18] A. Jensen, A. Haase, E. Jongewaard, M. Kemp, and J. Neilson, "Increasing klystron efficiency using COM and BAC tuning and application to the 5045 klystron," in *2016 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC)*, 2016, pp. 1-2. doi:10.1109/IVEC.2016.7561811.
- band solid-state power amplifier for aerospace usage," *The Journal of Engineering*, vol. 2022, no. 2, pp. 210-215, 2022. doi:https://doi.org/10.1049/tje2.12102.
- [4] J. Schellenberg, E. Watkins, M. Micovic, B. Kim, and K. Han, "W-band, 5W solid-state power amplifier/combiner," *The Journal of Engineering*, pp. 240-243, 2010. doi:10.1109/MWSYM.2010.5517616.
- [5] R. Barker, N. Luhmann, J. Booske, and G. Nusinovich, *Modern Microwave and Millimeter-Wave Power Electronics*. 2005.
- [6] C. Paoloni, D. Gamzina, R. Letizia, Y. Zheng, and N. C. Luhmann, "Millimeter wave traveling wave tubes for the 21st Century," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 35, no. 5, pp. 567-603, 2021. doi:10.1080/09205071.2020.1848643.
- [7] J. Fan and Y. Wang, "A 14 kW High-Power X-Band to Ka-Band Klystron Frequency Multiplier," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 61, no. 6, pp. 1854-1858, 2014. doi:10.1109/TED.2013.2295001.
- [8] J. Fan, Y. Zhang, and Y. Wang, "A 30-kW High-Power X-band to Ku-band Klystron Frequency Multiplier," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 60, pp. 1457-1462, 2013. doi:10.1109/TED.2013.2238677.
- [9] W. H. Cornetet, "A self-excited drift-tube klystron frequency multiplier for use in generating millimeter waves," *IRE Transactions on Electron Devices*, vol. 6, no. 2, pp. 236-241, 1959. doi:10.1109/T-ED.1959.14476.
- [10] G. Burt, L. Zhang, D. A. Constable, H. Yin, C. J. Lingwood, W. He, C. Paoloni, and A. W. Cross, "A Millimeter-Wave Klystron Upconverter With a Higher Order Mode Output Cavity," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 64, no. 9, pp. 3857-3862, 2017. doi:10.1109/TED.2017.2724581.
- [11] M. Behtouei, B. Spataro, F. Di Paolo, and A. Leggieri, "The Ka-band high power klystron amplifier design program of INFN," *Vacuum*, vol. 191, p. 110377, 2021. doi:https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.110377.
- [12] J. H. Booske, R. J. Dobbs, C. D. Joye, C. L. Kory, G. R. Neil, G. S. Park, J. Park, and R. J. Temkin, "Vacuum Electronic High Power Terahertz Sources," *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 1, no. 1, pp. 54-75, 2011. doi:10.1109/TTHZ.2011.2151610.
- [13] T. G. Mihran, "The effect of space charge on bunching in a two-cavity klystron," *IRE Transactions on Electron Devices*, vol. 7, no. 1, pp. 54-64, 1959. doi:10.1109/T-ED.1959.14450.
- [14] T. Shintake, "Klystron simulation and design using the Field Charge Interaction (FCI) code," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 363, no. 1, pp. 83-89, 1995. doi:https://doi.org/10.1016/0168-9002(95)00256-1.