

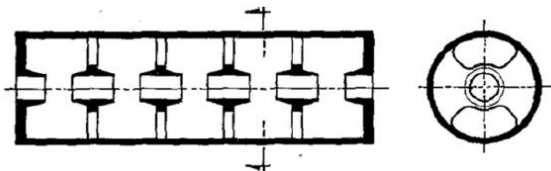
# استفاده از مدل مداری جهت بررسی حساسیت بهره ی زوج کاواک کوپل شده ی انتهایی کلاسترون نسبت به تغییرات ولتاژ باریکه ی الکترونی و ضریب کیفیت بارگذاری

هومن بهمن سلطانی<sup>۱</sup>، حبیب اله عبیری<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری مخابرات میدان دانشگاه شیراز، hoomanbsultani@gmail.com

<sup>۲</sup> استاد دانشکده ی مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه شیراز، abiri@shirazu.ac.ir

چکیده - تغییرات بهره ی زوج کاواک تزویج شده انتهایی لامپ های کلاسترون با تغییرات ولتاژ کاتد، به کمک یک مدل ساده سازی شده ی مداری بررسی شده است. نشان داده شده است که علی رغم تعداد کم کاواک های کوپل شده، خواص ولتاژگزینی برهمکنش اسمیت - پورسل در ابتدا و انتهای باند انتشار ساختار قابل تشخیص است، هرچند میزان حساسیت به ولتاژ در سامانه ی شامل دو کاواک کوپل شده نسبت به نمونه ی لامپ موج رونده کم تر است. روند حساسیت به ولتاژ باریکه، به دست آمده از مدل مداری در شبیه سازی PIC، با رفتار کلی پیش بینی شده توسط مدل یک بعدی مداری، در حالت بارگذاری شدید رزوناتور مورد مقایسه قرار گرفته و هماهنگی کلی بین دو روش مشاهده گردیده است. به ویژه پیش بینی مدل مداری در سهم داشتن اثر اسمیت-پورسل، در نرم افزار PIC نیز تایید شده است. کلمات کلیدی- لامپ های میکروویو، تقویت کننده های الکترومغناطیسی.



شکل ۱: رزوناتور پیچیده شامل پنج کاواک کوپل شده به یکدیگر.

## ۱- مقدمه

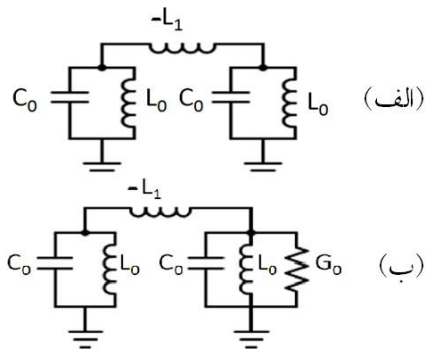
لامپ های تقویت کننده ی کلاسترون، سامانه های پر قدرت تقویت کننده ی امواج الکترومغناطیسی در ناحیه ی میکروویو با قابلیت تولید سیگنال های مگاواتی پالسی در باندهای فرکانسی UHF، L، S و C هستند. کلاسترون های برهمکنش گسترده تا عمق ناحیه ی امواج میلی متری به کار می روند و در هر دو حالت تقویت کنندگی و نوسانسازی قابل استفاده اند [۱] و در دو دهه ی اخیر مورد توجه بیشتری قرار گرفته اند [۲، ۳].

در این حالت برهمکنش موج-باریکه توسط برهمکنش اسمیت-پورسل رخ می دهد که مستلزم نزدیک بودن تقریبی سرعت باریکه ی الکترونی و سرعت فاز RF در ساختار است [۱].

قسمت انتهایی کلاسترون های پهن باند عموماً از تعداد کمی کاواک کوپل شده تشکیل شده که توسط موجبر خروجی بارگذاری شده اند [۴]. در نتیجه ی تعداد کم و شدت بارگذاری، این کاواک های می توانند ویژگی های متفاوتی نسبت به کاواک های کاملاً منزوی یا کاواک های کوپل شده ی کاملاً متناوب از خود به نمایش گذارند که این ویژگی ها تابع تعداد این کاواک ها، میزان بارگذاری توسط موجبر خروجی، ولتاژ باریکه ی الکترونی و پارامتر های دیگر است. هدف مقاله ی فوق، بررسی یک سیستم زوج کاواک کوپل شده ی بارگذاری شده و مطالعه ی تغییرات بهره ی RF آن در باند فرکانسی کاری با تغییرات ولتاژ باریکه، میزان هم سرعت شدن RF-باریکه و میزان بارگذاری موجبر خروجیست.

به منظور بررسی موارد یاد شده، ساختار زوج حفره ی کوپل شده ی بار گذاری شده با یک مدار معادل مدل شده است. پارامترهای مدار فوق به گونه ای تنظیم شده اند که اصلی ترین ویژگی های ساختار کاواکی را در مود کاری مورد استفاده، موسوم به "مود کاواک" [۵] به درستی مدل

سامانه های کلاسترون در بسامد های میکروویوی، از کاواک های الکترومغناطیسی بهره می جویند که المان هایی ذاتا باند باریک اند. یک تکنیک افزایش پهنای باند، استفاده از یک قسمت شامل کاواک های کوپل شده به عنوان قسمت انتهایی ساختار RF لامپ است. کوپلاژ کاواک ها، برای نمونه، می تواند از طریق شیاری لویبایی شکل انجام پذیرد (شکل ۱). در صورت طراحی مناسب این قسمت، پهنای باند ساختار کلی می تواند بهبود یابد. استفاده از کاواک کوپل شده در برخی از مود های کاری می تواند به افزایش بهره یا بازده لامپ بیانجامد. ساختار کاواک کوپل شده، در حالت کلی، یک ساختار متناوب است که با فرض قرار گرفتن تعداد نامحدودی از آن به صورت یک زنجیره، تشکیل یک موجبر متناوب می دهد که دارای یک باند فرکانسی انتشار موج موسوم به باند گذر می باشد [۳]. در ساختار لامپ موج رونده با حفره های کوپل شده (CCTWT) از تعداد زیادی کاواک کوپل شده، برای نمونه، بیش از ده کاواک در هر قسمت ایزوله ی لامپ، استفاده می شود.



شکل ۲: مدار معادل کاواک کوپل شده. (الف) بدون تلف و بارگذاری نشده. (ب) بارگذاری شده با موجبر خروجی

توان نشان داد که در این حالت داریم:

$$f_{\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{eq}C_0}} \quad (۴)$$

که سلف معادل در رابطه ی بالا، موازی شده ی سلف موازی و نیمی از سلف سری است:

$$L_{eq} = L_0 \left\| \left( \frac{-L_1}{2} \right) \right. \quad (۵)$$

با توجه به تعیین شدن سلف موازی از ویژگی های نقطه ی  $2\pi$  در قبل، اندازه ی سلف سری به صورت زیر تعیین می شود:

$$\frac{L_1}{L_0} = \frac{2}{\left(1 - \left(\frac{f_{\pi}}{f_{2\pi}}\right)^2\right)} \quad (۶)$$

بنابر آن چه گفته شد، با داشتن سه پارامتر میدانی فرکانس نقطه  $\pi$ ، فرکانس نقطه ی  $2\pi$  و نسبت  $R/Q$ ، سه پارامتر مداری  $C_0$ ،  $L_0$  و  $L_1$  مدار معادل کاواک های همسان کوپل شده تعیین می شود. برای تعیین رسانایی موازی شده با کاواک نهایی که مدل کننده ی بارگذاری موجبر است (شکل ۲- پایین)، می توان به طور تقریبی بدین صورت عمل نمود که تزویج دو کاواک را که از طریق شیار لویبایی شکل صورت می گیرد با قراردادن یک صفحه ی فلزی در وسط شیار فوق از بین برده و  $Q$  بارگذاری رزوناتور متصل به موجبر را به دست آوریم و با  $Q$  مدار تزویج نشده ی معادل یکسان قرار داده، از رابطه ی زیر رسانایی معادل را بر آورد می کنیم:

$$G_0 = \frac{1}{(R/Q)_s Q} \quad (۷)$$

باید توجه نمود که اتصال موجبر به رزوناتور، دارای یک راکتانس معادل نیز هست که با مدار کاواک، موازی می شود.

در این جا باید بیان کنیم که مدلسازی کامل یک ساختار گسترده ی میدانی توسط تعداد متناهی از المان های فشرده ی مداری امکان ندارد. برای ساختار حفره های کوپل شده، تعداد قابل توجهی المان فشرده ی

کنند. باریکه ی الکترونی با استفاده از رهیافت وسل برگ مدل شده است. سامانه در ناحیه ی خطی عملکرد خود مورد بررسی قرار گرفته است. ساختار یاد شده، در قسمت PIC نرم افزار CST در ولتاژ های باریکه و بسامد های متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج دو مدل مداری و مدل PIC در حالت بارگذاری شدید کاواک ها با یکدیگر مقایسه شده اند. با استفاده از نتایج به دست آمده، در مورد حساسیت سامانه نسبت به ولتاژ باریکه، هم سرعتی فاز موج- باریکه و اهمیت برهمکنش اسمیت- پورسل در این سامانه بحث شده است.

## ۲- مدلسازی سامانه ی حفره های تزویج شده ی بارگذاری شده

مدل مداری کاواک منزوی بی تلف بارگذاری شده برای یک مود خاص رزونانسی، یک مدار LC موازی است که مقادیر سلف و خازن آن با استفاده از دو پارامتر فرکانس رزونانس  $f_r$  و نسبت  $R/Q$  تک کاواک که گاه مسامحتا امپدانس (و یا امپدانس مشخصه) کاواک نامیده می شود به دست می آید:

$$C_0 = \frac{1}{2\pi(R/Q)_{s.c.}f_r} \quad (۱)$$

$$L_0 = \frac{(r/Q)_{s.c.}}{2\pi f_r} \quad (۲)$$

در مورد دو کاواک تزویج شده، دو فرکانس رزونانس مشخصه وجود دارد. در حالت نوسان متقارن موسوم به نقطه ی  $2\pi$ ، میدان های الکتریکی دو کاواک هم فازند. در نوسان پاد متقارن یا مود  $\pi$ ، میدان های یاد شده ناهم فازند. در مورد تزویج دو کاواک همسان، صرف نظر از اختلاف فاز نوسان، اندازه ی بردار میدان در هر دو کاواک چه در مود  $\pi$  و چه در مود  $2\pi$  یکسان است.

مدار معادل شکل ۲- الف با استفاده از یک عنصر کوپلاژ (در این جا یک سلف) تمام ویژگی های ذکر شده ی میدانی را معادل سازی مداری می کند. با قرار دادن یک سلف با مقدار منفی، بسامد نوسانات نقطه ی  $2\pi$  بیش از نقطه ی  $\pi$  می شود که در ساختار کاواک کوپل شده با شیارهای لویبایی شکل رخ می دهد و مورد نظر این مقاله است.

می توان نشان داد که در مود نوسان متقارن ( $2\pi$ ) روابط (۱) تا (۳) هم چنان قابل استفاده اند و از روابط یاد شده برای یک ساختار با فرکانس رزونانس  $2\pi$  و امپدانس مشخصه ی معین، می توان سلف و خازن موازی معادل را تعیین کرد. فرکانس رزونانس نقطه ی  $2\pi$ ، فرکانس رزونانس مدارهای کوپل نشده است:

$$f_{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0C_0}} \quad (۳)$$

در مود نوسانات نامتقارن، ولتاژ دوسر سلف کوپلاژ دقیقاً قرینه اند. می

اول  $V_1$  از حل معادله ی وسل- برگ به دست می آید. در تقریب موسوم به گاف- نقطه ای، پاسخ به صورت زیر ساده می شود:

$$I_2 = -B_{21}V_1; B_{21} = -j \frac{I_0}{2V_0} \frac{\omega}{\omega_p} M \sin(\theta_q) e^{-j\theta_e} \quad (A)$$

در معادله ی بالا  $I_0$  جریان DC باریکه،  $V_0$  ولتاژ باریکه،  $\omega$  فرکانس زاویه ای سیگنال تحریک،  $\omega_p$  فرکانس نوسانات پلاسما،  $M$  ضریب کوپلاژ گاف،  $\theta_q$  اختلاف فاز متناظر با نوسانات کاهش یافته پلاسما و  $\theta_e$  اختلاف فاز الکترونی است [۱]. در مورد برهمکنش باریکه و یک زوج کاواک، در رژیم خطی اصل جمع آثار برقرار است و دامنه ی جریان RF ایجاد شده در کاواک دوم مجموع سه جمله است:

$$I_2 = T_{21}I_1 + B_{21}V_1 + B_{22}V_2 \quad (9)$$

جمله ی اول شامل ضریب مختلط گذر جریان باریکه است که دارای اثرات تغییر فاز امواج پلاسمایی باریکه ی الکترونی است، جمله ی دوم اثر ولتاژ گاف اول بر جریان در کاواک دوم است و شامل یک ضریب ترانسپانسیست که در بالا بیان شد، و جمله ی سوم بیانگر اثر ولتاژ گاف دوم بر جریان RF باریکه در این کاواک است که شامل ادمیتانس خودی باریکه است.

جمله ی اول در حالت کلی به نسبت دو موج سریع و موج آهسته ی پلاسمایی در کاواک اول بستگی دارد. با فرض یکسان بودن سهم این دو جریان در کاواک اول، این جمله برابر است با [۱]:

$$T_{21} = \cos(\theta_q) e^{-j\theta_e} \quad (10)$$

و جمله ی سوم شامل یک قسمت رسانایی و یک قسمت سوسپتانس است:

$$B_{22} = G_b + jB_b \quad (11)$$

که برای یک ساختار خاص از روابط به دست آمده توسط Ramo [۵] قابل برآورد هستند.

#### ۴- معادلات خطی برهمکنش میدان- باریکه و حل آن برای

##### مقادیر مختلف ولتاژ باریکه و ضریب کیفیت

اثر باریکه بر میدان، که در لامپ های مایکروویو معادله ی مدار نامیده می شود، برای یک شبکه ی دو دهانه ای توسط ماتریس  $Z$  شبکه بیان می شود:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = [Z] \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

عناصر ماتریس امپدانس به صورت زیر به ادمیتانس بازوهای سری و موازی مرتبط اند که البته در این معادلات به ادمیتانس بازوهای موازی، ادمیتانس باریکه نیز افزوده می شود. مشخصات ناحیه ی برهمکنش در جدول ۱ ذکر شده است.

مداری نیاز است تا ویژگی های اصلی ساختار تنها برای دو مود خاص موسوم به مود کاواک و مود شیار [۵] به صورت هم زمان میسر شود. همین مدل نیز دارای درجه ای از تقریب است، مانند مدلی که به مدل کارنو موسوم است [۵] و به ویژه برای لامپ های موج رونده (CCTWT) به کار می رود. اگر بررسی مود های شیاری (مودهایی که دامنه ی میدان الکترونی در ناحیه ی لویایی قابل توجه است) به دلیل فرکانس خارج از محدوده ی این مود ها مورد نظر نباشد و تنها مود مورد نظر مودهای کاواکی باشند، مانند آنچه ما در جستجوی آن هستیم، مدار معادل بازم ساده تر می شود. مدار مورد استفاده ی ما در این مقاله در عین سادگی و تقریبی بودن، تقریباً تمام ویژگی های اصلی مود های کاواکی ساختار حفره های ترویج شده را در بر می گیرد.

#### ۳- مدلسازی خطی باریکه ی الکترونی با استفاده از رهیافت

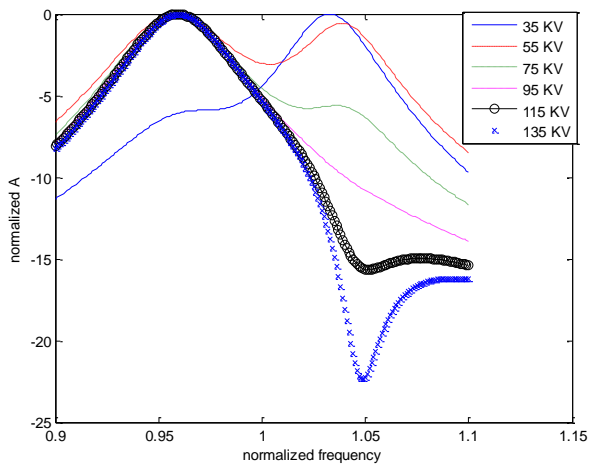
##### وسل- برگ: اثر میدان بر باریکه

برهمکنش (اثر متقابل) میدان- باریکه در لامپ های مایکروویو شامل وارد شدن نیروی لورنتز به الکترون ها ناشی از میدان های RF ساختار و تقویت همین میدان RF ناشی از تحریک ساختار الکترومغناطیسی توسط جریان RF شکل گرفته در باریکه ای الکترونی است. اثر میدان بر باریکه توسط معادله ی الکترونی و اثر باریکه بر میدان توسط معادله ی مداری کمی می شود.

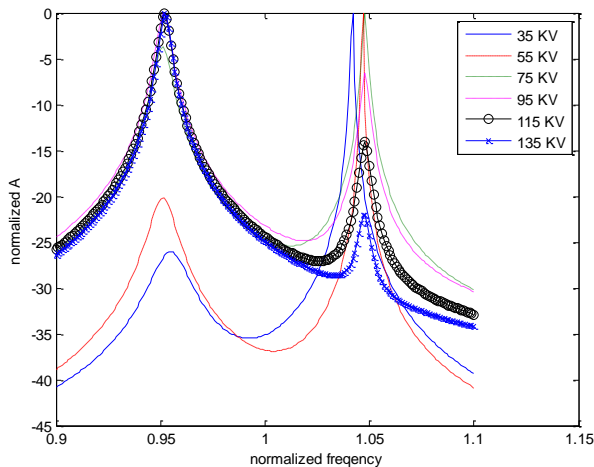
در حالت عملکرد خطی لامپ، باریکه ی الکترونی می تواند به صورت یک سیال باردار مختل شده توسط میدان RF در نظر گرفته شود. الکترون ها در هر نقطه ی باریکه و در هر زمان مشخص، دارای یک سرعت خاص می باشند، به عبارت دیگر مقادیر ویژگی های سیال تک مقداری است. توصیف سیال در این ناحیه توسط نگرش موسوم به اوپلری تک مقداری صورت می گیرد. در عملکرد سیگنال بزرگ لامپ، یک نقطه ی مشخص در نواحی انتهایی لامپ می تواند هم زمان الکترون های تند شده و کند شده توسط برهمکنش با میدان RF را شامل شود که به یکدیگر رسیده و بسته های الکترونی را تشکیل داده اند، در این حالت تابع سرعت در این نقاط یک تابع چند مقداری است. در این ناحیه، توصیف باریکه در دیدگاه موسوم به لاگرانژی انجام می شود که مورد نظر مقاله نیست.

در حالت اوپلری، تحول دامنه ی مختلط جریان RF بر روی باریکه ی الکترونی می تواند توسط معادله ی دیفرانسیل درجه دوم موسوم به معادله ی وسل- برگ کمی شود. حل بسته ی این معادله در حالت کلی در متون مربوط ذکر شده است [۱].

جریان RF ایجاد شده در کاواک دوم  $I_2$  در نتیجه ی ولتاژ RF گاف کاواک



شکل ۳: تغییرات معیار بهره برهمکنش با ولتاژ باریکه. Q برابر ۱۰ است.



شکل ۴: تغییرات معیار بهره موثر برهمکنش با ولتاژ باریکه. Q برابر ۱۰۰ است.

جدول ۱: ویژگی های RF و الکترونی سامانه ی شبیه سازی شده

ولتاژ سنکرون $2\pi$ (کیلو ولت)	ولتاژ سنکرون $\pi$ (کیلو ولت)	جریان DC باریکه (آمپر)	پهنای باند بهنجار شده $\frac{f_{2\pi} - f_{\pi}}{0.5(f_{2\pi} + f_{\pi})}$	R/Q تک کاواک (اهم)
۱۱۸٫۷	۲۸٫۵	۱۲	۹٫۵٪	۱۰۰

در شکل ۳، یعنی در بارگذاری شدید موجبر، در ولتاژ ۵۵ کیلوولت، پاسخ فرکانسی کاواک هموارترین حالت خود را دارد. در این حالت کاواک به عنوان یک دریافت کننده ی پهن باند عمل می کند. مود های  $\pi$  و  $2\pi$  به طور پیوسته ای به یکدیگر تبدیل می شوند و در حالت گذار

$$z_{11} = \frac{y_2 y_3}{y_2 + y_3 + y_1 y_2 y_3} \quad (13)$$

$$z_{22} = \frac{y_1 y_3}{y_1 + y_3 + y_1 y_2 y_3}$$

$$z_{12} = z_{21} = \frac{y_3}{y_1 y_2 + y_2 y_3 + y_1 y_3}$$

که در روابط بالا داریم:

$$y_1 = y_2 = j(\omega C_0 - \frac{1}{\omega L_0}) + G_b + jB_b \quad (14)$$

$$y_3 = j \frac{1}{\omega L_1}$$

به منفی بودن سلف کوپلاژ در مدار و مثبت بودن  $L_1$  در هنگام به دست آوردن  $y_3$  توجه شود.

حل هم زمان معادلات ۹ و ۱۲ به ازای یک مقدار مشخص جریان الکترونی کاواک اول به عنوان تحریک، مقدار ولتاژ در کاواک دوم را به دست می دهد. توان خارج شده از موجبر متصل به کاواک دوم برابر با توان اتلاف شده در رسانایی معادل است و برابر است با:

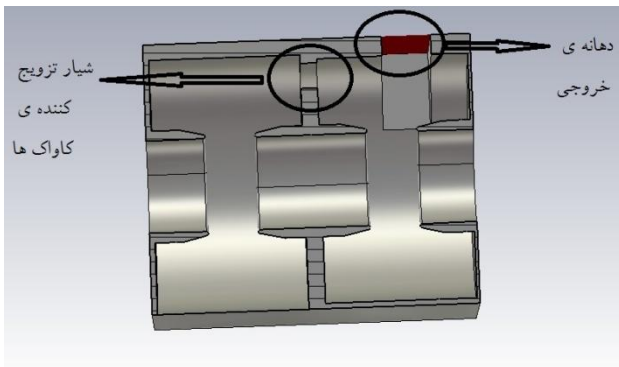
$$P_{out} = \frac{1}{2} G V_2^2 = \frac{1}{2(R/Q)_{s.c.}} V_2^2 \quad (15)$$

به دلیل خطی بودن مساله، توان بالا با مربع جریان تحریک رابطه ی مستقیم دارد. کمیت های متفاوتی را می توان به عنوان معیار شدت برهمکنش برگزید. برای نمونه، با تقسیم توان خروجی بر حاصل ضرب مربع جریان تحریک امپدانس در امپدانس مشخصه ی کاواک ها، یک معیار بهره ی بدون بعد متناظر با شدت برهمکنش باریکه-کاواک به دست می آید:

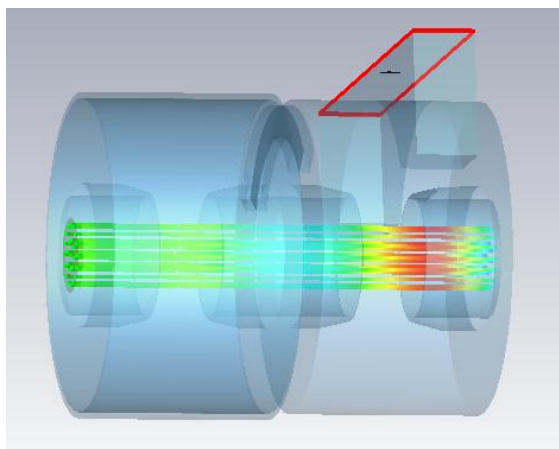
$$A = \frac{2P_{out}}{(R/Q)_{s.c.} I_1^2} = \frac{G V_2^2}{(R/Q)_{s.c.} I_1^2} = \frac{1}{(R/Q)_{s.c.}^2} \frac{V_2^2}{Q I_1^2} \quad (16)$$

هر چه توان RF خارج شده از کاواک دوم (نهایی) به ازای یک جریان RF در کاواک اول بیشتر باشد، کوپلاژ باریکه- میدان در کاواک مزدوج شدیدتر است. یک انتخاب دیگر می تواند یک امپدانس موثر برهمکنش باشد که بر خلاف A، دارای توان اول R/Q در مخرج رابطه ی ۱۶ است. به هر حال، ما A تعریف شده در معادله ی ۱۶ را به عنوان معیار برهمکنش یا معیار بهره برگزیده ایم. در این مقاله، به تاثیر ضریب کیفیت و ولتاژ باریکه بر این معیار بهره خواهیم پرداخت.

در شکل های ۳ و ۴ اثر تغییرات ولتاژ باریکه ی الکترونی بر تغییرات معیار بهره آمده است. در منحنی ها، محور عمودی برحسب dB و بهنجار شده است. محور افقی فرکانس نرمالیزه شده به میانگین فرکانس های  $\pi$  و  $2\pi$  را نشان می دهند.



شکل ۵: شمای ساختار زوج حفره‌ی تزویج شده.



شکل ۶: بسته‌های الکترونی تزریق شده به ساختار.

ی ساختار را نشان می‌دهد. در این شکل، شیار لوبیایی که باعث کوپل شدن دو کاواک است و موجبر خروجی نشان داده شده‌اند. برای تحریک موجبر از بسته‌های الکترونی گاوسی موجود در قسمت PIC استفاده شده است (شکل ۶). خواص گاوسی بسته به صورت ضریب ثابتی از زمان تناوب سیگنال RF مورد تحلیل داده شده تا محتوی هارمونیک بسته‌ی الکترونی در هنگام ورود به کاواک با تغییر فرکانس تغییر نکند. نکته‌ای که در استفاده از این بسته‌ها می‌بایست بدان توجه کرد بحث نوع مدولاسیون بسته‌ی باردار [۳] است. نوع مدولاسیون بسته‌ی الکترونی فوق، مدولاسیون چگالی است، بسته‌های فوق از الکترون‌هایی هم سرعت تشکیل شده‌اند. البته این بسته نیز به درستی حاوی یک جریان RF است که سیگنال خروجی را در کاواک ایجاد می‌کند. اما نکته‌ی قابل توجه آن است که در بسته‌های الکترونی تشکیل شده در لامپ‌های مایکروویو، مدولاسیون چگالی الزاماً همراه با مدولاسیون سرعت است. به عبارت دیگر، بسته‌های الکترونی تشکیل شده در این لامپ‌ها، حاصل به هم رسیدن الکترون‌های تند و کند هستند و در آن هامدولاسیون

بینایی، در بعضی بسامدها انرژی RF عموماً در کاواک اول و در برخی دیگر از بسامدها در کاواک دوم متمرکز است و تک کاواک‌ها شبیه به حالت تزویج نشده عمل کرده، مودهای کوپل شده استقلال خطی خود را از دست می‌دهند. افزایش ولتاژ و باریکه برای بسامدهای نزدیک به نقاط  $2\pi$  و  $\pi$  اثرات معکوس یکدیگر خواهد داشت. مدل مداری پیش بینی می‌کند که افزایش ولتاژ از ۳۵ به ۱۱۵ کیلوولت و نزدیک شدن به ولتاژ سنکرون مود  $\pi$ ، بهره‌ی فرکانس پایین ساختار را که در اطراف نقطه  $\pi$  است افزایش داده، بهره‌ی فرکانس بالا کاهش می‌یابد. واضح است که با کاهش ولتاژ و نزدیک شدن سرعت باریکه به سرعت فاز موج در نقطه  $2\pi$ ، روند برعکس می‌شود و بهره‌ی فرکانس بالا، یعنی اطراف نقطه  $2\pi$  افزایش می‌یابد. با توجه به مقادیر ولتاژ ذکر شده، این رابطه‌ی بهره-ولتاژ با اصل هم سرعتی نسبی فاز موج-باریکه در برهمکنش اسمیت-پورسل در تطابق است.

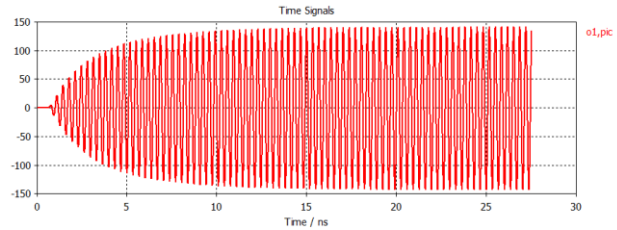
شکل ۴ معیار بهره ساختار RF را در هنگامی نشان می‌دهد که بارگذاری موجبر کمتر از حالت قبل است ولتاژ باریکه‌ای که در آن معیار برهمکنش در بسامدهای  $\pi$  و  $2\pi$  برابر است، در این بارگذاری برابر ۸۱ کیلوولت است. در این بارگذاری، در هیچ ولتاژ باریکه‌ای بهره‌ی ساختار به حد حالت قبل هموار نخواهد بود و در بازه‌ی ۳۵-۱۱۵ کیلوولت، همواره دو قله‌ی واضح در پاسخ فرکانسی معیار برهمکنش دیده می‌شود که تقریباً منطبق بر بسامدهای  $\pi$  و  $2\pi$  هستند. در این حالت، مودهای متقارن و پادمقارن هویت مشخص دارند و تقریباً مستقل از ولتاژ باریکه، یک قله در بسامد متقارن و یک قله در بسامد پادمقارن وجود خواهد داشت و برهمکنش باریکه‌ی الکترونی برخلاف حالت قبل همواره با مودهای کوپل شده است و نه تک کاواک‌ها. در عین حال، اثر تغییر معیار بهره با تغییر ولتاژ در فرکانس بالا و پایین به مانند قبل دیده می‌شود که منطبق بر اثر اسمیت-پورسل است.

توجه شود که در حالت بارگذاری شدید (شکل ۳) در برخی ولتاژهای بالا، یک کمینه‌ی بهره در بسامد  $2\pi$  دیده می‌شود و در همین ولتاژها، بهره در اطراف بسامد  $\pi$  به حداکثر رسیده و تقریباً ثابت می‌شود. ایجاد کمینه در بسامد  $2\pi$  در حالت بارگذاری ضعیف (شکل ۴) تا ولتاژهای بالا دیده نمی‌شود.

#### ۵- شبیه‌سازی PIC و مقایسه با روش مداری در بارگذاری شدید ( $Q=10.5$ )

برای بررسی رفتار کاواک‌های کوپل شده، این ساختار در قسمت PIC نرم افزار CST مورد تحلیل قرار گرفت. شمای ساختار در شکل ۵ دیده می‌شود. این شکل برش از نیمه

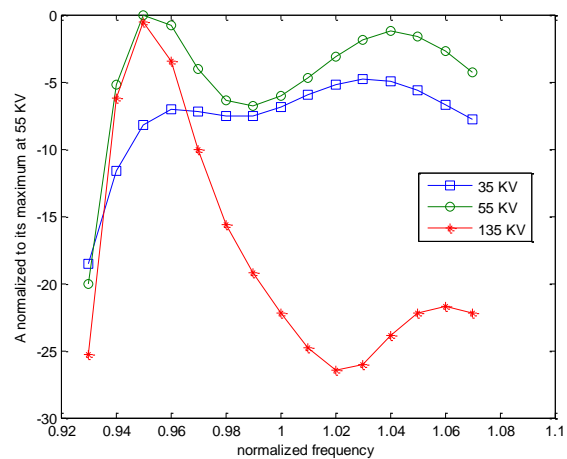
مداری، بهره ی فرکانس بالا بیشتر است، اما نمودار به دست آمده از شبیه سازی PIC هموارتر از نمودار به دست آمده از مدل مدار است. همانند مدل مداری، در ولتاژ ۵۵ کیلوولت، بهره ی بسامد بالا و پایین تقریباً برابر می شوند. در عین حال، تغییرات بهره کمی شدیدتر و پاسخ فرکانسی نامتقارن تر از پیش بینی مدل مداری می باشد.



شکل ۷: سیگنال خروجی از موجبر

## ۶- نتیجه گیری

از یک مدل مداری برای مدلسازی ساختار حفره های توزیع شده استفاده شده است. با استفاده از ماتریس امپدانس مدار، اثر باریکه بر میدان RF مدل گردیده است. اثر میدان بر باریکه توسط تقریب گاف-نقطه ای اعمال شده در معادله ی وسل برگ مدل شده است. بررسی کمی برهمکنش مستلزم حل هم زمان معادلات ذکر شده است. حل معادله در شرایط مختلف ولتاژ، نشان می دهد که به طور کلی، با افزایش سرعت الکترون ها، حداکثر بهره ی سیستم در فرکانس هایی با سرعت فاز بالاتر رخ می دهد و درجه ای از هم سرعت شدن فاز RF- باریکه در این سیستم با حداقل تعداد کاواک های کوپل شده دارای اهمیت است. شبیه سازی PIC نیز همین پیش بینی را تایید می کند. به عبارت دیگر، اثر اسمیت-پورسل، حتی برای تعداد کم کاواک های کوپل شده نیز در برهمکنش RF-باریکه سهیم است.



شکل ۸: نتایج PIC برای حالت بارگذاری شدید موجبر (Q=10.5)

در سه ولتاژ باریکه ی ۳۵، ۵۵ و ۱۳۵ کیلوولت

## مراجع

- [1] Gregory S. Nusinovich , Robert J. Barker , Neville C. Luhmann , John H. Booske, Modern Microwave and Millimeter-Wave Power Electronics, Wiley-IEEE Press; 2005.
- [2] A. Roitman , D. Berry , B. Steer, "State-of-the-Art W-Band Extended Interaction Klystron for the CloudSat Program", IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL. 52, NO. 5, pp. 895-898, 2005.
- [3] A. P. Kuznetsov, S. P. Kuznetsov, A. G. Rozhnev, E. V. Blokhina, L. V. Bulgakova, "Wave Theory of a Traveling-Wave Tube Operated Near the Cutoff", Radiophysics and Quantum Electronics, Volume 47, Issue 5-6, pp 356-373, May 2004.
- [4] D. H. Preist , W. J. Leidigh, "Experiments with High-Power CW Klystrons Using Extended Interaction Catchers", IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, pp. 201- 211 ,1963.
- [5] A.S.Gilmour, Jr. , Klystrons ,Traveling Wave tubes, Magnetrons, Crossed field Amplifiers and Gyrotrons. ARTECH HOUSE, 2011.

سرعت روی داده است. در عین حال، به نظر می رسد رفتار کلی پاسخ فرکانسی کاواک مزدوج برای هدف مورد بررسی ما تا حد قابل قبولی مستقل از آرایش فضای فاز ذرات تزریق شده باشد، یعنی بیشتر تحت تاثیر محتوای هارمونیک جریان باریکه قرار دارد. ما از همین فرض بهره جستیم و برای ولتاژ های باریکه ی متفاوت و برای بارگذاری شدید موجبر (Q=10.5)، پاسخ فرکانسی ساختار را به دست آورده ایم. شکل ۷ یک نمونه ی سیگنال خروجی از موجبر را نمایش داده است. شکل ۸ نتایج شبیه سازی PIC راد سه ولتاژ ۳۵، ۵۵ و ۱۳۵ کیلوولت نشان می دهد. مقدار معیار برهمکنش به مقدار حداکثر خود در ولتاژ ۵۵ کیلوولت بهنجار شده است.

برای مقایسه با مدل مداری، به شکل ۳ در ولتاژهای متناظر مراجعه شود. مهم ترین نتیجه ی این نمودارها این است که مدل PIC نیز اهمیت هم سرعت شدن فاز RF- باریکه را تقریباً به همان صورت مدل مداری نشان می دهد. همانند مدل مداری، در ولتاژ پایین برهمکنش شدیدتر با بسامد بالا (نزدیک به بسامد  $2\pi$ ) و در ولتاژ بالا برهمکنش شدیدتر با بسامد پایین (نزدیک به بسامد  $\pi$ ) رخ می دهد.

شکل منحنی پاسخ فرکانس در ولتاژهای متوسط و بالا مشابه شکل پیش بینی شده در مدل مدار است. در ولتاژهای پایین، هر چند مشابه مدل