

تأثیر بازتابنده‌ها در افزایش توان خروجی لامپ تریود بازتابی

نادر شفیع‌خواه^۱، سید محمدجواد رضوی^{۲*}، محسن یوسفیان^۳، سید محسن رضوی^۴

۱، ۳ و ۴- کارشناس ارشد، ۲- دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(دریافت: ۹۷/۱۰/۲۰، پذیرش: ۹۸/۰۲/۱۶)

چکیده

لامپ تریود بازتابی یکی از انواع ویرکتورها از خانواده لامپ‌های ماکروویو توان بالا است که عمده کاربرد آن اختلال در عملکرد سامانه‌های دشمن از طریق ایجاد میدان الکترومغناطیسی شدید روی هدف است. در این مقاله ابتدا مقایسه‌ای بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی یک لامپ تریود بازتابی ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی سازگاری خوبی با نتایج تجربی دارند. از نرم‌افزار CST STUDIO SUITE برای شبیه‌سازی استفاده شده است که بر مبنای روش انتگرال محدود که شامل کد ذره در سلول است عمل می‌کند. در پژوهش‌های گذشته با استفاده از دو بازتابنده دیسکی و نواری در این لامپ، میدان الکتریکی خروجی حداکثر ۱۲۶ درصد افزایش داده شده است، در این پژوهش برای اولین بار با معرفی و استفاده از بازتابنده دیواره‌ای میدان الکتریکی خروجی ۱۹۳ درصد افزایش داده شد. نشان داده شد هر یک از بازتابنده‌های دیسکی، نواری و دیواره‌ای به ترتیب ۳۷، ۳۴ و ۲۹ درصد در افزایش میدان الکتریکی خروجی نقش داشته‌اند. همچنین نشان داده شد تغییرات توان خروجی نسبت به مکان بازتابنده دیواره‌ای پریودیک است.

کلیدواژه‌ها: تریود بازتابی، ویرکتور، بازتابنده، لامپ‌های ماکروویو

Reflectors Effect on Increasing the Output Power of Reflex Triode

N. Shafieikhah, M. J. Razavi*, M. Yosefian, M. Razavi

Malek-Ashtar University of Technology
(Received: 10/01/2019; Accepted: 06/05/2019)

Abstract

The reflex triode is one of the varieties of vircators that are among several types of high power microwave sources. The Main application of these tubes is the disruption of enemy systems by creating a strong electromagnetic field on the target. This paper presents a comparison of experimental and simulation results of a reflex triode. Experimental and simulation results are in good agreement. The software used for simulation is the CST STUDIO SUITE. It is based on the Finite Integration Technique (FIT) and includes a particle in cell code. In previous studies, with the use of two disk-shaped and strip reflectors in this tube, the electric field output was increased by a maximum of 126%. In this research for the first time with the introduction and use of wall reflector, the electric field output was increased by 193%. It was shown that each of the disk-shaped, strip, and wall reflectors increased 37% and 29% of the output electric field, respectively. A variation in the position of the reflector causes a variation in the radiation power. This variation is periodic.

Keywords: Reflex Triode, Vircator, Reflector, Microwave Tubes

۱. مقدمه

بیان شده است [۶]. مهم‌ترین اعضای خانواده ویرکتورها عبارت‌اند از؛ ویرکتور محوری^۸، تریاود بازتابی^۹ و ویرکتور هم‌محور [۳].

محققان زیادی در سراسر جهان در دو دهه اخیر بر روی افزایش بازده نوسان‌ساز با کاتد مجازی تمرکز کرده‌اند [۷ و ۸]. برخی از محققین برای لامپ‌های ویرکتور محوری^{۱۰} ساختار جدیدی پیشنهاد کرده‌اند که کاتد مجازی درون یک محفظه تشدید قرار می‌گیرد و با تنظیم فرکانس رزونانس این محفظه تشدید می‌توان پهنای باند تشعشی و مدهای خروجی را کنترل کرد [۹]. با قرار دادن دو صفحه فلزی در ابتدا و انتهای محور آند و کاتد این لامپ‌ها می‌توانیم به صورت هم‌زمان توان نسبی در مد غالب و فرکانس اصلی را بهبود دهیم [۱۰]. با استفاده از چندین آند نیز می‌توان به توان خروجی بیشتری دست یافت و مد غالب خروجی را تغییر داد [۱۱]. در لامپ تریاود بازتابی یکی از راه‌های افزایش بازده، استفاده از بازتابنده‌ها است [۱۲]. برای اولین بار محققین دانشگاه تامسک^{۱۱} روسیه بازتابنده دیسکی را معرفی کردند و نشان دادند تغییر مکان این بازتابنده بر روی توان خروجی تأثیر مستقیم دارد [۱۳]. آن‌ها همچنین نشان دادند این بازتابنده از برخورد ذرات باردار و تشعشعات فرابنفش و تابش ترمزی به عایق خلأ نیز جلوگیری می‌کنند. محققین دانشگاه تگزاس تک آمریکا با انتخاب مناسب طول محفظه رزونانسی به جای استفاده از بازتابنده دیسکی نتایج مشابهی گرفتند [۱۴]. آن‌ها همچنین با طراحی یک آند جدید توانستند از این لامپ در نرخ تکرارهای بالا (۵۰۰ هرتز) استفاده کنند [۱۵]. در سال ۲۰۱۷ محققین بلاروسی به صورت هم‌زمان از بازتابنده دیسکی و نواری در این لامپ‌ها استفاده کردند و نتایج تجربی آن را ارائه دادند [۱۶].

برای تحلیل و شبیه‌سازی‌ها در این مقاله از بخش PIC^{۱۲} نرم‌افزار CST^{۱۳} استفاده شده است که این کد ذرات باردار را نیز در محاسبات خود وارد می‌کند و به برهمکنش الکترون‌ها و میدان‌های الکترومغناطیسی می‌پردازد.

در ادامه ابتدا لامپ تریاود بازتابی معرفی می‌شود سپس شبیه‌سازی لامپ تریاود بازتابی که محققین بلاروسی نتایج آزمون آن را ارائه کرده‌اند انجام شده است. در این لامپ به صورت هم‌زمان از بازتابنده دیسکی و نواری استفاده شده است. برای اولین بار یک بازتابنده حلقوی شکل دیواره‌ای معرفی گردیده و

لامپ‌های ماکروویو از منابع تولیدکننده و تقویت‌کننده امواج الکترومغناطیسی در فرکانس‌های ماکروویو تا ترا هرتز هستند. به‌طور کلی به لامپ‌هایی که دارای توان ماکزیمم بیش از ۱۰۰ مگاوات در گستره فرکانسی ۱ تا ۳۰۰ گیگاهرتز هستند منابع ماکروویو توان بالا گفته می‌شود [۱]. این ایده که تولید امواج الکترومغناطیسی قوی سبب آسیب یا اختلال در تجهیزات الکترونیکی و مخابراتی می‌شود سبب ساخت و آزمون منابع ماکروویو توان بالا شد [۲]. امروزه گسترش روزافزون سامانه‌های الکترونیکی در حوزه‌های نظامی، غیرنظامی و تجاری باعث شده است که بسیاری از زیرساخت‌ها و ساختارها وابستگی بسیار زیادی به مدارات الکترونیکی داشته باشند که این مسئله ضرورت کار بر روی لامپ‌های ماکروویو توان بالا را روشن می‌سازد.

از جمله این لامپ‌ها می‌توان به مگنترون نسبیتی^۱، کلاپسترون نسبیتی^۲، نوسانگر عایق ساز مغناطیسی^۳، نوسانگرهای نوسانگرهای موج برگشتی^۴، ویرکتور^۵، ژیراترن^۶ و لیزرهای الکترون آزاد اشاره کرد [۳]. این لامپ‌ها علاوه بر اختلال، کاربردهای زیادی در صنعت و سامانه‌های نظامی نظیر فرستنده‌های پر قدرت، رادارهای توان بالا، کوره‌های پلاسمایی، شتاب‌دهنده‌ها، انتقال توان در کاربردهای فضایی (انتقال توان از زمین به فضا و برعکس) و... دارند [۳]. لامپ‌های مولد موج ماکروویو نوسان‌ساز با کاتد مجازی^۷ که ویرکتور نیز خوانده می‌شوند به خاطر توانایی‌های بالایی که دارند در سال‌های اخیر گسترش فراوانی یافته‌اند. در مقایسه با انواع دیگر لامپ‌های پر قدرت ماکروویو، این لامپ‌ها دارای مزایای زیر هستند [۴ و ۵].

۱. دارای هندسه خیلی ساده هستند که باعث سادگی استفاده و ساخت آن‌ها می‌شود.
 ۲. لزوماً احتیاجی به میدان مغناطیسی خارجی ندارند که باعث حذف شدن سیم‌پیچ‌های مغناطیسی و منابع تغذیه آن‌ها می‌شود.
 ۳. قابلیت تنظیم فرکانسی در محدوده فرکانسی وسیعی دارند.
 ۴. به دلیل داشتن امیدانس پایین قابلیت اتصال به منابع تغذیه امیدانس پایین را دارند.
- علی‌رغم همه این مزیت‌ها، این لامپ‌ها دارای بازدهی پایین هستند. به صورت معمول بازده این لامپ‌ها کمتر از چند درصد

^۸ Axial Vircator

^۹ Reflex-Triode

^{۱۰} Axial Vircator

^{۱۱} Tomsk

^{۱۲} Particle in Cell

^{۱۳} Computer Simulation Technology

^۱ Relativistic Magnetrons

^۲ Relativistic Klystrons

^۳ Magnetically Insulated Line Oscillator (MILO)

^۴ Backward Wave Oscillator

^۵ Vircators

^۶ Gyrotrons

^۷ Virtual Cathode

G به هندسه وابسته است، m و e نیز به ترتیب جرم و بار الکترون هستند. مکان تشکیل کاتد مجازی در حدود فاصله آند-کاتد دورتر از آند قرار دارد.

اگر پرتو الکترونی به صورت کاملاً یکنواخت^۲ با شعاع r_b در درون لوله با سطح مقطع دایروی با شعاع r_o پخش شده باشد داریم [۱]:

$$G = 1 + \ln \left(\frac{r_o}{r_b} \right) \quad (۳)$$

با تشکیل کاتد مجازی دو اتفاق به طور هم‌زمان رخ می‌دهد [۳]:

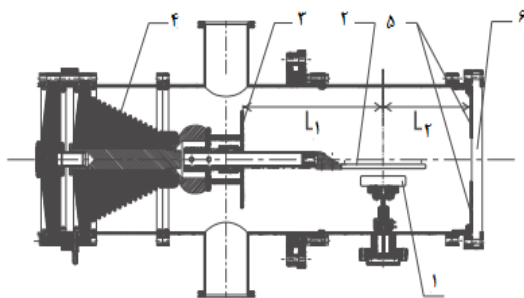
(۱) مکان کاتد مجازی به عقب و جلو نوسان می‌کند که فرکانس این نوسان در حدود فرکانس پلاسما ω_b است.

(۲) برخی از الکترون‌ها از درون کاتد مجازی عبور کرده و دور می‌شوند، اما تعداد دیگری از آن‌ها به سمت کاتد حقیقی برمی‌گردند و وقتی که نزدیک کاتد شدند به خاطر پتانسیل بازدارنده کاتد مجدداً به سمت کاتد مجازی برمی‌گردند، در این میان الکترون‌ها دچار یک حرکت نوسانی شده‌اند که به نام نوسان انعکاس شناخته می‌شود. در حالت معمولی فرکانس نوسان مکان کاتد مجازی با فرکانس انعکاس الکترون‌ها اختلاف دارد، باین‌وجود می‌توان هر دو این نوسان‌ها را تنظیم کرد تا با هم در یک فرکانس تشعشع کنند.

در لامپ تریاود بازتابی همواره فرکانس اصلی ناشی از نوسان کاتد مجازی است که رابطه تقریبی آن به صورت زیر است [۲۰]:

$$f_{osc} = 0.۲۶۵ \times \sqrt{\frac{e \times V_{gap}}{m \times d^3}} \quad (۴)$$

که در آن، e و m به ترتیب بار و جرم الکترون هستند، d فاصله آند - کاتد و V_{gap} ولتاژ قرار گرفته دو سر آند - کاتد است. شکل (۲) ساختار لامپ تریاود بازتابی مورد مطالعه را نشان می‌دهد [۱۶].



۱. کاتد، ۲. آند، ۳. بازتابنده دیسکی، ۴. عایق خلاء، ۵. بازتابنده نواری و ۶. پنجره

موج‌بری

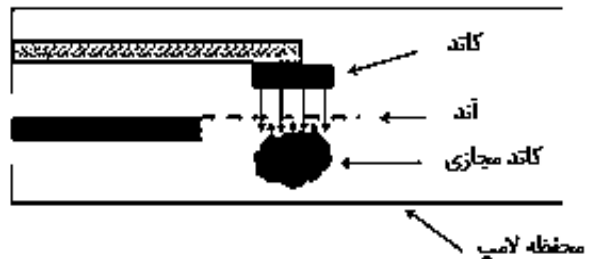
شکل ۲. ساختار لامپ تریاود بازتابی [۱۶].

به صورت هم‌زمان با بازتابنده دیسکی و نواری به کار گرفته شده است که موجب افزایش ۱۹۳ درصدی در توان خروجی شده است. همچنین برای اولین بار نتایج تجربی و نتایج شبیه‌سازی با نرم‌افزار CST مقایسه شده‌اند سپس در بخش چهارم نقش هر یک از بازتابنده‌ها در افزایش توان خروجی بررسی شده است. همچنین نشان داده شده است تغییرات توان خروجی نسبت به مکان بازتابنده دیواری پیرویدیک است.

۲. لامپ تریاود بازتابی

به طور کلی لامپ‌های ویرکیاتور با تغییر فاصله آند - کاتد و همچنین دامنه ولتاژ اعمالی قابلیت تنظیم فرکانسی دارند [۱۷]، در بین انواع لامپ‌های ویرکیاتور تریاود بازتابی به علت قابلیت تنظیم فاصله آند - کاتد از بیرون بدون شکستن خلاء دارای اهمیت ویژه‌ای است [۱۸].

قاعده کلی تولید موج ماکروویو توسط تریاود بازتابی در شکل (۱) نشان داده شده است. اگر بین صفحات آند و کاتد یک پالس ولتاژ قوی اعمال کنیم، یک پرتو الکترونی در شکاف دیود سرعت می‌گیرد. پرتو الکترونی از داخل آند عبور می‌کند و به محدوده سمت دیگر آند تزریق می‌شود. چنانچه جریان پرتو تزریقی از جریان محدودیت بارفضایی^۱ این محیط بیشتر باشد، کاتد مجازی در مکان خاصی شکل می‌گیرد و مقدار قابل توجهی از پرتو الکترونی را منعکس می‌کند [۱۹].



شکل ۱. مفهوم تشکیل کاتد مجازی

رابطه کلی جریان محدودیت بارفضایی I_{SCL} برای محیطی که پرتو الکترونی در آن حرکت می‌کند به صورت رابطه (۱) است [۱]:

$$I_{SCL} (KA) = \frac{8.5}{G} \left(\gamma_0^{2/3} - 1 \right)^{3/2} \quad (۱)$$

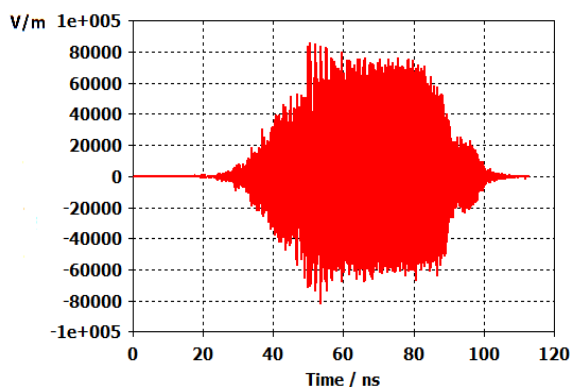
که در آن، γ_0 همان فاکتور نسبیت است و با ولتاژ آند-کاتد در دیود (V_o) به صورت زیر رابطه دارد [۱]:

$$\gamma_0 = 1 + \frac{eV_o}{mc^2} = 1 + \frac{V_o (KV)}{511} \quad (۲)$$

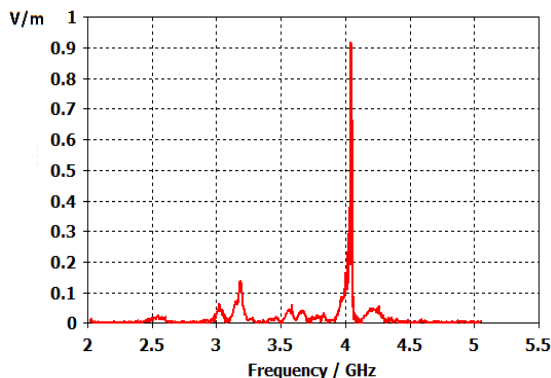
^۱ Space Charge Limit Current

است، همچنین فاصله بهینه بازتابنده دیسکی و نواری از محور آند - کاتد با توجه به نتایج تجربی به ترتیب ۲۹۰ و ۱۶۴ میلی‌متر در نظر گرفته شده است [۱۶].

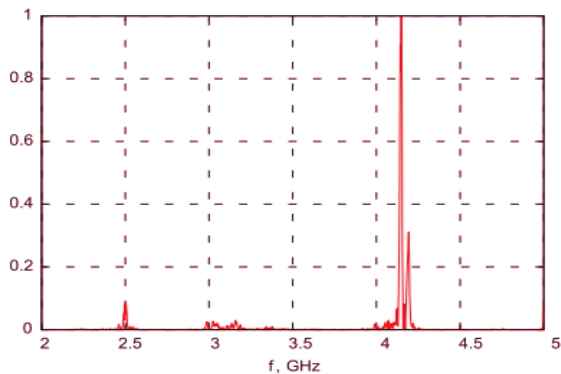
با قرار دادن یک میدان الکتریکی در فاصله ۱۱٫۵ متری از دهانه خروجی لامپ، سیگنال خروجی در حالتی که بازتابنده دیسکی و نواری به ترتیب در فواصل ۲۹۰ و ۱۶۰ میلی‌متری از محور آند - کاتد قرار گرفته‌اند به دست می‌آید (شکل ۴) و با گرفتن FFT از سیگنال خروجی، طیف فرکانسی نرمالیزه شده حاصل می‌شود (شکل ۵). با توجه به شکل (۶) این نتیجه با نتایج تجربی ارائه شده در مرجع سازگاری خوبی دارد.



شکل ۴. سیگنال خروجی لامپ همراه با بازتابنده دیسکی و نواری



شکل ۵. طیف فرکانسی سیگنال خروجی لامپ در محیط شبیه‌سازی به ازای فاصله آند - کاتد ۱۶ میلی‌متر



شکل ۶. طیف فرکانسی سیگنال خروجی لامپ در آزمایش تجربی [۱۶].

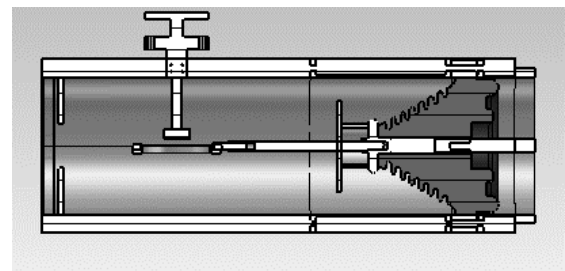
در این لامپ‌ها از عایق خلأ شیاردار استفاده می‌شود تا از ایجاد خزش‌های سطحی جلوگیری شود [۲۱]. برای افزایش بازده این لامپ از بازتابنده‌های دیسکی و نواری به‌طور هم‌زمان استفاده شده است. این بازتابنده‌ها با بازخورد یک نمونه از ماکروویو منتشرشده موجب سنکرون کردن ماکروویو تولیدی در یک فرکانس خاص در آند - کاتد می‌شوند و قرار دادن آن‌ها در مکان مناسب موجب تک فرکانس شدن توان خروجی می‌شود [۱۶]. فاصله این بازتابنده‌ها از محور آند - کاتد پارامتری تعیین‌کننده است به‌طوری‌که جانمایی نامناسب یک بازتابنده حتی می‌تواند موجب کاهش توان خروجی شود. بر اساس تحقیقات صورت گرفته بازتابنده دیسکی باید در مکان ضریب صحیحی از نصف طول موج قرار گیرد تا بیش‌ترین اثر را داشته باشد [۱۳]، اما رابطه مشخصی برای بازتابنده نواری به دست نیامده است و باید با جاروب مکان این بازتابنده در شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی مکان بهینه به دست آید. یکی دیگر از پارامترهای مهم طراحی جنس، ضخامت و ... پنجره موج‌بری است به‌طوری‌که هم استحکام لازم را داشته باشد و هم کمترین میزان برگشتی و اتلاف توان در طیف فرکانسی لامپ را داشته باشد [۲۲].

۳. شبیه‌سازی لامپ تراپود بازتابی

شبیه‌سازی لامپ‌های ماکروویو توان بالا به علت هزینه‌های بالای ساخت و آزمون این لامپ‌ها دارای اهمیت ویژه‌ای است. برای لامپی با مشخصات جدول (۱) شبیه‌سازی انجام شده است [۱۶]. شکل (۳) ساختار لامپ را در محیط شبیه‌سازی نشان می‌دهد.

جدول ۱. مشخصات لامپ

دامنه ولتاژ سیگنال اعمالی	۴۶۰ کیلوولت
فاصله آند و کاتد	۱۶ میلی‌متر
قطر محفظه لامپ	۳۰۰ میلی‌متر
طول محفظه لامپ	۶۰۰ میلی‌متر
شعاع کاتد	۴۰ میلی‌متر
شعاع آند	۱۰۰ میلی‌متر

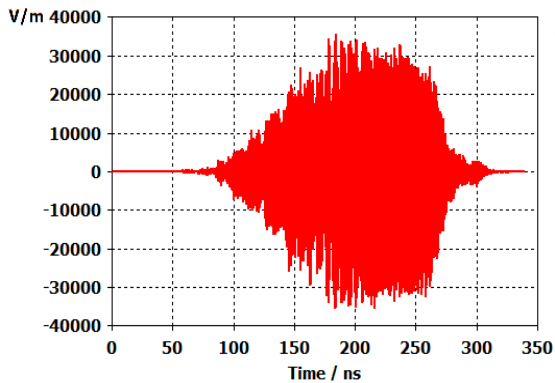


شکل ۳. ساختار لامپ تراپود بازتابی در محیط شبیه‌سازی

منبع تغذیه لامپ در شبیه‌سازی یک پالس مربعی با دامنه ۴۶۰ کیلوولت و زمان صعود ۱۰۰ نانوثانیه در نظر گرفته شده است و در این لامپ از آند با شفافیت ۷۷ درصد استفاده شده

۳-۱. بررسی نقش بازتابنده نواری و دیسکی

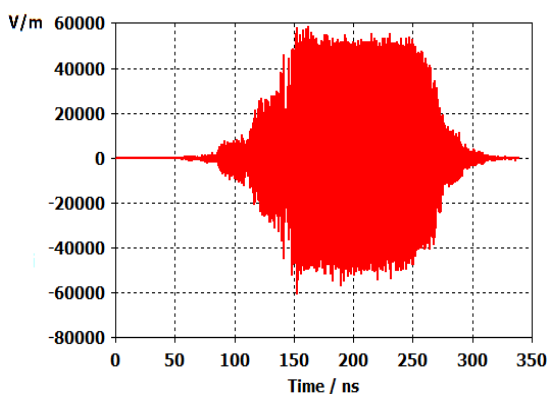
برای بررسی نقش انواع بازتابنده‌ها در میزان افزایش توان خروجی، ابتدا لامپ بدون هیچ بازتابنده‌ای شبیه‌سازی می‌شود. شکل (۸) شکل موج دریافتی از لامپ بدون بازتابنده توسط میدان الکتریکی را نشان می‌دهد.



شکل ۸. سیگنال خروجی لامپ بدون بازتابنده

بیشینه دامنه میدان الکتریکی بدون استفاده از بازتابنده برابر 34 kV/m است. دامنه میدان الکتریکی در آزمایش تجربی بدون استفاده از بازتابنده نیز 34 kV/m به دست آمده است [۱۶]. در آزمایش با استفاده از دو بازتابنده دیسکی و نواری، میدان الکتریکی خروجی در نهایت به 77 kV/m رسیده است که افزایش 126% درصدی را نشان می‌دهد.

اگر از یک بازتابنده دیسکی در فاصله 290 میلی‌متری از محور آند - کاتد در لامپ استفاده کنیم شکل موج سیگنال خروجی به صورت شکل (۹) می‌شود:



شکل ۹. سیگنال خروجی لامپ همراه با بازتابنده دیسکی

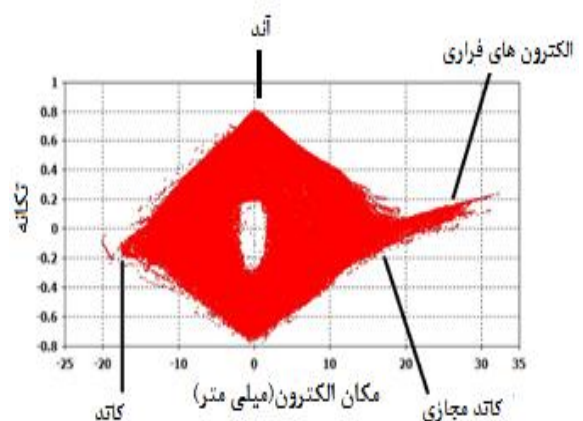
بیشینه دامنه میدان الکتریکی با استفاده از بازتابنده دیسکی برابر 58 kV/m شده است.

این نتایج بیانگر این موضوع است که بازتابنده‌ها نقش یکسانی در افزایش توان خروجی ندارند به طوری که استفاده از

دامنه میدان الکتریکی بیشینه در نتایج تجربی 77 kV/m به دست آمده است حال آن‌که با توجه به شکل (۴) بیشینه دامنه میدان الکتریکی در شبیه‌سازی نزدیک 80 kV/m است، این تفاوت ناشی از صرف‌نظر کردن از یون‌های هیدروژن، کامل در نظر گرفتن کاتد و دقت وسایل اندازه‌گیری در نتایج تجربی است. فرکانس خروجی به صورت تئوریک و با استفاده از رابطه (۳) به صورت تقریبی $4/7$ گیگاهرتز به دست می‌آید، مطابق شکل (۵) و (۶) فرکانس خروجی لامپ در شبیه‌سازی و آزمایش تجربی به ترتیب $4/16$ و $4/06$ گیگاهرتز شده است. این نتیجه نشان می‌دهد که نتیجه شبیه‌سازی به واقعیت نزدیک‌تر است و تطابق خوبی بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی برقرار است.

مقایسه مشابهی بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی یک لامپ ویرکیاتور با استفاده از نرم‌افزار MAGIC نیز انجام شده است که با دقت بسیار کمتری همراه بوده است. در مقایسه‌ای که توسط نرم‌افزار MAGIC انجام شده است اختلاف فرکانس شبیه‌سازی و نتایج تجربی 900 مگابایت گزارش شده، حال آنکه در اینجا این اختلاف تنها 100 مگابایت است. این موضوع اهمیت روش PIC نرم‌افزار CST را روشن می‌سازد.

عملکرد یک نوسان‌ساز با کاتد مجازی را می‌توان در شبیه‌سازی کامپیوتری به خوبی مشاهده کرد. در مقالات برای درستی عملکرد لامپ از نمودار تکانه برحسب مکان استفاده می‌کنند [۲۳]. شکل (۷) نمودار نرمالیزه شده تکانه برحسب مکان این لامپ را نمایش می‌دهد.



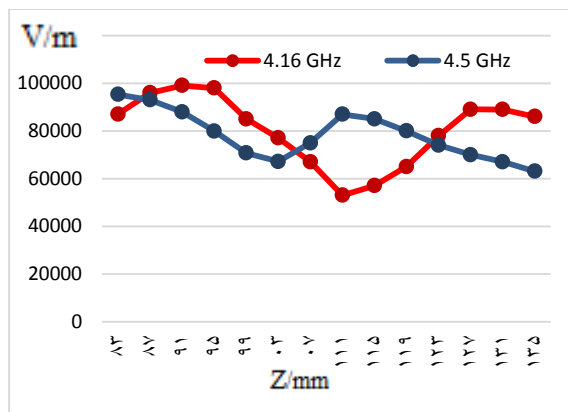
شکل ۷. نمایش مکان کاتد مجازی در نمودار تکانه برحسب زمان

در شکل (۷) حرکت نوسانی الکترون‌ها مشخص است. بعضی از الکترون‌هایی که از بند پتانسیل کاتد مجازی می‌گریزند نیز در شکل مشخص شده‌اند که اصطلاحاً به آن‌ها الکترون‌های فراری^۱ می‌گویند [۲۳].

¹ Escaping Electrons

موجب بازتاب کامل تر موج ماکروویو و افزایش توان خروجی شده است به طوری که دامنه میدان الکتریکی را از ۸۰ به ۹۸/۹ رسانده است. این موفقیتی بزرگ است که باعث افزایش بازدهی لامپ شده است. در واقع با استفاده هم‌زمان از سه بازتابنده میدان الکتریکی خروجی از ۳۴ kV/m به ۹۸/۹ kV/m افزایش یافته است (۱۹۳ درصد افزایش).

مطابق شکل (۱۲) تغییر مکان بازتابنده دیواره‌ای موجب تغییر میدان الکتریکی خروجی می‌شود و از شکل (۱۲) می‌توان این برداشت را داشت که این تغییرات رفتاری پریودیک دارد. جهت تأیید این موضوع با تغییر فاصله آند - کاتد و تنظیم مکان بازتابنده دیسکی در مکان مناسب برای فرکانس ۴/۵ گیگاهرتز نتایج جاروب بازتابنده دیواره‌ای با استفاده از شبیه‌سازی به دست آمد. نتایج به دست آمده برای فرکانس ۴/۵ گیگاهرتز هم مشابه فرکانس ۴/۰۶ گیگاهرتز تغییرات پریودیک میدان الکتریکی خروجی را تأیید می‌کند. این یافته‌ای پراهمیت است چراکه برای تنظیم لامپ در فرکانس‌های دیگر می‌توان رفتار لامپ را با تغییر مکان بازتابنده دیواره‌ای پیش‌بینی کرد.



شکل ۱۲. نمودار میدان الکتریکی خروجی برحسب تغییرات مکان بازتابنده دیواره‌ای برای دو فرکانس مختلف

به علت آن که بازتابنده دیواره‌ای دارای پتانسیل منفی است باید از بازتابنده دیسکی و آند که پتانسیل مثبت دارند فاصله کافی داشته باشد تا از خزش‌ها و جرقه‌های الکتریکی جلوگیری شود بنابراین، استفاده از بازتابنده دیواره‌ای می‌تواند موجب افزایش طول و وزن لامپ گردد که از معایب استفاده از این بازتابنده است.

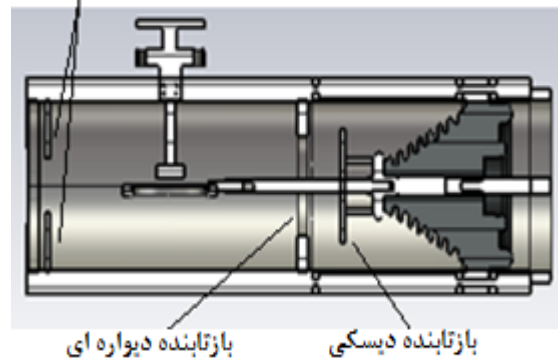
موضوع بااهمیت دیگر میزان تأثیر هر یک از بازتابنده‌ها در افزایش توان خروجی است. محققین بلاروسی تنها نشان داده‌اند که استفاده هم‌زمان از دو بازتابنده دیسکی و نواری توان خروجی را بهبود می‌بخشد اما سهم هر یک از بازتابنده‌ها در افزایش توان خروجی را مشخص نکرده‌اند [۱۶]. برای به دست آوردن میزان تأثیر هر یک از بازتابنده‌ها در افزایش کل توان خروجی، بازتابنده‌ها به ترتیب به لامپ اضافه شده‌اند. ابتدا باید حتماً

بازتابنده دیسکی دامنه میدان الکتریکی را از ۳۴ kV/m به ۵۸ افزایش داده (۱/۷ برابر) و با استفاده از بازتابنده نواری دامنه میدان الکتریکی به ۸۰ kV/m رسیده است (۱/۳۷ برابر).

۴. شبیه‌سازی ساختار بهینه‌شده

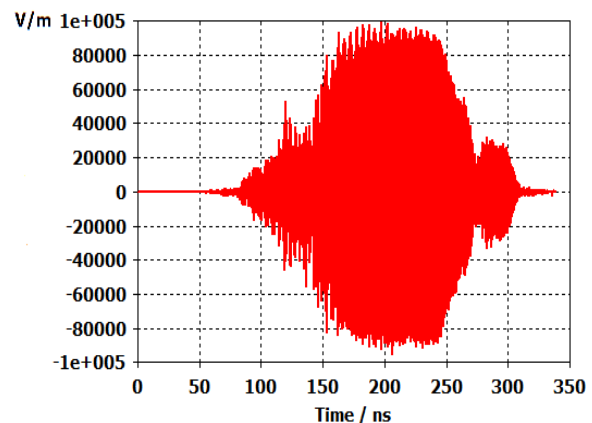
با توجه به اعمال ولتاژ بالا بین محور آند و بدنه به منظور حفظ ایقنی در انتخاب شعاع بازتابنده دیسکی محدودیت وجود دارد و این موضوع سبب می‌شود بازخورد کامل ماکروویو صورت نپذیرد. برای اولین بار، این ایده که استفاده از یک بازتابنده دیواره‌ای در فاصله‌ای دورتر از بازتابنده دیسکی می‌تواند تا حدودی این مشکل را رفع کند در این مقاله مطرح شده است. ساختار لامپ که شامل یک بازتابنده دیواره‌ای حلقوی شکل است در شکل (۱۰) نشان داده شده است:

بازتابنده نواری



شکل ۱۰. ساختار لامپ همراه با بازتابنده دیسکی، نواری و دیواره‌ای

اگر بازتابنده‌های دیسکی، نواری و دیواره‌ای به ترتیب در فواصل ۲۹۰، ۱۶۰ و ۹۱ میلی‌متری از محور آند - کاتد قرار گیرند، سیگنال خروجی لامپ مطابق شکل (۱۱) می‌شود:



شکل ۱۱. سیگنال خروجی لامپ همراه با بازتابنده دیسکی، نواری و دیواره‌ای

همان‌طور که مشاهده می‌شود استفاده از بازتابنده حلقوی شکل

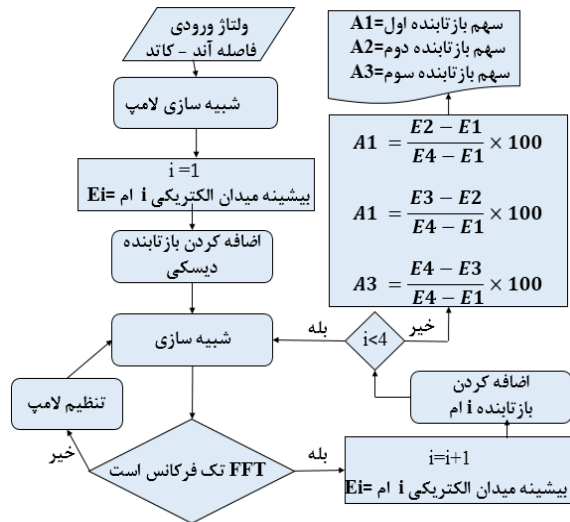
شبیه‌سازی و تجربی به هم نزدیک هستند. با توجه به هزینه‌های بالای ساخت و آزمون این لامپ‌ها انجام این مقایسه دارای اهمیت ویژه‌ای است. با توجه به استفاده از بازتابنده‌ها به منظور افزایش توان در لامپ‌های تراپود بازتابی، با شبیه‌سازی سهم هریک از بازتابنده‌های دیسکی و نواری در افزایش میدان الکتریکی مشخص گردید، بعدازآن با استفاده از یک بازتابنده جدید دیواره‌ای نشان داده شد که میدان الکتریکی خروجی مجموعاً ۱۹۳ درصد افزایش یافته است. همچنین روشن گردید تغییرات مکان بازتابنده دیواره‌ای موجب تغییرات پرودییک در توان خروجی می‌شود. این موضوع از آنجا حائز اهمیت است که می‌توان مکان بهینه بازتابنده دیواره‌ای در سایر فرکانس‌های خروجی را پیش‌بینی کرد. در آینده سعی خواهیم کرد با تمرکز پرتو الکترونی مانع واگرایی پرتو الکترونی شویم که موجب بازدهی بیشتر لامپ خواهد شد.

۶. مراجع‌ها

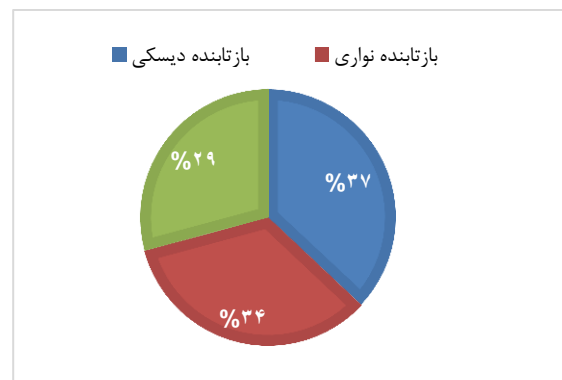
- [1] Barker, R. J.; Schemnoglou, E. "High-Power Microwave Sources and Technologies"; IEEE Press, 2001.
- [2] Mardani Shahrehabak, M.; Kamyab Sharif, M. "Construction of Conductivity Concrete as Modern Material in Electromagnetic Shielding"; Adv. Defence Sci. Technol. 2014, 5, 211-217. (in Persian)
- [3] Benford, J.; Swegle, J. A.; Schamiloglu, E. "High Power Microwaves"; CRC Press, 2015.
- [4] Benford, J.; Price, D.; Sze, H.; Bromley, D. "Interaction of a Vircator Microwave Generator with an Enclosing Resonant Cavity"; J. Appl. Phys. 1987, 61, 2098-2100.
- [5] Santos, A. L.; Araujo Filho, B. S.; Barroso, J. J.; Maciel, H. S. "Microwave Generation by a Virtual Cathode Enclosed in a Circular Cavity Placed Transversally in a Cylindrical Waveguide"; IEEE Int. Vacuum Electronics Conf. 2008, 45, 368-369.
- [6] Bromborsky, A.; Agee, F.; Bollen, M. "On the Path to a Terawatt: High Power Microwave Experiments at Aurora"; Proc. Microwave and Particle Beam Sources and Propagation 1988, 51, 873-877.
- [7] Liu, L.; Li, L. M.; Zhang, X. P. "Efficiency Enhancement of Reflex Triode Virtual Cathode Oscillator Using Carbon Fiber Cathode"; IEEE Trans. Plasma Sci. 2007, 35, 361-365.
- [8] Clements, K.R.; Curry, R.; Druce, R.; Carter, W.; Kovac, M.; Benford, J. "Design and Operation of a Dual Vircator HPM Source"; IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2013, 20, 1085-1090.
- [9] Moller, C.; Elfsberg, M.; Larsson, A.; Nyholm, S. E. "Experimental Studies of the Influence of a Resonance Cavity in an Axial Vircator"; IEEE Trans. Plasma Sci. 2010, 38, 1318-1324.
- [10] Razavi, S. M. J.; Shafieikhah, N.; Razavi, S. M. "A Novel Method for Improving the Efficiency of a Reflex Triode Tube in a Dominant Mode"; Adv. Defence Sci. Technol. 2019, 2, 33-37. (in Persian)
- [11] Champeaux, S.; Gouard, P.; Cousin, R.; Larour, J. "3-D PIC Numerical Investigations of a Novel Concept of Multistage

بازتابنده دیسکی اضافه گردد تا خروجی تک فرکانس گردد، سپس می‌توان هر یک از بازتابنده‌های نواری یا دیواره‌ای را اضافه کرد. با شبیه‌سازی مشخص شد میدان الکتریکی خروجی با استفاده از بازتابنده دیسکی از ۳۴ kV/m به ۵۸ kV/m در این لامپ می‌رسد.

بازتابنده نواری نیز باعث افزایش میدان الکتریکی به ۸۰ kV/m شده است و در نهایت بازتابنده دیواره‌ای میدان الکتریکی خروجی را در فاصله ۱۱/۵ متری به ۹۸/۹ kV/m رسانده است. شکل (۱۳) فلوجارت شبیه‌سازی را برای به‌دست آوردن میزان سهم هریک از بازتابنده‌ها نشان می‌دهد. شکل (۱۴) نقش هریک از بازتابنده‌ها را در افزایش توان خروجی این لامپ نشان می‌دهد.



شکل ۱۳. فلوجارت شبیه‌سازی برای به‌دست آوردن سهم بازتابنده‌ها در افزایش میدان الکتریکی



شکل ۱۴. نمودار نقش هر یک از بازتابنده‌ها در افزایش میدان الکتریکی خروجی لامپ

۵. نتیجه‌گیری

یک لامپ تراپود بازتابی که نتایج تجربی آن موجود بود در محیط PIC نرم‌افزار CST شبیه‌سازی شد و نشان داده شد نتایج

- [18] Roy, A.; Menon, R.; Sharma, V.; Patel, A.; Sharma, A.; Chakravarthy, D. "Features of 200 kv, 300 ns Reflex Triode Vircator Operation for Different Explosive Emission Cathodes"; *Laser Part. Beams* 2013, 31, 45-54.
- [19] Rocha, E.; Kelly, P. M.; Parson, J. M. "Evaluating the Performance of a Carbon-Epoxy Capillary Cathode and Carbon Fiber Cathode in a Sealed-Tube Vircator Under UHV Conditions"; *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2015, 43, 45-51.
- [20] Karlsson, M.; Olsson, F.; Filipsson, G.; Edbom, E. "Comparison Between Experimental and Numerical Studies of a Reflex Triode"; *IEEE Int. Pulsed Power Conf.* 2005, 86, 210-213.
- [21] Neuber, A.; Hemmert, D.; Krompholz, H.; Hatfield, L.; Kristiansen, M. "Initiation of High Power Microwave Dielectric Interface Breakdown"; *J. Appl. Phys.* 1999, 86, 1724-1728.
- [22] Morales, K. P.; Krile, J. T.; Neuber, A. A.; Krompholz, H. G. "Pulsed Dielectric Surface Flashover in Atmospheric Conditions"; *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2006, 13, 802-809.
- [23] Saxena, A.; Roy, A.; Kanakgiri, K. V.; Petkar, S. J.; Kazi, F. S.; Singh, N. M. "Modeling of Reflex Triode Virtual Cathode Oscillator"; *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2016, 44, 2399-2405.
- Axial Vircator for Enhanced Microwave Generation"; *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2015, 43, 3841-3855.
- [12] Chen, Y.; Mankowski, J.; Walter, J.; Kristiansen, M.; Gale, R. "Cathode and Anode Optimization in a Virtual Cathode Oscillator"; *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2007, 14, 1037-1044.
- [13] Zherlitsyn, A. G.; Mel'nikov, G. V.; Ya Isakov, P. "Effect of Feedback on the Microwave Radiation in a Triode with a Virtual Cathode"; *J. Commun. Technol. Elec.* 2007, 52, 798-802.
- [14] Parson, J. M.; Lynn, C. F.; Mankowski, J. J.; Barnett, D. H. "Frequency Stable Vacuum-Sealed Tube High-Power Microwave Vircator Operated at 500 Hz"; *IEEE Trans. Electron Dev. Lett.* 2015, 36, 508-511.
- [15] Chen, Y. J.; Neuber, A. A.; Mankowski, J. J.; Kristiansen, M. "Design and Optimization of a Compact, Repetitive HPM System"; *Rev. Sci. Instrum.* 2005, 76, 104-107.
- [16] Baryshevsky, V.; Gurinovich, A.; Gurnevich, E.; Molchanov, P. "Experimental Study of a Triode Reflex Geometry Vircator"; *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2017, 45, 631-635.
- [17] Jiang, W.; Shimada, N.; Prasad, S. D.; Yatsui, K. "Experimental and Simulation Studies of New Configuration of Virtual Cathode Oscillator"; *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2004, 32, 54-59.