

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)  
دانشکده مهندسی برق

پایان نامه کارشناسی ارشد

## **تحلیل، شبیه سازی و بهینه سازی عملکرد نوسان ساز با کاتد مجازی جهت حصول بازدهی مناسب**

اساتید راهنما  
دکتر ایاز قربانی و دکتر غلامرضا مرادی

نگارش  
مهدی غلامی

اسفند ۸۶



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلیتکنیک تهران)

**بسمه تعالی**

تاریخ:

شماره:

**فرم اطلاعات پایاننامه**

**کارشناسی - ارشد و دکترا**

معاونت پژوهشی

فرم پروژه تحصیلات تکمیلی ۷

**مشخصات دانشجو:**

نام و نام خانوادگی: مهدی غلامی دانشجوی آزاد بورسیه  دل  
شماره دانشجویی: ۸۴۱۲۳۱۱۱ دانشکده: برق رشته تحصیلی:  مخابرات میدان گروه: مخابرات

**مشخصات استاد راهنما:**

نام و نام خانوادگی: دکتر ایاز قربانی درجه و رتبه: دانشیار  
نام و نام خانوادگی: دکتر غلامرضا مرادی درجه و رتبه: استادیار

**مشخصات استاد مشاور:**

نام و نام خانوادگی: درجه و رتبه:  
نام و نام خانوادگی: درجه و رتبه:

**عنوان پایاننامه به فارسی:**

تحلیل، شبیه سازی و بهینه سازی عملکرد نوسان ساز باکاتد مجازی جهت حصول بازدهی مناسب

**عنوان پایاننامه به انگلیسی:**

**ANALYSIS, SIMULATION AND OPTIMIZATION OF VCO TO ACHIEVE A HIGHER EFFICIENCY**

نوع پروژه: کارشناسی  ش  د  ت  ر  ا  سال تحصیلی: ۸۶-۸۷  
کاربردی  نظری  توسعه‌ای  چکیده  انگلیسی  فارسی  نظری  کاربردی

تاریخ شروع: ۸۶/۷/۱ تاریخ خاتمه: ۸۷/۱۲/۲۲ تعداد واحد: ۶ سازمان تأمین کننده اعتبار:

**واژه‌های کلیدی به فارسی:** نوسان ساز با کاتد مجازی- ویرکیتور- لامپ مایکروویو- مایکروویو پرتوان- شبیه سازی ذره در واحد.  
**واژه‌های کلیدی به انگلیسی:** vircator, virtual cathode oscillator, HPM, high power microwave, pic, microwave source

مشخصات ظاهری	تعداد صفحات	تصویر <input checked="" type="radio"/> جدول <input checked="" type="radio"/> نمودار <input checked="" type="radio"/> نقشه <input type="radio"/> واژه‌نامه <input type="radio"/>	تعداد مراجع	تعداد صفحات ضمیمه
زبان متن	۱۰۳	فارسی <input checked="" type="radio"/> انگلیسی <input type="radio"/>	۶۴	۳
یادداشت		چکیده	فارسی <input checked="" type="radio"/> انگلیسی <input checked="" type="radio"/>	

**نظرها و پیشنهادات به منظور بهبود فعالیتهای پژوهشی دانشگاه**

استاد:

دانشجو:

امضاء استاد راهنما: تاریخ:

## تشکر و تقدیم

ضمن سپاس بیکران از درگاه خداوند متعال، بر خود لازم می‌دانم از زحمات و رهنمودهای اساتید ارجمند آقایان دکتر قربانی و دکتر مرادی که در طول این پروژه همیشه راه‌گشای بنده بوده‌اند، کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم. همچنین از هیئت داوران آقایان پروفسور حجت کاشانی و پروفسور عبدی پور بخاطر حسن توجه و وقتی که برای این پروژه گذاشته‌اند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

تقدیم به

**پدر، مادر و همسر مهربانم**

که بدون فداکاریهای او، پیمودن این مسیر امکان پذیر نبود.

## چکیده

نوسان سازهای کاتد مجازی به نسل جدیدی از لامپهای مایکروویو گفته می‌شود که قادرند پالسهای مایکروویوی در سطح توان چندین گیگاوات و محدوده فرکانسی ۰/۵ تا ۲۰ گیگاهرتز تولید کنند. عملکرد آنها بر این پایه استوار است که، با تزریق یک پرتو الکترونی با چگالی جریان بالا به درون یک موجبر یا محفظه تشدید، پدیده‌ای بنام کاتد مجازی درون موجبر یا محفظه شکل می‌گیرد که دارای شرایط ناپایدار است. نوسان سازهای کاتد مجازی از این ویژگی ناپایداری استفاده کرده و انرژی پرتو الکترونی را به انرژی مایکروویو تبدیل می‌کنند. در ابتدا، تاریخچه و تحول این لامپها مورد مطالعه قرار می‌گیرد، سپس، انواع این لامپها و نحوه عملکرد هر یک تشریح می‌شود. از بین لامپهای کاتد مجازی، ویرکتور هم محور که دارای راندمان بالاتری نسبت به بقیه لامپها می‌باشد انتخاب و روابط حاکم بر آن مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. برای تحلیل بیشتر این لامپها یک کد الکترومغناطیسی بر مبنای **FDTD** ارائه شده است که این کد ذرات باردار را نیز در محاسبات خود وارد می‌کند و به محاسبه برهم کنش الکترونها و میدانهای الکترومغناطیسی می‌پردازد. نقش مکان و سرعت الکترونها در معادلات کرل ماکسول گنجانده شده است و همچنین تاثیر میدانهای الکترومغناطیسی بر روی الکترونها نیز طبق روابط نیروی لورنتز اعمال شده است که به این روش حل در اصطلاح **PIC-FDTD** گفته می‌شود.

در فصل آخر با استفاده از شبیه‌سازی، پارامترهای موثر بر عملکرد لامپ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است و با استفاده از آن پیشنهاداتی برای افزایش راندمان لامپ ارائه شده است.

کلمات کلیدی: نوسان ساز با کاتد مجازی- ویرکتور- لامپ مایکروویو- مایکروویو پرتوان- شبیه سازی ذره در واحد.

## فهرست

فصل ۱- نوسان سازهای با کاتد مجازی .....	۴
۱-۱- تاریخچه ویرکتورها .....	۷
۲-۱- مشخصات طراحی ویرکتور .....	۹
۳-۱- مشخصات اساسی عملکرد ویرکتور .....	۱۶
۴-۱- ویرکتورهای پیشرفته .....	۲۰
۱-۴-۱- ویرکتور دو آندی .....	۲۰
۲-۴-۱- ردیترونها .....	۲۲
۳-۴-۱- ویرکتورهای محفظه ای .....	۲۶
۴-۴-۱- ویرتورها و ویرکتورهای فیدبکی .....	۲۸
۵-۴-۱- ویرکتور هم محور .....	۳۰
۵-۱- محدودیت های اصلی و چشم انداز ویرکتورها .....	۳۲
فصل ۲- تحلیل ویرکتور هم محور .....	۳۳
۱-۲- تئوری ویرکتور هم محور .....	۳۴
۲-۲- تشعشع ویرکتور هم محور .....	۴۲
فصل ۳- پیاده سازی کد الکترومغناطیسی .....	۵۳
۱-۳- حل عددی معادلات ماکسول به روش FDTD .....	۵۵
۱-۱-۳- الگوریتم Yee .....	۵۵
۲-۱-۳- دقت و پایداری .....	۵۸
۳-۱-۳- برنامه نویسی FDTD .....	۵۹
۲-۳- برنامه نویسی PIC-FDTD .....	۶۲
۱-۲-۳- الکترواستاتیک .....	۶۲
۲-۲-۳- الکترودینامیک .....	۶۳
۳-۳- شبیه سازی ویرکتور .....	۶۷
فصل ۴- بهینه سازی .....	۷۶
۱-۴- تحلیل پدیده تاخیر انتشار .....	۷۷
۱-۱-۴- هندسه شبیه سازی شده .....	۷۸
۲-۱-۴- محاسبه پارامترهای اولیه .....	۷۸
۳-۱-۴- مقایسه شبیه سازی با نتایج تجربی .....	۸۰
۴-۱-۴- توجیه فیزیکی تاخیر .....	۸۳

۸۶	.....	۲-۴- بررسی آند
۸۹	.....	۳-۴- بررسی مکان کاتد
۹۲	.....	۴-۴- حذف هارمونی دوم
۹۵	.....	ضمیمه الف



## مقدمه

لامپهای مولد موج میکروویو با نوسان کاتد مجازی<sup>۱</sup> به خاطر توانایی های بالایی که دارند در سالهای اخیر گسترش فراوانی یافته اند. این لامپها قادرند پالسهای موج میکروویوی در محدوده فرکانسی ۰/۵ تا ۲۰ گیگاهرتز، با سطح توان پیک چندین گیگاوات، با استفاده از پرتو الکترونی<sup>۲</sup> قوی تولید کنند. در مقایسه با انواع دیگر لامپهای پر قدرت میکروویو، این لامپها دارای مزایای زیر هستند:

❖ دارای هندسه خیلی ساده هستند که باعث سادگی استفاده و ساخت آنها می شود.

❖ لزوماً احتیاجی به میدان مغناطیسی خارجی ندارند که باعث حذف کویل‌های مغناطیسی و منابع تغذیه آنها می شود.

❖ هیچ محدودیتی در سطح توان پیک خروجی موج میکروویو ندارند. بعلاوه اینکه، از پرتو الکترونی امیدانس پایینی استفاده می کنند که معمولاً دارای توان بالا، راندمان بالا و هزینه پایین است.

بر مبنای همین ویژگیها، محققان زیادی در سراسر جهان در دو دهه اخیر بر روی نوسان ساز با کاتد مجازی تمرکز کرده اند. با این وجود، نتایج تجربی منتشر شده نشان می دهد که راندمان این لامپها- که با نسبت انرژی کل موج میکروویو خروجی بر انرژی کل پرتو الکترونی تعریف می شود- نمی تواند از چند درصد بیشتر شود. تا بحال دلیل محکمی برای پایین بودن راندمان این لامپها ارائه نشده است، همانطور که برای خیلی از رفتارهای دیگر این لامپ نیز توجیه دقیق علمی وجود ندارد.

در اینجا، ما ابتدا روابط تحلیلی حاکم بر این لامپها را مورد بررسی قرار می دهیم. کد الکترومغناطیسی مبتنی بر FDTD<sup>۳</sup> برای این ساختار نوشته ایم که علاوه بر حل معادلات ماکسول به محاسبه برهم کنش میدان و ذرات باردار در محیط نیز می پردازد. با کمک این کد فرایندهای موجود در این لامپ را مورد تجزیه و تحلیل قرار می دهیم و در آخر با استفاده از شبیه سازی به بررسی پارامترهای اساسی لامپ و تاثیر آنها بر راندمان لامپ می پردازیم و راندمان این لامپ را تا اندازه ای بهبود می بخشیم.

---

<sup>1</sup> Virtual Cathode Oscillator (VIRCATOR)

<sup>2</sup> Electron beam

<sup>3</sup> Finite Difference Time Domain

فصل اول

## نوسان سازهای با کاتد مجازی

## نوسان سازهای با کاتد مجازی

### مقدمه

نوسان سازهای با کاتد مجازی دسته‌ای از نوسان سازها هستند که براساس بوقوع پیوستن دو پدیده فیزیکی، تشعشع می‌کنند. این دو پدیده عبارتند از؛ نوسان کاتد مجازی<sup>۱</sup> و نوسان الکترونیهای برگشتی<sup>۲</sup>. هر دو این پدیده‌ها یا یکی به تنهایی ممکن است در تشعشع نقش داشته باشند. این دو پدیده هنگامی رخ می‌دهند که یک جریان پرتوالکترونی وارد یک موجبر یا محفظه<sup>۳</sup> شود و این جریان بیش از محدودیت جریان بارفضایی<sup>۴</sup> در موجبر یا محفظه مذکور باشد (محدودیت جریان بار فضایی در ادامه توضیح داده خواهد شد). اعضای خانواده این دسته از نوسان سازها عبارتند از؛ ویرکیتور<sup>۵</sup> معمولی، رفلکس تراپود<sup>۶</sup>، ردیترون<sup>۷</sup>، ویرکیتور هم محور<sup>۸</sup> و ویرکیتور فیدبکی<sup>۹</sup> که با نام اختصاری ویرتود<sup>۱۰</sup> نیز شناخته می‌شود. در اصطلاح تمامی این لامپها ویرکیتور نامیده می‌شوند.

این منابع توانایی تولید توانهای پیکی در سطح گیگاوات در محدوده فرکانس ۰/۵ تا ۲۰ گیگاهرتز را دارند. ساخت آنها نسبتاً ساده است، بخاطر اینکه در اغلب آنها نیازی به میدان مغناطیسی خارجی

---

<sup>1</sup> Virtual Cathode

<sup>2</sup> Reflexing electrons

<sup>3</sup> Cavity

<sup>4</sup> Space charge limit current

<sup>5</sup> Vircator

<sup>6</sup> Reflex triode

<sup>7</sup> Reditron

<sup>8</sup> Coaxial vircator

<sup>9</sup> Feedback vircator

<sup>10</sup> Virtode

نیست. عموماً دارای امپدانس ورودی نسبتاً پائینی هستند که از نقطه نظر تولید توان با ولتاژهای پائین بسیار حائز اهمیت است. همچنین می‌توان بخاطر امپدانس پائین این لامپها، آنها را به منابع توان امپدانس پائین که دارای مشخصه بسیار مهم فشردگی و کوچکی<sup>1</sup> هستند متصل نمود. همچنین این لامپها براحتی قابل تنظیم<sup>2</sup> هستند، چون عملکرد آنها به شرایط تشدید ساختار بستگی ندارد و فقط چگالی بار پرتوالکترونی است که فرکانس آنها را تعیین می‌کند. یک نمونه از این لامپها می‌تواند در بیش از یک یا دو دهه<sup>3</sup> فرکانسی تشعشع کند. وسعت تنظیم فرکانس ویرکتورها آنها را به یکی از محبوب‌ترین تجهیزات تستهای میکروویو پر توان<sup>4</sup> (HPM) تبدیل کرده است، چون به کمک آنها می‌توان تأثیرات فرکانس‌های گوناگون را در توانهای بالا بر روی تجهیزات الکترونیکی بررسی کرد. حتی دسته‌ایی از این ویرکتورها که دارای تنظیم سرگردان<sup>5</sup> هستند، برای یک دستگاه ثابت، فرکانس ۰/۵ تا ۱۰ گیگاهرتز در تست ثبت شده است [1]. بخاطر تمام دلایلی که در بالا ذکر شد مسلماً ویرکتور مورد پسندترین منبع میکروویو پرتوان شناخته می‌شود، طوری که در تمام کشورهای که برنامه HPM دارند مورد تحقیق و بررسی شدید قرار گرفته است، از جمله در آمریکا، روسیه، فرانسه، آلمان، انگلستان، سوئد، چین، ژاپن و کشورهای که تازه به این مقوله وارد شده اند مثل هندوستان، کره جنوبی و تایوان. با این توضیحات به این نتیجه می‌رسیم که ویرکتورها بخاطر سادگی و قابلیت انعطاف بالایی که دارند، پله اول برای شروع برنامه HPM در هر کشوری هستند.

علی‌رغم تمام نکات مثبتی که برای این لامپها ذکر شد، این لامپها از اوایل ابداعشان تا کنون با مشکل پایین بودن راندمان روبرو هستند. بعلاوه آنها با مشکل بسته شدن شکاف برهم کنش<sup>6</sup> که در ضمیمه الف به شرح آن پرداخته‌ایم، مواجه هستند. بسته شدن شکاف برهم کنش عاملی است که باعث افزایش جریان کاتد با گذشت زمان (در طی زمان پالس) می‌شود. وقتی که در طول یک پالس با گذشت زمان جریان کاتد بالا رود، نتیجه آن افزایش ذره ذره فرکانس لامپ است (فرکانس با جریان رابطه دارد) که این باعث برهم خوردن بالانس بین فرکانس دو پدیده مولد تشعشع می‌شود و افت شدید خروجی لامپ را در پی دارد.

---

<sup>1</sup> Compact

<sup>2</sup> Tunable

<sup>3</sup> Octave

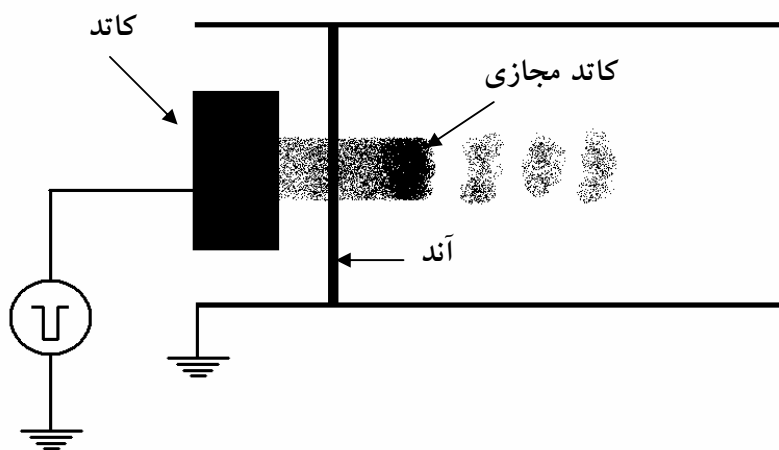
<sup>4</sup> High Power Microwave (HPM)

<sup>5</sup> Staggered tuning rang

<sup>6</sup> Gap closure

## ۱-۱- تاریخچه ویرکتورها

همانطور که در مقاله بیردسال<sup>۱</sup> و بریجز<sup>۲</sup> که به بازنگری لامپ ویرکتور می پردازند آمده است، برای اولین بار، جریان ذرات باردار در یک دیود توسط رابطه چایلد-لانگمیر در اوایل قرن ۲۰ میلادی مطرح شده است [2]. برای هر محفظه فلزی، با توجه به شکل و ابعاد آن، پارامتر محدودیت جریان بار فضایی تعریف می شود، به این مفهوم که اگر یک پرتو الکترونی وارد این محفظه شود نمی تواند جریانی بیش از محدودیت جریان بار فضایی داشته باشد. چنانچه جریان الکترونی بیش از محدودیت جریان بار فضایی به درون یک محفظه تزریق شود، در داخل محفظه کاتد مجازی تشکیل می شود (شکل ۱-۱). پتانسیل ناشی از بارهای الکتریکی پرتو الکترونی باعث می شود تا ادامه پرتو الکترونی بر خلاف مسیر اولیه خود حرکت کند. محلی که الکترونها تغییر جهت می دهند عملکردی همانند کاتد دارد (گسیل الکترون) و اصطلاحاً به آن کاتد مجازی می گویند. در دهه های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ مطالعاتی بر روی تشکیل کاتد مجازی نشان داد که، کاتد مجازی ناپایدار است و این ناپایداری تولید نوسان می کند. در عمل نیز مشاهده شد که فرکانس این نوسان به مکان تشکیل کاتد مجازی وابستگی شدیدی دارد. در سال ۱۹۸۷ سولیوان<sup>۳</sup> مجدداً به بازنگری تئوری ویرکتور پرداخت و گسترش آنرا تحت گزارشی مورد بررسی قرار داد [3] و شخصی بنام تود<sup>۴</sup> نیز مرور آزمایشات عملی را انجام داد [4].



شکل ۱-۱. اعمال ولتاژ بین آند و کاتد و جاری شدن پرتو الکترونی از کاتد، عبور آن از داخل آند شفاف و تشکیل کاتد مجازی در داخل محفظه

<sup>1</sup> Birdsall  
<sup>2</sup> Bridges  
<sup>3</sup> Sullivan  
<sup>4</sup> Thode

اولین آزمایشات تجربی بر روی ساختار رفلکس تراپود انجام می گرفت که در آن برای اعمال میدان لازم بر روی کاتد جهت جدا شدن الکترون، کاتد زمین و پالس مثبت به آند اعمال می گردید. در سال ۱۹۷۷ مهافی<sup>۱</sup> و همکارانش اولین کسانی بودند که از نوسانات کاتد مجازی مایکروویو استخراج کردند [5]. بدنبال آن یک سال بعد گروهی روسی در موسسه پلی تکنیک تامسک<sup>۲</sup> نتایج اندازه گیری های خود را از استخراج مایکروویو منتشر کردند [6]. در سال ۱۹۸۰ یک گروه در آزمایشگاه هری دایاموند<sup>۳</sup> (HDL) با یک رفلکس تراپود در باند X به توان پیک گیگاوات دست پیدا کردند [7].

شکل استاندارد ویرکتور که در آن پالس منفی به کاتد اعمال می شود و آند زمین می شود در دهه ۱۹۸۰ میلادی عمومیت پیدا کرد. در سال ۱۹۸۷ بورخارت<sup>۴</sup> در آزمایشگاه ملی لورنس لیورمور<sup>۵</sup> (LLNL) توان پیک ۴ گیگاوات در فرکانس ۶/۵ گیگاهرتز را گزارش کرد [8]. در سال ۱۹۸۸ برومبورسکی<sup>۶</sup> با شتاب دهنده ۶ مگاولتی AURORA توانسته است به متوسط پیک توان ۹ گیگاوات برای فرکانسهای زیر ۱ گیگاهرتز برسد [9]. در سال ۱۹۸۹ پلات<sup>۷</sup> در آزمایشگاه سلاحهای نیروی هوایی<sup>۸</sup> (AFWL) به توان پیک ۷/۵ گیگاوات در فرکانس ۱/۱۷ گیگاهرتز رسید [10].

تا کنون دو ساختار اصلاح شده برای افزایش راندمان لامپهای اولیه ارائه شده است؛ اولی را وان<sup>۹</sup> و تود در آزمایشگاه ملی لوس آلاموس<sup>۱۰</sup> (LANL) با ایده گیری از پیشنهاد سولیوان ارائه کردند که ردیترون نام داشت. در این وسیله از یک آند مخصوص استفاده شده است که مانع برگشت الکترونهای کاتد مجازی می شود. این وسیله توانایی تولید ۳/۳ گیگاوات توان پیک در فرکانس ۲/۱۵ گیگاهرتز را با طیف فرکانس خیلی تیز دارد که راندمان آن حدود ۱۰٪ و خیلی بالاتر از راندمانهای گزارش شده تا آن موقع (۱۹۸۸) می باشد [11]. دومی در سال ۱۹۹۱ در LLNL مطرح شد که از دو آند برای افزایش راندمان استفاده می کردند. در آن بجای حذف الکترونهای برگشتی با استفاده از آند اضافی باعث همزمانی<sup>۱۱</sup> الکترونهای برگشتی با نوسانات کاتد مجازی می شدند [12]. در سال ۱۹۸۷ بنفرد<sup>۱۲</sup> و همکارانش در PI<sup>۱</sup> [13] و سولیوان [3]، ویرکتور محفظه ای<sup>۲</sup> را ارائه کردند که در آن نشان

---

<sup>1</sup> Mahaffey

<sup>2</sup> Tomsk Polytechnic Institute in Russia

<sup>3</sup> Harry Diamond Laboratories

<sup>4</sup> Borkhart

<sup>5</sup> Lawrence Livermore National laboratory

<sup>6</sup> Bromborsky

<sup>7</sup> Platt

<sup>8</sup> Air Force Weapons Lab

<sup>9</sup> Kwan

<sup>10</sup> Los Alamos National Laboratory

<sup>11</sup> Synchronization

<sup>12</sup> Benford

نشان دادند استفاده از محفظه تشدید بعنوان ناحیه برهم کنش پرتو الکترونی و میدان باعث حذف تداخل مدها و افزایش راندمان می‌شود.

ویرتود یا همان ویرکتور فیدبکی در سال ۱۹۹۳ توسط یک گروه در KPTI<sup>۳</sup> تشریح شد [14]. در این نمونه، موج الکترومغناطیسی تولید شده، بوسیله یک موجبر به ناحیه تولید پرتوالکترونی تزریق می‌شود که با این کار یک فیدبک از موج به پرتو داده و باعث افزایش راندمان می‌شود. نمونه های بکارگرفته شده با این روش در محدوده کاری باند S و باند X قرار دارند و سطح توان پیک آنها در حدود ۶۰۰ مگاوات و راندمان آنها بین ۳ تا ۱۷ درصد است.

در سال ۱۹۹۷، در خلال یک شبیه سازی کامپیوتری توسط وولورتون<sup>۴</sup> از TTU<sup>۵</sup> ویرکتور هم محور معرفی شد [15]، که در آن پرتوالکترونی با جریان خیلی بالا بصورت شعاعی به درون موجبر استوانه‌ای تزریق می‌شود. بعد از مدتی وی گزارشی را از نتایج تجربی این لامپ منتشر کرد [16].

## ۱-۲- مشخصات طراحی ویرکتور

کاتد مجازی هنگامی تشکیل می‌شود که جریان پرتوالکترونی تزریق شده ( $I_b$ ) به درون یک محفظه از جریان محدودیت بارفضایی ( $I_{SCL}$ ) آن محفظه بیشتر باشد. با تشکیل کاتد مجازی دو اتفاق بطور همزمان رخ می‌دهد؛ (۱) مکان کاتد مجازی به عقب و جلو نوسان می‌کند که فرکانس این نوسان در حدود فرکانس پلاسما  $\omega_p$  می‌باشد. (۲) برخی از الکترونها از درون کاتد مجازی عبور کرده و دور می‌شوند، اما مقدار دیگری از آنها به سمت کاتد حقیقی برمی‌گردند و وقتی که نزدیک کاتد شدند بخاطر پتانسیل بازدارنده کاتد مجدداً به سمت کاتد مجازی بر می‌گردند؛ در این میان الکترونها دچار یک حرکت نوسانی شده اند که به نام نوسان انعکاس<sup>۶</sup> شناخته می‌شود. در حالت معمولی فرکانس نوسان مکان کاتد مجازی با فرکانس انعکاس الکترونها اختلاف دارد، با این وجود می‌توان هر دوی این نوسان ها را تنظیم (tune) کرد تا با هم در یک فرکانس تشعشع کنند. این موضوع در ادامه بحث توضیح داده خواهد شد.

رابطه کلی جریان محدودیت بارفضایی  $I_{SCL}$  برای محیطی که پرتو الکترونی در آن حرکت می‌کند به صورت رابطه ۱-۱ است.

<sup>1</sup>Physics International

<sup>2</sup> Cavity vircator

<sup>3</sup> Kharkov Physico-Technical Institute

<sup>4</sup> Woolverton

<sup>5</sup> Texas Tech University

<sup>6</sup> Coaxial vircator

<sup>7</sup> Reflex oscillation

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

که  $\gamma_0$  همان فاکتور نسبیت است و با ولتاژ آند-کاتد در دیود ( $V_0$ ) بصورت زیر رابطه دارد.

$$\gamma_0 = 1 + \frac{eV_0}{mc^2} = 1 + \frac{V_0(KV)}{511} \quad (2-1)$$

و  $G$  به هندسه وابسته است. بعنوان مثال، برای یک پرتو باریک حلقوی<sup>1</sup> با شعاع میانگین  $r_b$  در درون لوله با سطح مقطع دایروی با شعاع  $r_0$  بصورت زیر تعریف می شود.

$$G = \ln \left( \frac{r_0}{r_b} \right) \quad (1-3-الف) \text{ بیم حلقوی}$$

و همینطور اگر پرتوالکترونی بصورت کاملاً یکنواخت<sup>2</sup> با شعاع  $r_b$  پخش شده باشد داریم

$$G = 1 + \ln \left( \frac{r_0}{r_b} \right) \quad (1-3-ب) \text{ بیم یکنواخت}$$

به همین ترتیب اگر یک پرتوالکترونی حلقوی در یک لوله کوآکسیال با شعاع داخلی  $r_i$  و شعاع خارجی  $r_b$  حرکت کند داریم:

$$G^{-1} = \frac{1}{\ln \left( \frac{r_0}{r_b} \right)} + \frac{1}{\ln \left( \frac{r_b}{r_i} \right)} \quad (1-3-ج) \text{ بیم حلقوی درون لوله هم محور}$$

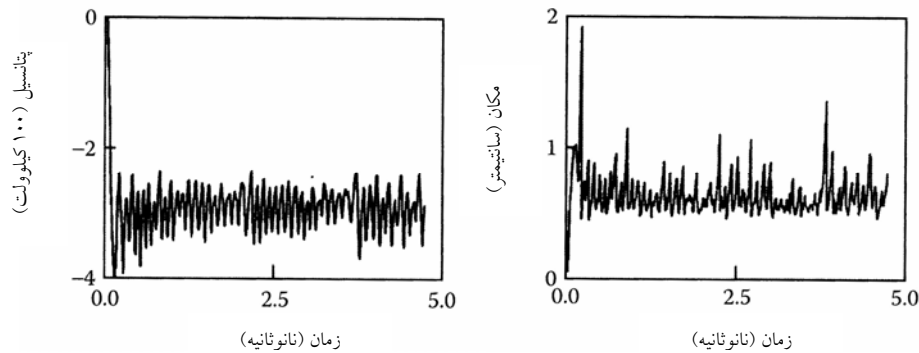
هنگامیکه  $I_{SCL} > I_b$  شود، کاتد مجازی تشکیل می شود و شروع به نوسان می کند. مکان تشکیل کاتد مجازی در حدود فاصله آند-کاتد دورتر از آند قرار دارد. یعنی فاصله کاتد مجازی از آند برابر فاصله آند تا کاتد حقیقی است. نوسان پتانسیل در کاتد مجازی تولید یک پرتوالکترونی با چگالی جریان متناوب در ادامه مسیر پرتوالکترونی می کند. به همین شکل یک جریان متناوب نیز به سمت آند بر می گردد. عملکرد یک نوسان ساز با کاتد مجازی را می توان در شبیه سازی کامپیوتری بخوبی مشاهده کرد. شکل ۱-۲ مکان و پتانسیل کاتد مجازی را بر حسب زمان نشان می دهد [17]. این کاتد مجازی توسط تزریق یک پرتوالکترونی یکنواخت به درون لوله استوانه ایی از طریق یک آند فویل که انتهای لوله قرار گرفته است تشکیل شده است. با انتقال منحنی مکان کاتد مجازی از حوزه زمان به حوزه فرکانس، نوسانات منحنی در حوزه زمان تولید یک نقطه اوج در حوزه فرکانس ۱۰/۴ گیگاهرتز می کند که در فرکانس های دیگر نیز مولفه های زیادی دارد. یکی از مشخصه های اصلی ویرکیورساده تشعشع در باند پهن می باشد. همانطور که در شکل دیده می شود نوسان مکان کاتد

<sup>1</sup> Thin annular beam

<sup>2</sup> Solid beam

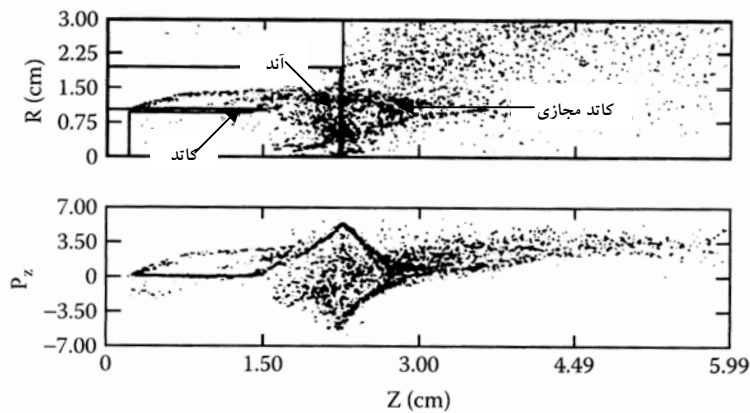


مجازی در فاصله ای دورتر از فاصله آند-کاتد رخ داده است و پتانسیل کاتد مجازی در محدوده اطراف پتانسیل کاتد  $V_0$  نوسان می‌کند.



شکل ۱-۲. نمودار های مکان و پتانسیل کاتد مجازی بر حسب زمان که توسط شبیه سازی بدست آمده است. ولتاژ و جریان دیود بترتیب ۲۷۰ کیلوولت و ۷/۳ کیلوآمپر، شعاع پرتو یکنواخت ۱/۲۵ سانتیمتر، فاصله آند-کاتد ۲/۵ میلیمتر و شعاع موجبر ۴/۹ سانتیمتر [17]

نتایج شبیه سازی یک دیود دیگر نیز در شکل ۱-۳ نشان داده شده است، که در آنها مکان ذرات و منحنی مکان - فاز (اندازه حرکت) آنها رسم شده است [4].



شکل ۱-۳. مکان قرار گرفتن الکترونها در یک لحظه از عملکرد لامپ (بالا) و اندازه حرکت الکترونها بر حسب محور Z (پایین) [4]

در این هندسه کاتد بصورت یک لوله قرار دارد که الکترونها از اطراف و لبه تیز آن گسیل می‌شوند. کاتد مجازی از آنجایی شکل می‌گیرد که پتانسیل منفی ناشی از تجمع الکترونها در پرتو، بر پتانسیلی که پرتو را مجبور به حرکت کرده غلبه می‌کند و ادامه پرتو الکترونی که در این وضعیت یک پتانسیل منفی در جلوی خود می‌بیند به سمت عقب بر می‌گردد. با برگشت الکترونها به سمت عقب، تجمع الکترونها در کاتد مجازی کم می‌شود، بنابراین کاتد مجازی نیز شکل خود را از دست می‌دهد یا بطور

دقیقتر به مکان جلوتر نقل مکان می‌کند، در این وضعیت الکترونهاى جدیدی که تازه به محل کاتد مجازى قبلى می‌رسند، دیگر پتانسیل بازدارنده را حس نمی‌کنند که به عقب برگردند و به مسیر خود ادامه می‌دهند که این دقیقاً مثل حالت ابتدایی است، پس دوباره کاتد مجازى شکل می‌گیرد یا به عبارت دقیقتر کاتد مجازى به جای اولش بر می‌گردد و دوباره این چرخه تکرار می‌شود. نوسان کاتد مجازى تقریباً در فرکانس پلاسما رخ می‌دهد. فرکانس پلاسما از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{n_b e^2}{\epsilon_0 m \gamma_0} \right)^{1/2} = 8.98 \times 10^3 \left[ \frac{n_b (cm^{-3})}{\gamma_0} \right]^{1/2} (Hz) \quad (4-1)$$

که در آن چگالی الکترونهاى پرتوالکترونى درست بعد از عبور از آند و  $-e$  و  $m$  بار و جرم الکترون و  $\epsilon_0$  ضریب دی‌الکتریک فضای آزاد است. در مقیاس‌هاى عملى می‌توان گفت:

$$f_p (GHz) = 4.10 \left( \frac{J (KA/cm^2)}{\beta \gamma_0} \right)^{1/2} \quad (5-1)$$

که در آن  $\beta = \frac{v_b}{c} = \left( 1 - \frac{1}{\gamma_0^2} \right)^{1/2}$  و  $v_b$  سرعت الکترونها می‌باشد. در محدوده غیر نسبیتی که در

آن محدوده  $\gamma_0 \cong 1$  و  $\beta \propto V_0^{1/2}$  و از طرفی می‌دانیم  $J \propto \frac{V_0^{3/2}}{d^2}$  برای فرکانس نوسان کاتد مجازى داریم:

$$f_{vc} \propto \frac{V_0^{1/2}}{d} \quad (6-1) \text{ غیر نسبیتی}$$

در محدوده نسبیتی کامل که در آن  $\gamma_0 \propto V_0$ ،  $\beta \cong 1$ ، و از طرفی می‌دانیم  $J \propto \frac{V_0}{d^2}$  داریم:

$$f_{vc} \propto \frac{1}{d} \quad (7-1) \text{ نسبیتی کامل}$$

محدوده نسبیتی کامل به ولتاژهایی خیلی بالاتر از ولتاژهای سیستم‌های HPM که در اینجا ذکر می‌شود اطلاق می‌شود. محدوده نسبیت کامل جایی است که کمترین مقدار ولتاژ بیش از ۵۰۰ کیلو ولت باشد.

علاوه بر نوسان کاتد مجازى، الکترونهاىی که بین کاتد حقیقی و کاتد مجازى در تله افتاده‌اند، در حین حرکت رفت و برگشت دسته بندی می‌شوند و با تناوب آن در فرکانس رفت و برگشت تشعشع می‌کنند. این فرکانس به صورت زیر بدست می‌آید.

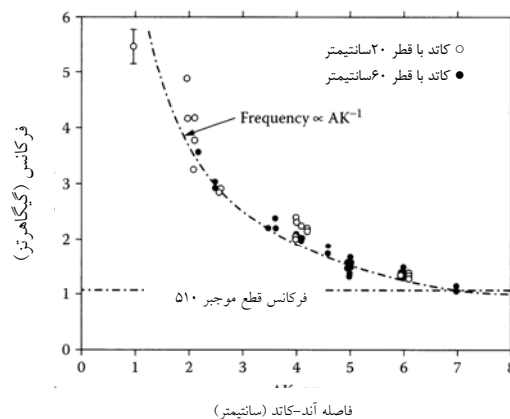
$$f_r = \frac{1}{4T} = \frac{1}{4 \int_0^d \frac{dz}{v_z}} \quad (A-1)$$

که در آن  $d$  فاصله آند-کاتد است. در مقیاسهای تجربی و با استفاده از تقریب غیر نسبیتی برای سرعت الکترونها ( $v_z$ ) در فاصله آند-کاتد داریم:

$$f_r (\text{GHz}) \cong 2.5 \frac{\beta}{d(\text{cm})} \quad (9-1) \text{ غیر نسبیتی}$$

در ولتاژهای نسبیتی چون سرعت الکترونها خیلی زود به مقدار نهایی خود یعنی  $\beta c$  می‌رسد، ضریب معادله به مقدار نهایی خود میل می‌کند و  $7/5$  در نظر گرفته می‌شود (در این حالت در تمام مسیر آند-کاتد  $v_b = \beta c$ )، در رژیم غیر نسبیتی مقیاس هر دو فرکانس  $f_r$  و  $f_{vc}$  یکسان است و هر دو در محدوده فرکانس مایکروویو قرار می‌گیرند، بنابراین هر دو پدیده برای رقابت با یکدیگر در لامپ حضور دارند. معمولاً  $f_r > f_{vc}$  و بطور نمونه  $f_{vc} \sim 2f_r$  می‌باشد. همانطور که بعداً نشان داده می‌شود، هندسه لامپ تعیین می‌کند که رقابت بین این دو پدیده ( $f_r, f_{vc}$ ) از بین برود یا اینکه این رقابت وجود داشته باشد.

وابستگی اندک به ولتاژ و نسبت عکس با فاصله آند-کاتد ( $d$ ) برای فرکانس لامپ، موضوعی است که در اقدامات تجربی نیز تأیید شده است [5]. در یک سری آزمایش در محدوده وسیع فرکانسی که توسط پرایس<sup>1</sup> انجام شد [18]، رابطه معکوس فاصله آند-کاتد با فرکانس مورد بررسی قرار گرفت که نتیجه آن در شکل ۴-۱ نشان داده شده است. نتایج موجود در شکل بوسیله یک ویرکتور که قابلیت تنظیم در یک دهه فرکانسی را داشت بدست آمد.



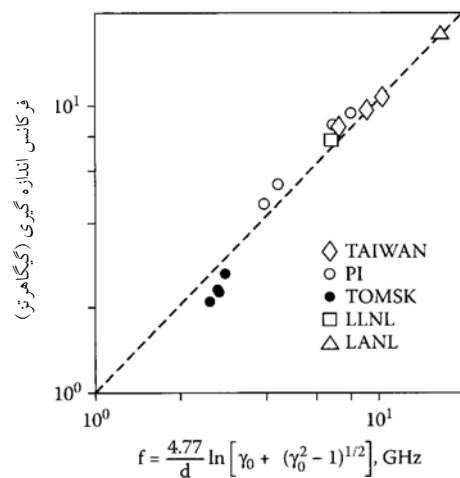
شکل ۴-۱. تغییرات فرکانس ویرکتور با تغییر فاصله آند-کاتد (AK). کاتد با دو قطر متفاوت تست شده است و توان مایکروویو خروجی توسط موجبر WR510 استخراج شده است که فرکانس قطع آن در شکل نشان داده شده است. [18]

<sup>1</sup> Price

شخصی بنام وو<sup>۱</sup> یک روش دو بعدی را بکار گرفت تا فرکانس پلاسما را برای یک پرتو الکترونی پینچ شده بدست آورد [19]. روش او بر پایه این مشاهده بود که پرتوهای نسبتاً کم جریان پینچ نمی شوند و به سمت دیواره ها واگرا می شوند و تولید پتانسیل خیلی پائینی در مرکز لوله بر هم کنش (لوله ای که در داخل آن حرکت می کنند) می کنند که این پتانسیل باعث برگشت الکترونها به سمت دیود و تشکیل کاتد مجازی می شود. با توجه به رفتار ولتاژ و جریان در طول اعمال یک پالس، او نشان داد که گسیل میکروویو در مدت زمان کوتاهی پس از آن که پینچینگ پرتو بوجود می آید رخ می دهد - هنگامیکه چگالی جریان در جهت شعاعی و محوری با هم برابر شود - و هنگامیکه شدت پینچینگ خیلی افزایش پیدا کند گسیل الکترونها قطع می شود. وقتی شدت پینچینگ خیلی قوی می شود چگالی جریان در جهت شعاعی خیلی بیشتر از چگالی جریان محوری است که در نتایج عملی نیز تأیید شده است [20]. با استفاده از فرمولاسیون شبیه گولدشتاین<sup>۳</sup> برای دیودهای با پرتو پینچ شده [21] و کریدان<sup>۴</sup> برای شار شبه پتانسیل [22]، او یک رابطه برای فرکانس پلاسما استخراج کرد که با نتایج تجربی مطابقت خوبی دارد :

$$f = \frac{C}{2\pi d} \ln \left[ \gamma_0 + (\gamma_0^2 - 1)^{1/2} \right] = \frac{4.77}{d(\text{cm})} \ln \left[ \gamma_0 + (\gamma_0^2 - 1)^{1/2} \right] \text{ (GHz)} \quad (10-1)$$

این نتیجه با خروجیهای عملی زیادی مقایسه شده است که در شکل ۱-۵ نشان داده شده است.



شکل ۱-۵. مقایسه فرکانس عملی بدست آمده با نتایج روش تحلیلی وو [19]

<sup>1</sup> Woo

<sup>2</sup> Pinch

<sup>3</sup> Goldstein

<sup>4</sup> Creedon