

## طراحی و شبیه سازی تفنگ الکترونی برای کلایسترون چند باریکه‌ای ۷/۵ مگاوات باند S

INC29-1313

علی شفیع‌زاده<sup>۱\*</sup>، سید فرهاد مسعودی<sup>۲</sup>، ساسان احمدیان نمین<sup>۳</sup>

۱. دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، صندوق پستی، تهران - ایران

۲. دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، صندوق پستی، تهران - ایران

۳. پژوهشکده ذرات و شتابگرها، پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، صندوق پستی، تهران - ایران

## چکیده:

در این مقاله به طراحی و شبیه سازی تفنگ الکترونی یک کلایسترون چند باریکه‌ای با توان ۷/۵ مگاوات در باند فرکانسی S پرداخته شده است. تعداد کل باریکه‌های الکترونی این تفنگ الکترونی ۴۰ عدد است. ولتاژ کاری تفنگ الکترونی ۵۵ کیلو ولت، جریان کل ۳۰۴ آمپر و پروینس هر باریکه الکترونی ۰/۵۹ میکرو پروینس است. با توجه به الزامات طول عمر عملیاتی کاتد و تجربیات ساخت انواع کاتدها در داخل کشور چگالی سطحی کاتد در حدود ۷/۵ آمپر بر سانتی‌متر مربع انتخاب شده است. برای طراحی بهینه تفنگ الکترونی، در دو حالت سرد و گرم بررسی شده است. حالت سرد همان طراحی اولیه، و حالت گرم ناشی از گرمای کاتد و سایر عوامل گرم‌کننده که باعث انبساط اجزا و در نتیجه تغییرات ابعاد تفنگ می‌شوند، بدست آمده است. این شبیه‌سازی در دو محیط شبیه سازی CST و ANSYS انجام شده و نتایج حاصل از تطابق خوبی برخوردار است.

**کلیدواژه‌ها:** کلایسترون چند باریکه‌ای، تفنگ الکترونی، پروینس، شبیه سازی شرایط گرم و سرد، CST، Ansys

## Design and simulation of electron gun for 7.5 MW S-band multi-beam klystron

A. Shafizadeh<sup>1</sup>, S. F. Masoudi<sup>2</sup>, S. Ahmadiannamin<sup>3</sup>

Physics, Faculty of Physics, K. N. Toosi University of Technology, P.O.BOX: Tehran, Iran.

Physics, Faculty of Physics, K. N. Toosi University of Technology, P.O.BOX: Tehran, Iran

Research Institute of Particles and Accelerators, Institute for Research in Fundamental Sciences, P.O.BOX: Tehran, Iran

### Abstract:

This article introduces the detailed design of a multi-beam electron gun that will be used for a 7.5 MW S-band multi-beam klystron. Total numbers of electron beamlets in this electron gun is 40. The operating voltage and current of this electron gun is 55 kV and 304 A, respectively. Single beamlet perveance is 0.59 micro-perveance and the total perveance of the gun is 23.6 micro-perveance. To meet the requirements of the electron gun operation life time and in accordance with the recent achievements of researchers in the Iranian scientific organizations, current density of the cathode has been selected to be 7.5 A/cm<sup>2</sup>. For more efficient and optimal design of the electron gun, the simulations have been done and compared for two cases of cold and hot states. The cold state simulation is our preliminary estimates of dimensional and operational parameters. In comparison with real state of operation, displacement results of the gun geometrical dimensions due to cathode heating are applied for simulation study of gun parameters variations. This simulation were done in the software of CST and Ansys and the results are in good agreement.

**Keywords:** multi-beam klystron, Electron gun, Thermomechanical Simulation, Cathode current density, Perveance

## ۱. مقدمه

کلايسترون چند باريکه‌ای نوعی تقويت کننده امواج مايکروويو توان بالا است که با استفاده از فناوری کاتدهای جريان بالای تفنگ‌های الکترونی و بر مبنای طراحی کلايسترون تک باريکه‌ای توسعه یافته است. کلايسترون‌های چند باريکه‌ای از کاتدهای مستقل متعدد برای توليد پرتوهای الکترونی استفاده می‌کنند که یک سیستم متمرکز کننده مشترک دارند (مجموع چند استوانه وهنلت که با آرایش منظم کنار هم قرار گرفته و در یک ساختار یکپارچه به نام الکتروود متمرکز کننده پرتو در تفنگ چند باريکه‌ای یاد می‌شود) و با میدان‌های بسامد رادیویی در یک منطقه مشترک برهمکنش دارند [۱].

[۲]. کلايسترون‌های چند باريکه در مقایسه با کلايسترون‌های تک باريکه، دارای ولتاژ راه‌انداز کمتر و پرتوهای الکترونی متعدد هستند و سیگنال توان خروجی آن نوبز کمتر و پهنای باند وسیع‌تری را دارد. بنابراین به طور گسترده‌ای در رادارها، شتاب‌دهنده‌های ذرات و سایر زمینه‌ها استفاده می‌شوند و در حال توسعه هستند [۳، ۲]. تفنگ الکترونی طراحی شده برای استفاده در یک لامپ کلايسترون چند باريکه‌ای باند S با حداکثر توان خروجی بیش از ۶ مگاوات، راندمان و بهره به ترتیب بیش از ۶۰ درصد و ۴۵ دسی‌بل و پهنای باند ۵ مگاهرتز می‌باشد [۳]. همچنین در طراحی این سیستم کاتد نوع M انتخاب شده که دما و طول عمر عملیاتی آن به ترتیب، ۱۳۰۰ کلوین و حدود ۱۰ هزار ساعت است.

مشخصات کلايسترون چند باريکه‌ای پیشنهادی برای به‌کارگیری در تزریق‌گر ۲۵ مگا الکترون ولت چشمه نور ایران در جدول ۱ نشان داده شده است. براساس مشخصات کلايسترون چند باريکه پیشنهاد شده، در این مقاله مطالعات طراحی و شبیه‌سازی تفنگ الکترونی متناسب با این کلايسترون ارائه گردیده است. در بخش دوم، محاسبه مقادیر اولیه هندسی و نتایج شبیه‌سازی سه بعدی تفنگ الکترونی در حالت سرد ارائه شده است. همچنین در بخش سوم، جزئیات طراحی ترمومکانیکی و الکترواستاتیک تفنگ الکترونی در حالت گرم ارائه و با حالت سرد مقایسه گردیده است.

جدول ۱. مشخصات کلايسترون چند باريکه‌ای پیشنهادی برای استفاده در چشمه نور ایران.

عنوان مشخصه	مقدار
فرکانس (MHz)	$2998 \pm 5$
بیشینه توان (MW)	۷٫۵
بازدهی (%)	>۶۰
بهره (dB)	۵۰
عرض پالس ( $\mu s$ )	۷-۱۲
چرخه کار (%)	۰٫۴
توان ورودی (W)	۷۰-۲۰۰
ولتاژ کاتد (kV)	۵۵

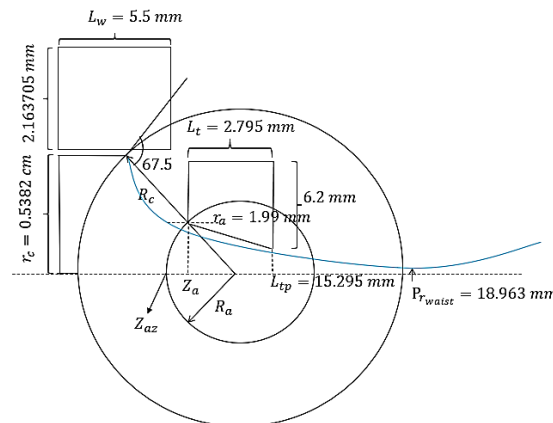
## ۲. طراحی تفنگ الکترونی در حالت سرد به کمک الگوریتم وان

منظور از حالت سرد، طراحی تفنگ الکترونی در ابعاد اولیه بدون در نظر گرفتن تغییرات هندسی به دلیل انتقال حرارت کاتد است. ابعاد هندسی توسط الگوریتم وان در محیط کد نویسی متلب و با استفاده از مقادیر جدول ۱ محاسبه شده

است. در شکل ۱ مقادیر محاسبه شده به همراه هندسه هر ناحیه کاتدی تفنگ نشان داده شده است [۶]. ابعاد بهینه شده با توجه به مقادیر جدول و با استفاده از رابطه ۱، می‌توان جریان تفنگ الکترونی چند باریکه‌ای را محاسبه کرد که در آن  $N$  تعداد پرتو،  $\eta$  بازده کلایسترون،  $I$  جریان و  $V$  ولتاژ باریکه الکترونی است [۴]. رابطه تجربی بین پروینس و بازده کلایسترون نیز به صورت رابطه ۲ است [۴].

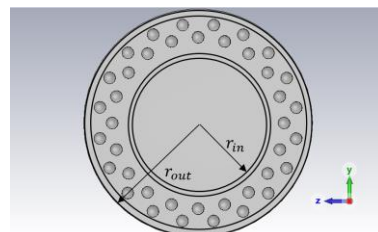
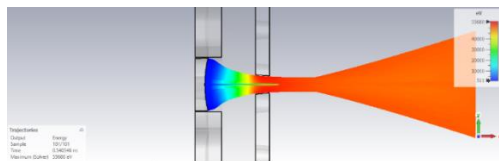
$$P = N\eta IV \quad (1)$$

$$\eta = 0.85 - 0.2\mu P \quad (2)$$



شکل ۱. ساختار تفنگ الکترونی پیرس (طراحی دو بعدی تفنگ الکترونی به صورت تک باریکه‌ای)

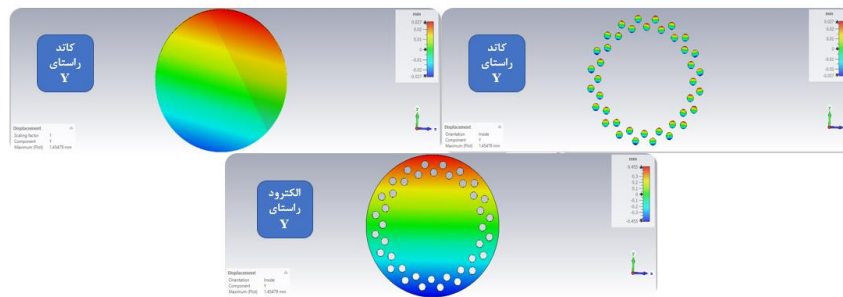
برای شبیه‌سازی تفنگ الکترونی از حل‌کننده ردیابی ذرات نرم‌افزار CST استفاده شده است. در روند طراحی تفنگ الکترونی این کلایسترون ملاحظات در نظر گرفته شد. به دلیل اینکه چینش کاتدها به صورت دایره‌ای است، برای کاهش تأثیر میدان مغناطیسی عرضی در عبور از کاواک‌های کلایسترون، اندازه تفنگ الکترونی باید تا حد امکان کوچک، و در چیدمان آن کاتدها به هم نزدیک باشند. پرتو الکترونی خروجی از تفنگ الکترونی در کاواک اول باید شعاع و موقعیت کم مناسبی داشته باشد و برای دستیابی به توان و راندمان خروجی، جریان و پروینس مناسبی داشته باشد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی‌های صورت گرفته بر روی یک کاتد از ۴۰ کاتد تفنگ الکترونی، بعد از بهینه‌سازی ابعاد تفنگ الکترونی، جریان باریکه ۸/۹ آمپر، شعاع باریکه در محل کمر باریکه ۱/۶۵ میلی‌متر و موقعیت کمر ۱۸/۹۶ میلی‌متر از مبدا مختصات تعیین گردید. کاواک‌های کلایسترون از نوع هم‌محور بوده و در طراحی تفنگ الکترونی ۴۰ کاتدی، کاتدها را در دو لایه هم‌محور چیده شده است که ۲۰ کاتد در شعاع داخلی ۷۹/۲۳۵ میلی‌متر و ۲۰ کاتد دیگر در شعاع بیرونی ۹۰/۵۳۵ میلی‌متر قرار می‌گیرند. مقطع قرارگیری کاتدها در کاواک و نحوه ترکیب ذرات از یک کاتد در شکل ۶ نشان داده شده است. برای دستیابی به راندمان بیش از ۵۰ درصد پروینس طبق رابطه (۲) محاسبه شده و باید کمتر از ۱ میکرو پروینس باشد. طبق شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، پروینس هر باریکه الکترونی در حدود ۰/۵۹ میکرو پروینس است.



شکل ۶. مدل سه بعدی ردیابی ذرات تفنگ ۴۰ پرتویی ترمویونیک در نرم افزار CST در حالت سرد

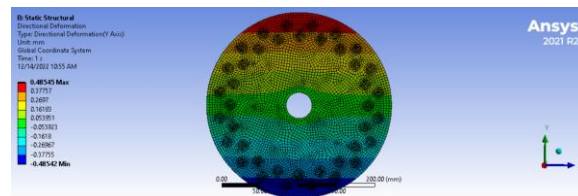
### ۳. طراحی تفنگ الکترونی در حالت گرم به کمک تحلیل گرما مکانیکی

برای بدست آوردن ابعاد انبساط یافته تفنگ الکترونی از تحلیل ترمومکانیکی در نرم‌افزارهای CST و ANSYS استفاده شده است. منبع گرمایی ناشی از گرمایش کاتد بوده و آن را در دو نرم‌افزار به عنوان منبع حرارتی در نظر گرفته و با قرار دادن شرایط مرزی، شبیه‌سازی را آغاز می‌کنیم. در طراحی انجام شده با توجه به ضرورت کاهش میدان مغناطیسی بر روی کاتد و نیز مشخصات مکانیکی مورد نیاز، آند از جنس مس، کاتد از جنس تنگستن و الکتروود متمرکز کننده از جنس مولیبدن در نظر گرفته شده است با توجه به تحلیل ردیابی ذرات، پرتو با آند و سایر قطعات برخوردی ندارد و نیز برای جلوگیری از جرقه زدن و آسیب رسیدن به کاتد و سایر اجزا تفنگ، مجموعه تفنگ الکترونی که شامل آند، کاتد و الکتروود متمرکز کننده است، در خلا بسیار بالایی کار می‌کنند. همانطور که اشاره شد، منبع گرمایی این مجموعه کاتد آن است که تا دمای ۱۳۰۰ درجه کلویین گرم شده و سایر اجزا در دما ۳۰ درجه سلسیوس محیط قرار دارند. با توجه به سیستم خنک کننده اطراف آند و خلاء داخل ساختار، تغییرات ابعادی آند تفنگ الکترونی به دلیل کم بودن دمای آن قابل صرف نظر کردن است.



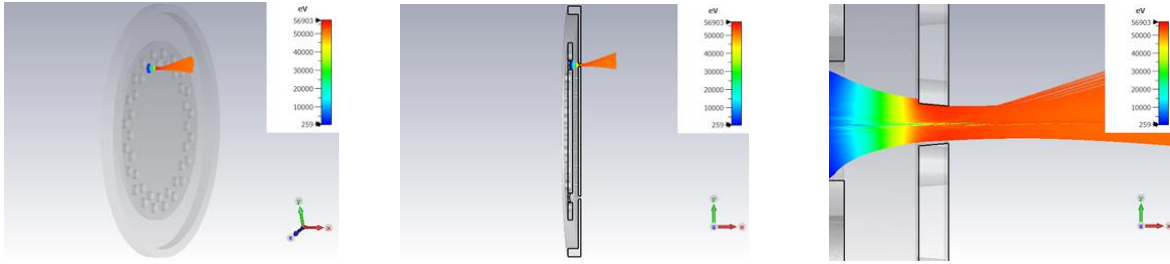
شکل ۸. تغییرات ابعادی کاتد و الکتروود متمرکز کننده در راستای Y در نرم افزار CST

تغییرات ابعادی در الکتروود متمرکز کننده و کاتد در شکل ۸ قابل مشاهده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی‌ها می‌توان دریافت که تغییرات از مرکز ساختار به سمت لبه‌ها افزایش می‌یابد که بیشینه تغییرات در لبه‌های دو طرف الکتروود متمرکز کننده و کاتد به ترتیب حدود ۰/۴۵۵ و ۰/۰۲۷ میلی‌متر است. این تفاوت در انبساط قطعات به دلیل جنس مختلف مواد و توزیع دمایی بر روی آن‌ها است.



شکل ۹. تغییرات ابعادی کاتد و الکتروود متمرکز کننده در راستای Y در نرم افزار ANSYS

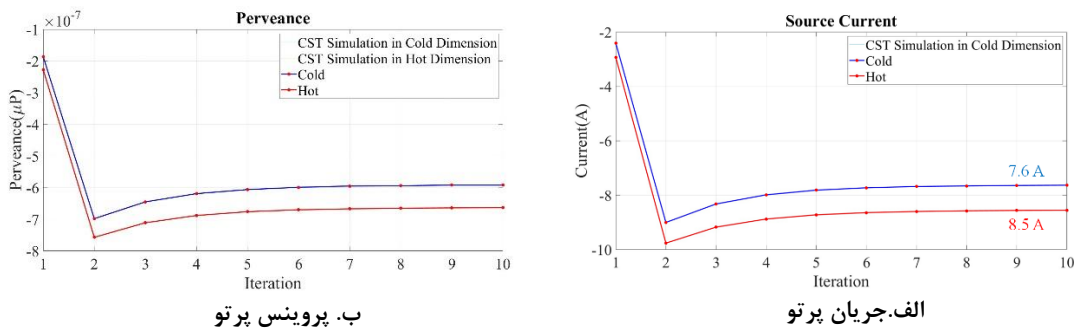
در شکل ۹ نیز نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار انسیس نشان داده شده است. تغییرات ابعاد هندسی در شکل ۹ مطابقت خوبی با نتایج حاصل از نرم‌افزار CST داشته و بیشینه تغییرات ابعادی قطعات مطابق با این شکل در حدود ۰/۴۸۵ میلی‌متر است. این تغییرات ابعاد هندسی مجدداً در حل‌کننده ردیابی ذرات نرم‌افزار CST شبیه‌سازی گردید.



شکل ۱۰. شبیه سازی ردیابی ذرات تفنگ الکترونی ۴۰ باریکه‌ای در حالت گرم

همانطور که انتظار داشتیم با توجه به متفاوت بودن میزان تغییرات ابعادی در اجزا تفنگ پس از اعمال تغییرات آند، کاتد و الکتروود متمرکز کننده، این اجزا همراستایی خود را از دست دادند و این امر باعث می‌شود که پرتو الکترونی منحرف شود و با آند برخورد کند و سبب اتلاف جریان و گرم شدن ساختار گردد. این مسئله در شکل ۱۰ قابل مشاهده است.

این مدل یک ساختار الکترواستاتیک بدون میدان مغناطیسی است. پروینس هر باریکه الکترونی به صورت تک باریکه در تفنگ ۴۰ باریکه‌ای  $0.166 \mu P$  است. تفاوت کمی بین نتایج شبیه‌سازی لایه‌های داخلی و بیرونی پرتو الکترونی وجود دارد. در شکل ۱۱-الف، تغییرات جریان در دو حالت سرد و گرم تفنگ الکترونی قابل مشاهده است. با توجه به شکل ۱۱-الف می‌توان دریافت که افزایش ابعاد حتی با وجود برخورد بخشی از باریکه الکترونی به دیواره آند، باعث افزایش جریان خروجی می‌شود که با توجه به رابطه مستقیم جریان با پروینس، در تفنگ الکترونی در حالت گرم پروینس نیز افزایش می‌یابد که در شکل ۱۱-ب این تغییرات دیده می‌شود. این امر باعث کاهش راندمان کلايسترون خواهد شد.

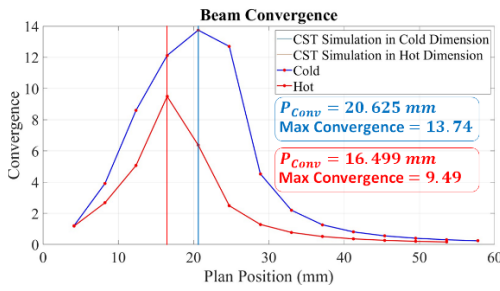


شکل ۱۱. تغییرات جریان پروینس تفنگ الکترونی ۴۰ باریکه‌ای در دو حالت سرد و گرم

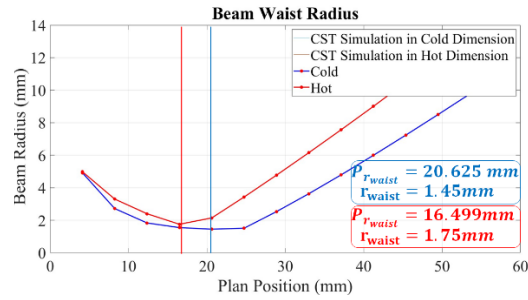
با توجه به شکل ۱۲ مکان تشکیل کمر باریکه در دو حالت سرد و گرم به ترتیب  $20/63$  و  $16/49$  میلی‌متر است و میزان شعاع کمر باریکه نیز در دو حالت سرد و گرم به ترتیب  $1/45$  و  $1/75$  میلی‌متر محاسبه شده است. این محاسبات نشان دهنده تغییرات قابل توجه در فرآیند خوشه‌سازی و پارامترهای خروجی کلايسترون است که در فرآیند طراحی و ساخت آن باید مورد توجه قرار بگیرد.

دیگر پارامتر مهم در سنجش باریکه الکترونی خروجی همگرایی آن است که در حفظ پایداری باریکه الکترونی و نیز بحث‌های مربوط به دینامیک باریکه اهمیت زیادی دارد که از رابطه ۳ محاسبه می‌شود. در این رابطه  $r_c$  شعاع کاتد و  $b$  شعاع باریکه است [۴]. طبق این رابطه همگرایی باریکه با گرم شدن کاتد کاهش می‌یابد و همانطور که قبلاً اشاره شد، باعث کاهش راندمان کلايسترون خواهد شد.

$$Conv = \frac{r_c^2}{b^2} \quad (3)$$



ب. همگرایی پرتو



الف. شعاع پرتو

شکل ۱۲. تغییرات شعاع پرتو و همگرایی پرتو در ناحیه‌های مختلف تفنگ الکترونی ۴۰ باریکه‌ای در دو حالت سرد و گرم

#### ۴. نتیجه گیری

در این مقاله، طراحی و تحلیل گرما مکانیکی یک تفنگ الکترونی ۴۰ باریکه‌ای برای یک کلايسترون چند باریکه‌ای ارائه شد و مورد بحث قرار گرفت. یکی از اهداف این پروژه درک بهتر رفتار کلايسترون چند باریکه با مدل NS6 ساخت شرکت VDBT است که در شتاب‌دهنده خطی پروژه‌های دانش‌های بنیادی مورد استفاده قرار خواهد گرفت. تفنگ الکترونی می‌تواند جریان  $304 A$  را در ولتاژ ۵۵ کیلو ولت را توسط ۴۰ باریکه تولید کند. با توجه به نتایج حاصل از شبیه سازی ترمومکانیکی، رفتار پرتو خروجی پس از گرم شدن کاند تغییراتی را متحمل شده است که با اصلاح ابعاد در حالت سرد می‌توان ابعاد را به صورتی بهینه سازی کرد تا همواره پرتو خروجی در حالت گرم رفتار مناسبی داشته و برای ادامه کارکرد تفنگ الکترونی در کلايسترون مناسب باشد. این رفتار در مقایسه با رفتار تفنگ‌های الکترونی تک باریکه‌ای بر بهبود عملکرد کلايسترون‌های چند باریکه‌ای و تطابق بهتر نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری اثر چشمگیری دارد.

#### ۵. تشکر و قدردانی

با سپاس فراوان از پژوهشگران پژوهشکده ذرات و شتابگرهای پژوهشگاه دانش‌های بنیادی و چشمه نور ایران، آقای مهندس دانایی‌فرد، آقای مهندس استوار، آقای دکتر مشعل، خانم مهندس خسروی و خانم مهندس پویان‌راد، که در طول پروژه ما را یاری کردند.

#### ۶. مراجع

- [1] Chin YH. Design and performance of L-band and S-band multi beam klystrons.
- [2] Nehra, A.(2011). Design and Simulation of electron gun for J-band multi-beam klystron. CSIR-CEERI, Pilani
- [3] Lin X, Zhang R, Chao Q, Xie B, Geng Z, Liao Y, Yang X. Multi-beam gun design for an S-band klystron. AIP Advances. 2022 Aug 1;12(8):085026.

[4] Christopher James Lingwood, "High Power High Efficiency MultipleBeam Klystron Design," A Thesis submitted for the Degree of Doctor of Philosoph, April 2010.

[5] Gaertner G, Knapp W, Forbes RG, editors. Modern Developments in Vacuum Electron Sources. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer; 2020 Oct 9.

[6] Rodney J, Vaughan M. Synthesis of the Pierce gun. IEEE Transactions on Electron Devices. 1981 Jan; 28:37-41.

[7] Carter RG. Microwave and RF vacuum electronic power sources. Cambridge University Press; 2018 Apr 12.