

## طراحی و شبیه سازی فیلتر میان گذر برای حذف هارمونیک های مزاحم در مولد رادیوفرکانسی حالت جامد برای کاربرد در چشمه های یونی رادیوفرکانسی القایی

INC29-1278

حمید رحیم پور\*، حمیدرضا میرزائی، مهدی اصل بیگی

پژوهشکده فیزیک و شتابگرهای ذرات، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، ۱۴۳۹۹-۵۱۱۱۳، تهران- ایران

### چکیده:

در این مقاله یک مولد توان بالای رادیوفرکانسی برای کاربرد در شتابدهنده ذرات و چشمه های یونی با قابلیت کاهش هارمونیک های مزاحم، ارائه شده است. سیگنال مولد رادیوفرکانسی، ابتدا توسط یک نوسان ساز کنترل شونده با ولتاژ، که فرکانس ۵۶۱۳ MHz را شامل می شود، تولید می شود. در ادامه، این سیگنال چندین مرتبه تقویت شده و در انتها توسط یک تقویت کننده توان، قادر است تا توان خروجی حدود ۶۰۰ W را به صورت پیوسته از طریق آنتن القایی وارد محفظه چشمه کند. یک فیلتر میان گذر چبی شف نوع دوم با مرتبه هفت، برای تضعیف هارمونیک های دوم و سوم طراحی و توسط نرم افزار ADS شبیه سازی شده است. ابتدا از مدل ایده آل قطعات و سپس از پارامترهای پراکندگی اندازه گیری شده ی مدل قطعات، برای ارزیابی فیلتر پیشنهادی استفاده شده است. با توجه به نتایج شبیه سازی، هارمونیک های فرکانس ۵۶۱۳ MHz بیش از ۷۰ dB تضعیف شده اند و تغییرات فاز بر حسب فرکانس در باند عبور فیلتر، کاملاً خطی و قابل قبول می باشد.

**کلیدواژه ها:** منابع توان بالای حالت جامد، فیلترهای میان گذر، چشمه های یونی، شتابدهنده های ذرات

## Design and Simulation of a Band-Pass Filter for Solid-State RF Source Harmonic Suppression for Inductive RF Ion Sources

Hamid Rahimpour\*, HamidReza Mirzaei, Mahdi Aslbeigi

Physics and Accelerators Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, P.O.BOX:14399-51113, Tehran, Iran

### Abstract:

A high-power solid-state RF source with the ability of harmonic rejection for ion source applications is proposed in this paper. First, a low-level RF signal is generated by a voltage-controlled oscillator which includes a 13.56 MHz frequency. This signal is amplified by several amplifier stages to drive a main high-power amplifier which can deliver 600 W power continuously to the ion source chamber by an inductive antenna. A seven-order type II Chebyshev band-pass filter is designed and simulated by ADS to suppress the source harmonics. First, the ideal component model and then the measured S-parameters model were used to evaluate the filter response. According to the simulation results, the harmonics of the 13.56 MHz signals were attenuated more than 70 dB. Also, the phase versus frequency response is linear and acceptable in the pass band frequencies.

**Keywords:** High power solid-state source, Band-pass Filters, Ion source, Particle Accelerator.

## ۱. مقدمه

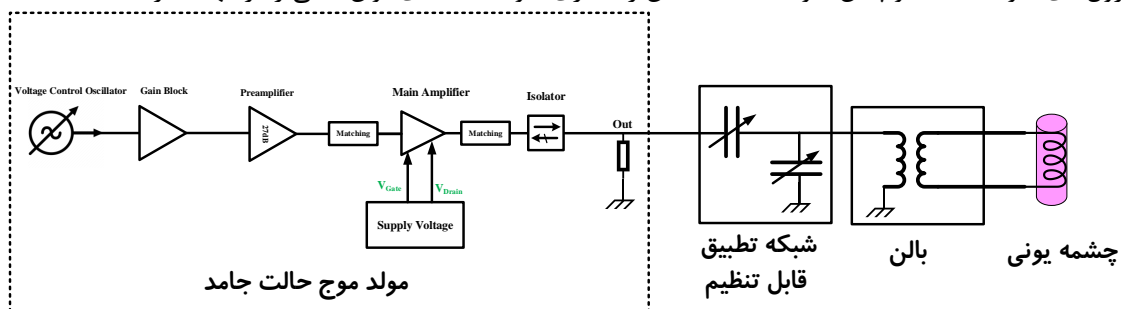
شتاب‌دهنده الکترواستاتیک ES-200 یک شتاب‌دهنده کم حجم، قابل حمل با دامنه کاربرد وسیع می‌باشد که نه تنها برای تحقیقات هسته‌ای پایه و آنالیز عنصری و ایزوتوپی مورد استفاده قرار می‌گیرد، بلکه برای بازرسی و ردیابی محموله‌های غیرمجاز مواد مخدر و یا قابل انفجار و دیگر کاربردهای تشخیصی در حوزه‌های مختلف صنعت، پزشکی و آموزشی به کار گرفته می‌شود [۱].

یکی از مهمترین اجزای شتاب‌دهنده الکترواستاتیک، چشمه یونی آن است. از میان انواع چشمه‌های یون، در شتاب‌دهنده الکترواستاتیک ES-200 چشمه یونی فرکانس رادیویی انتخاب شده است. به دلیل محدودیت فضا و همچنین برای ایجاد امکان عملکرد پالسی و پیوسته، مولد رادیوفرکانسی از نوع حالت جامد انتخاب شده است. تقویت کننده‌های حالت جامد عملکرد پایداری نسبت به نوع لامپی دارند و در مد پالسی به دلیل سرعت بالا قابلیت کنترل بیشتری را ایجاد می‌کنند. همچنین از دیگر برتری‌های عمده مولدهای حالت جامد مبتنی بر تکنولوژی نیمه‌هادی می‌توان به موارد طول عمر بالاتر، عدم نیاز به منابع تغذیه ولتاژ بالا و قیمت مناسب آن‌ها اشاره کرد [۲ و ۳]. از مزیت‌های دیگر طراحی تقویت کننده‌های ترانزیستوری امکان کنترل بهتر پارامترهای توان برگشتی و تطبیق امپدانس است [۴]. اخیراً نیز تحقیقات متعددی برای افزایش توان خروجی، بازده توان، پایداری و بهبود تطبیق تقویت کننده‌های رادیو فرکانسی حالت جامد در حال انجام است [۵ و ۶].

در این مقاله، یک مولد رادیوفرکانسی حالت جامد مبتنی بر قطعات گسسته، برای کاربرد در چشمه‌های یونی شتاب‌دهنده‌های الکترواستاتیک معرفی می‌شود. مولد پیشنهادی قادر است تا توان موج پیوسته بیش از  $500\text{ W}$  را در فرکانس کاری  $13.56\text{ MHz}$ ، از طریق آنتن القایی، تحویل یک چشمه یونی از نوع رادیوفرکانسی دهد. به دلیل آنکه قطعات پیش تقویت کننده و تقویت کننده توان اصلی، پهنای باند فرکانسی بالایی دارند و قطعه نوسان ساز کنترل شونده ولتاژ هم، هارمونیک‌های مزاحم بالایی دارد که توسط این قطعات تقویت می‌شوند، از یک فیلتر میان‌گذر برای افزایش پایداری مولد پیشنهادی و تضعیف حداکثری هارمونیک‌های مزاحم استفاده شده است.

## ۲. مولد موج رادیوفرکانسی حالت جامد پیشنهادی

شمای کلی یک مولد موج فرکانس بالای حالت جامد در شکل ۱ نشان داده شده است. اولین بخش زنجیره‌ی مولد موج حالت جامد، یک منبع موج کنترل شده با ولتاژ می‌باشد، که توان خروجی در حد میلی‌وات دارد. در واقع ادامه زنجیره، نقش تقویت این مولد موج را داشته و تنها توان خروجی آن را در حد چند صد وات افزایش می‌دهد. در این شکل، ماژول‌های تقویت کننده و پیش تقویت کننده، نقش راه‌اندازی تقویت کننده‌ی توان اصلی را بر عهده دارند.

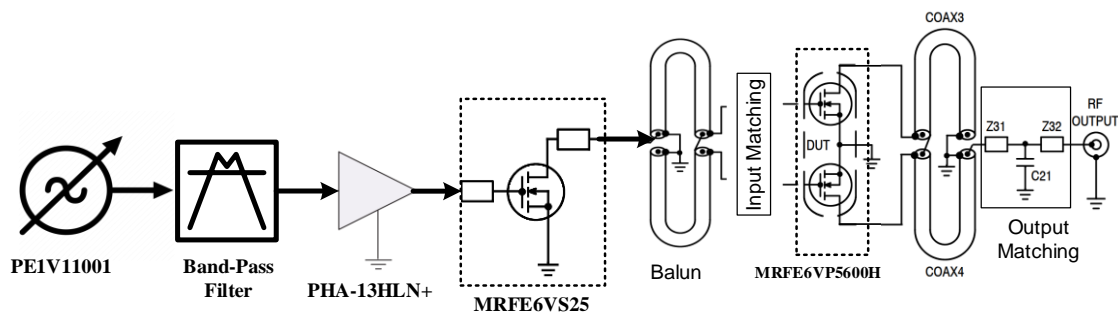


شکل ۱. شمای کلی یک مولد موج حالت جامد رادیوفرکانسی با شبکه تطبیق برای کاربرد در چشمه‌های یونی رادیوفرکانسی.

یکی از پرکاربردترین فرکانس‌های مولد موج رادیوفرکانسی در کاربردهای صنعتی، فرکانس  $13.56\text{ MHz}$  می‌باشد. لذا در این مقاله از یک نوسان ساز کنترل شده با ولتاژ با شماره قطعه "PE1V11000" در این فرکانس استفاده شده است. فرکانس  $13.56\text{ MHz}$  با تنظیم ولتاژ کنترل حدود ۸ ولتی به قطعه نوسان ساز به دست می‌آید. اما مشکلی که این نوسان ساز دارد وجود هارمونیک‌های آن یعنی فرکانس‌های  $27.12\text{ MHz}$  و  $40.68\text{ MHz}$  و مضارب آن می‌باشد. طبق اطلاعات گزارش شده در مشخصات فنی این قطعه، هارمونیک دوم این مولد توان پایین فقط  $10\text{ dB}$  کوچکتر از

هارمونیک اصلی می‌باشد. بدین منظور باید هارمونیک‌های این اسیلاتور کنترل شوند با ولتاژ را تا حد امکان کاهش داد.

شماتیک دقیق بخش مولد رادیوفرکانسی حالت جامد با شماره قطعات به کار رفته، در شکل ۲ نشان داده شده است. در این شکل، اسیلاتور کنترل شونده با ولتاژ روی فرکانس  $13.56 \text{ MHz}$  تنظیم شده و سپس هارمونیک‌های آن توسط یک فیلتر میان گذر که در بخش بعدی شرح داده خواهد شد، تا حد قابل توجهی کاهش می‌یابند. توان خروجی اسیلاتور توسط یک تقویت کننده تا بیش از  $20 \text{ dBm}$  تقویت شده و در ادامه به قطعه پیش تقویت کننده  $25 \text{ W}$  اعمال می‌شود. قطعه تقویت کننده اصلی به کار گرفته شده در این مولد،  $\text{MRFE6VP5600H}$  ساخت شرکت  $\text{NXP}$  می‌باشد که قادر است توان خروجی تا  $600 \text{ W}$  را در خروجی فراهم آورد. با توجه به اینکه این تقویت کننده از نوع پوش-پول می‌باشد، نیاز است تا از بالن در ورودی و خروجی آن استفاده شود.

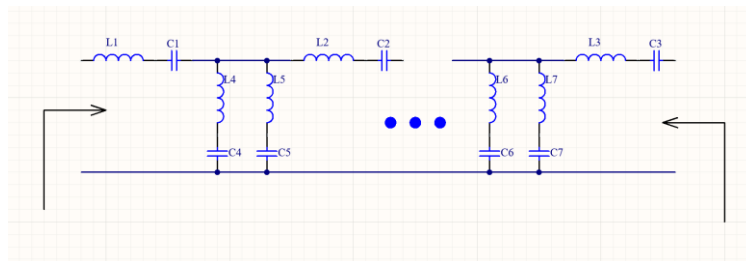


شکل ۲. زنجیره تقویت کننده توان مولد موج رادیوفرکانسی پیشنهادی.

تقویت کننده‌ی توان اصلی به کار گرفته شده در این مقاله، قادر است با بهره توان بیش از  $24 \text{ dB}$  با توان ورودی کمتر از  $4 \text{ W}$ ، توان اشباع خود را با بازده بیش از  $70\%$  درصد، تحویل بار دهد. از آنجا که این قطعه قادر است تا فرکانس حدود  $600 \text{ MHz}$  و در صورت تطبیق در ورودی، هر سیگنال ورودی را تقویت کند، یکی از چالش‌های احتمالی در راه‌اندازی قطعه، وجود هارمونیک‌های مزاحم در ورودی آن می‌باشد، که باید آن‌ها را تا حد امکان تضعیف کرد.

### ۳. طراحی فیلتر پایین‌گذر برای حذف هارمونیک‌های مزاحم

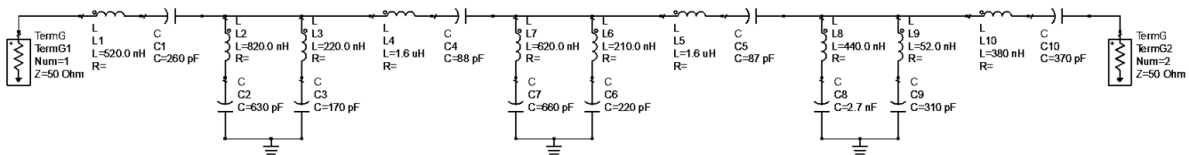
همان‌طور که در بخش پیش هم مختصراً توضیح داده شد، برای حذف هارمونیک‌های اسیلاتور که نقش اصلی تولید سیگنال فرکانس بالا را دارد، باید از فیلتر میان‌گذر استفاده شود. از آنجا که قطعات پیش تقویت کننده و تقویت کننده توان اصلی، هر دو پهنای باند فرکانسی وسیعی دارند، این هارمونیک‌ها باید تا حد ممکن تضعیف شوند. در این مقاله از ساختار چپی شف<sup>۱</sup> نوع دوم برای طراحی فیلتر استفاده شده است.



شکل ۳. ساختار کلی یک فیلتر میان‌گذر چپی شف نوع دوم.

<sup>1</sup> Chebyshev

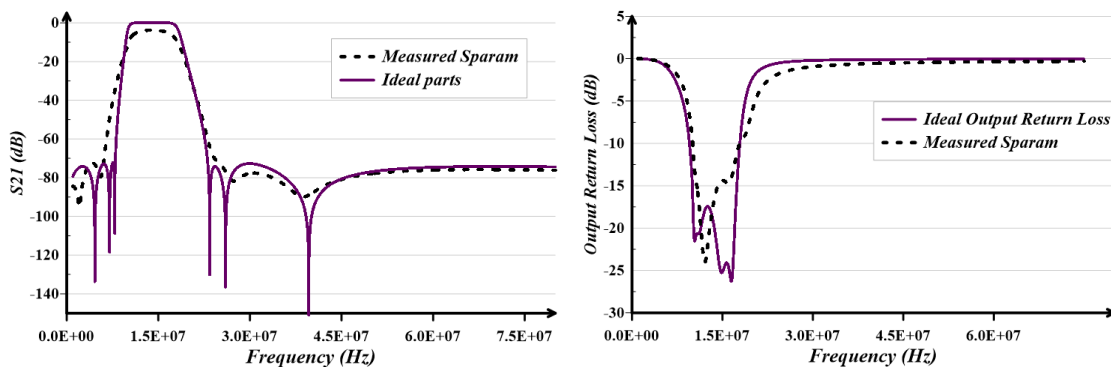
برای تعیین مرتبه فیلتر و مقادیر المان‌ها، چندین پارامتر مهم می‌باشند. از جمله این پارامترها می‌توان به پهنای باند، ریپل باند عبور، مقدار تضعیف و پهنای باند ممنوعه اشاره کرد. در این مقاله از فیلتر مرتبه هفتم برای افزایش تضعیف هارمونیک‌های مزاحم استفاده شده است. شکل ۳، ساختار کلی یک فیلتر غیر فعال چبی شف نوع دوم و شکل ۴ مرتبه هفتم این فیلتر را با فرکانس مرکزی  $13.56 \text{ MHz}$  و پهنای باند کمتر از  $10 \text{ MHz}$  نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی در بخش بعدی ارائه خواهند شد.



شکل ۴. فیلتر میان‌گذر مرتبه هفتم چبی‌شف نوع II طراحی شده با فرکانس مرکزی  $13.56 \text{ MHz}$ .

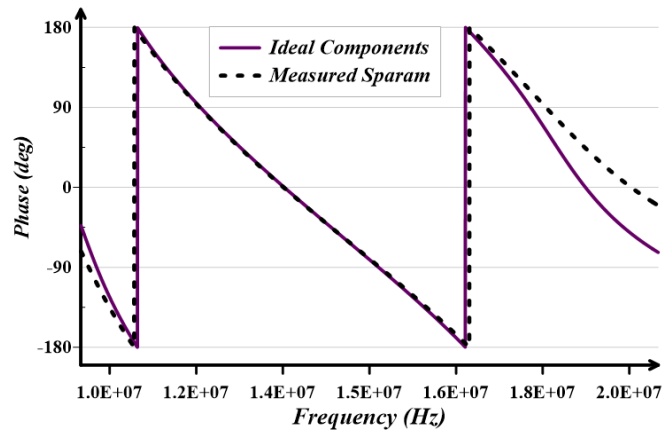
#### ۴. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از مدل اندازه‌گیری شده ماتریس پراکندگی قطعات

در این بخش نتایج شبیه‌سازی فیلتر میان‌گذر با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده ماتریس پراکندگی قطعات، ارائه خواهد شد. کلیه شبیه‌سازی‌ها توسط نرم افزار ADS<sup>۲</sup> انجام شده‌اند. شکل ۵ نتایج شبیه‌سازی تلفات و توان برگشتی فیلتر پیشنهادی را نشان می‌دهد. شبیه‌سازی‌ها در دو حالت ایده‌آل (با استفاده از مدل بدون اتلاف قطعات) و مدل واقعی قطعات انجام شده‌اند تا اثر ناشی از تلفات و ضریب کیفیت قطعات لحاظ گردد. با توجه به شکل ۵، فیلتر پیشنهادی در باند عبور تضعیف حدود  $3 \text{ dB}$  و در هارمونیک‌های دوم، سوم و چهارم یعنی فرکانس‌های  $27.12 \text{ MHz}$ ،  $40.68 \text{ MHz}$  و  $54.24 \text{ MHz}$  تضعیف بیش از  $70 \text{ dB}$  دارد.



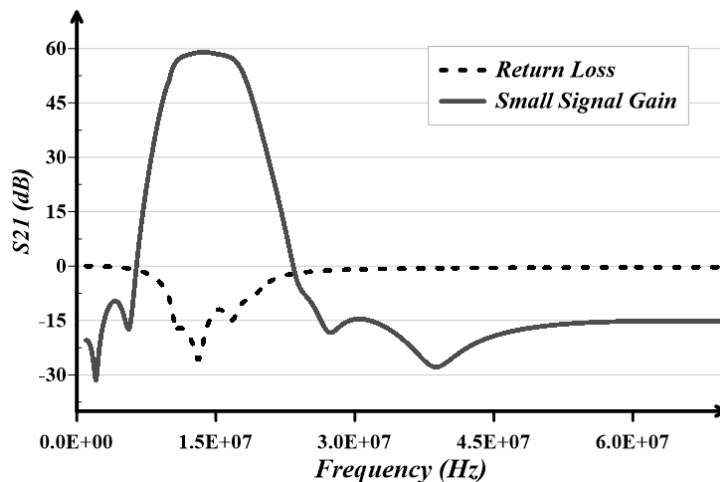
شکل ۵. پاسخ تلفات عبوری و توان برگشتی فیلتر میان‌گذر پیشنهادی در دو حالت استفاده از قطعات ایده‌آل و با استفاده از مدل اندازه‌گیری شده قطعات.

<sup>2</sup> Advanced Design System



شکل ۶. پاسخ تغییرات فاز فیلتر میان گذر پیشنهادی در دو حالت استفاده از قطعات ایده‌آل و با استفاده از مدل اندازه‌گیری شده قطعات.

تغییرات فاز فیلتر پیشنهادی بر حسب فرکانس، در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، تغییرات فاز بر حسب فرکانس در ناحیه عبور فیلتر کاملاً خطی و مطلوب می‌باشد. همچنین نتیجه بهره سیگنال کوچک کل فرستنده‌ی حالت جامد، در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، مجموع بهره‌ی سه طبقه‌ی تقویت کننده با المان‌های تضعیف کننده مسیر، حدود ۵۸ dB می‌باشد. در انتها نیز مقایسه‌ای بین مولد پیشنهادی با سایر مراجع آمده است، که نتایج آن در جدول ۱ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۷. توان برگشتی و بهره سیگنال کوچک مولد حالت جامد پیشنهادی.

جدول ۱- مقایسه مولد پیشنهادی حالت جامد با سایر تحقیقات مشابه.

سال	% راندمان	نوع	توان (Watt)	فرکانس (MHz)
۲۰۱۸	<۸۱	LDMOS	۷۵۰	۷۱
۲۰۱۵	<۵۸	LDMOS	۵۹۰	۱۰۰
۲۰۲۳	<۷۴	LDMOS	۶۰۰	۱۳/۵۶

این پژوهش

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک فیلتر میان گذر برای حذف هارمونیک‌های مزاحم در یک مولد ترانزیستوری حالت جامد با فرکانس  $13.56 \text{ MHz}$  ارائه شده است. ترانزیستور اصلی مبتنی بر تکنولوژی LDMOS بوده و قادر است تا حدود  $600 \text{ W}$  توان را تا باند فرکانسی  $600 \text{ MHz}$  وارد محفظه چشمه یونی کند. از آنجایی که نوسان‌ساز کنترل شونده با ولتاژ، که نقش اصلی تولید سیگنال توان پایین را دارد، هارمونیک‌های بزرگی دارد، یک فیلتر میان گذر مرتبه هفتم، با قابلیت تضعیف بالای باند ممنوعه در این مقاله طراحی شده است. شبیه‌سازی‌ها هم با مدل ایده‌آل قطعات و هم به کمک داده‌های اندازه‌گیری شده، انجام شده است تا اثر غیر ایده‌آل بودن سلف‌ها و خازن‌ها در فرکانس بالا لحاظ گردد.

## ۶. مراجع

- [1] J. Rahighi *et al.*, "Construction of Electrostatic Accelerator with a Maximum Energy of 200keV," *Journal of Nuclear Science and Technology (JonSat)*, vol. 34, no. 1, pp. 81–87, May 2013, Accessed: Jan. 14, 2023. [Online]. Available: [https://jonsat.nstri.ir/article\\_354.html](https://jonsat.nstri.ir/article_354.html)
- [2] M. Ali Belaïd, A. Almusallam, and M. Masmoudi, "RF performance reliability of power N-LDMOS under pulsed-RF aging life test in radar application S-band," *IET Circuits, Devices & Systems*, vol. 14, no. 6, pp. 805–810, Sep. 2020, doi: 10.1049/iet-cds.2019.0552.
- [3] L. Latrasse, M. Radoiu, T. Nelis, and O. Antonin, "Self-matching plasma sources using 2.45 GHz solid-state generators: microwave design and operating performance," *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, vol. 51, no. 4, pp. 237–258, Oct. 2017, doi: 10.1080/08327823.2017.1388338.
- [4] A. al Bastami, A. Jurkov, D. Otten, D. T. Nguyen, A. Radomski, and D. J. Perreault, "A 1.5 kW radio-frequency tunable matching network based on phase-switched impedance modulation," *IEEE Open Journal of Power Electronics*, vol. 1, pp. 124–138, 2020, doi: 10.1109/OJPEL.2020.2987782.
- [5] H. Rahimpour, H. Mirzaei, M. Yarmohammadi Satri, and Z. Riazi Mobaraki, "Design and simulation of an S-Band tunable solid-state power amplifier as an RF injector into a miniature ECR ion source," *Radiation Physics and Engineering*, vol. 3, no. 4, pp. 1–5, Oct. 2022, doi: 10.22034/RPE.2022.336199.1069.
- [6] H. Rahimpour, H. Mirzaei, and M. Yarmohammadi Satri, "Analysis and design of a 2.45 GHz RF power source for a miniature electron cyclotron resonance ion source," *Radiation Physics and Engineering*, vol. 3, no. 3, pp. 7–15, Jul. 2022, doi: 10.22034/RPE.2022.334260.1058.
- [7] H. Azizi, M. Dehghan, F. A. Davani, and F. Ghasemi, "Design, construction and test of RF solid state power amplifier for IRANCYC-10," *Journal of Instrumentation*, vol. 13, no. 03, p. P03007, Mar. 2018, doi: 10.1088/1748-0221/13/03/P03007.
- [8] D. Johansson and J. Fredriksson, "1 kW Solid-State Power Amplifier at 100 MHz for Use in Cyclotron," 2015.