

طراحی مولد فرکانس رادیویی به روش Single ended برای شتابدهنده IRANCYC-10

فاطمه باباگلی^۱، حسین آفریده^۱، فرشاد قاسمی^۲، محسن دهقان^۳

۱. کاربرد پرتوها، فیزیک و مهندسی انرژی، امیرکبیر، تهران - ایران

۲. شتابگرها، سازمان انرژی اتمی، تهران - ایران

۳. کاربرد پرتوها، مهندسی هسته ای، شهید بهشتی، تهران - ایران

چکیده :

در این مقاله، طراحی و شبیه سازی تقویت کننده ی توان برای راه اندازی شتابدهنده سیکلوترون IRANCYC-10 ارائه شده است. با ترکیب سه ماژول از این تقویت کننده می توان به توان ۲.۵ کیلووات برای راه اندازی تقویت کننده توان اصلی رسید. طراحی با پیکربندی Single-ended در فرکانس ۷۱ MHz موج پیوسته و همچنین با توان خروجی ۱ kW انجام شده است. هدف از انتخاب این نوع طراحی، سادگی در ساخت بدون نیاز به بالون، دارا بودن وزن پایین برای ساخت در توان های بالا، مناسب برای تولید انبوه برای ایجاد ایستگاه ۱۵ kW و همچنین مقرون به صرفه بودن می باشد. بهره و بازدهی این تقویت کننده به ترتیب ۲۱.۲۱ و ۷۴٪ است. در این مقاله انواع تحلیل ها از جمله تحلیل پایداری، تحلیل Load-pull و... ارائه شده است. همچنین روش هایی برای کاهش سایز تقویت کننده پیشنهاد شده است. با اعمال این روش ها اندازه این ماژول از ۸۰ * ۲۰ سانتی متر به ۳۰ * ۱۵ سانتی متر کاهش پیدا کرده است.

کلیدواژه‌ها : تقویت کننده توان، حالت جامد، سیکلوترون، شتابدهنده، Single-ended.

Single ended radio frequency generator design for IRANCYC-10 accelerator

Fatemeh Babagoli¹, Hossein Afrideh¹, Farshad Ghasemi², Mohsen Dehghan³

1. Application of Radiations, Physics and Energy Engineering, Amirkabir University, Tehran-Iran
2. Accelerators, Atomic Energy Organization, Tehran-Iran
3. Application of Radiations, Nuclear Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran-Iran

Abstract:

In this paper, the design and simulation of a high power amplifier to provide the required power of a cyclotron accelerator (IRANCYC-10) is presented step-by-step. By combining three modules of this amplifier, a power of 2.5 kW can be achieved to start the main power amplifier. The single ended designed amplifier can generate 1 kW the operating frequency of 71MHz continuous wave (CW). The purpose of choosing this type of design is simplicity to build without the need for a balun, low weight to build at high power, as well as cost-effectiveness. The gain and PAE of the SSPA are 21.21 and 74%, respectively. There are also ways to reduce the size of the amplifier.

Keywords: Power amplifier, solid state, cyclotron, accelerator, single-ended.¹

۱. مقدمه:

شوری عالی علوم، فناوری و تحقیقات ایران برنامه‌هایی برای طراحی و ساخت یک شتابدهنده سیکلوترون^۱ 10 MeV ، برای تولید رادیونوکلئیدهای مورد استفاده در اسکن توموگرافی انتشار پوزیترون^۲ دارد. در این متن شرح بخشی از اجزاء این شتابدهنده ارائه شده است.

سیستم فرکانس رادیویی این شتابدهنده از سه بخش تشکیل شده است: RF سطح پایین^۳، تقویت کننده میانی و تقویت کننده اصلی. از لامپ تراپود به عنوان تقویت کننده توان اصلی برای استفاده در کاواک و همچنین افزایش ولتاژ Dee ها تا 40 kV برای ایجاد میدان الکتریکی استفاده می‌شود [۱].

ترانزیستورهای RF توان بالا با پیشرفت تکنولوژی به عنوان جایگزین مناسبی برای این لامپ‌ها پیشنهاد داده شده‌اند. به کارگیری تقویت کننده‌های توان جامد عملکرد بهتر، اطمینان بالاتر، هزینه تعمیر و نگهداری پایینتر، مصرف برق کمتر، عمر طولانی‌تر و همچنین هزینه لوازم یدکی کمتری را ایجاد می‌کند. بنابراین انگیزه‌ی قوی برای این جایگزینی است.

تقویت کننده‌های توان با پیکربندی Push-Pull برای تقویت توان‌های بالا به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. مزیت اصلی استفاده از این پیکربندی باعث کاهش Lead effect و همچنین تطبیق آسان در ورودی و خروجی است. با این حال تعادل بین شاخه‌های بالون‌ها چالش بزرگی است، زیرا هر گونه عدم تعادل به ترانزیستور بر می‌گردد.

از آنجاییکه برای تامین سطح توان شتابدهنده سیکلوترون باید از چندین ماژول به صورت حالت جامد استفاده کرد، استفاده از این نوع پیکربندی مناسب نیست. به همین دلیل پیکربندی single-ended پیشنهاد داده شد. از مزایای استفاده از این نوع پیکربندی می‌توان به طراحی بدون نیاز به بالون، مناسب برای تولید انبوه برای ایجاد ایستگاه‌های 400 kW و یک طرح اقتصادی اشاره کرد [۲].

به لطف انتخاب ترانزیستورهای توان بالا و حذف هارمونیک‌ها می‌توان توان خروجی در سطح کیلووات با عملکرد برتر در کارایی ارائه داد. پیشرفته‌ترین ترانزیستورها در این فناوری LDMOS ها هستند که از این تقویت کننده‌ها در SOLEIL [۳] و ESRF [۴] در توان‌های 190 kW و 150 kW در فرکانس 352 MHz استفاده شده است.

همچنین از این پیکربندی در ESS LINAC [۸] با توان خروجی 1250 وات در حالت پالسی با بازدهی 71% و موج پیوسته با بازدهی 61% برای رسیدن به توان 400 kW در فرکانس 352 MHz استفاده شده است.

این نوع از ترانزیستور و پیکربندی در دانشگاه Uppsala [۹] در فرکانس 100 MHz برای راه‌اندازی شتابدهنده سیکلوترون استفاده شده است. در آن پایان‌نامه به دلیل افزایش اندازه ماژول در این محدوده فرکانسی به جای استفاده از زیرلایه‌هایی با ثابت دی‌الکتریک ۳ از زیرلایه‌های با ثابت دی‌الکتریک ۹ استفاده شده است. در این مقاله برای کاهش هزینه‌ها و همچنین استفاده از زیرلایه‌های موجود در کشور از زیرلایه FR4 با ثابت دی‌الکتریک 4.5 و استفاده از ترانسفورمر برای کاهش اندازه ماژول و همچنین افزایش پهنای باند فرکانسی، پیشنهاد و استفاده شده است.

هدف از این مقاله طراحی یک ماژول SSPA^۴ با توان خروجی 1 kW با حداکثر کارایی در اندازه مناسب و همچنین مقرون به صرفه، برای استفاده در توان‌های بالاتر می‌باشد. فرکانس کاری این شتابدهنده 71 MHz ، برای تشدید کاواک سیکلوترون در نظر گرفته شده است. ^۲

۲. روش انجام کار :

شتابدهنده IRANCYC-10 یک سیکلوترون AVF با حداکثر انرژی باریکه 10 MeV است. پارامترهای مشخصه این سیکلوترون در جدول ۱ داده شده است [۱].

۱. IRANCYC-10

۲. PET

۳. Low Level RF

۴. solid state power amplifier

جدول ۱: پارامترهای مشخصه ی شتابدهنده سیکلوترون IRANCYC-10

پارامتر	مقدار
ماکزیم انرژی	۱۰ MeV
نوع باریکه	H ⁻
میدان مرکزی	۱.۱۸ T
ماکزیم میدان مغناطیسی	۱.۸۵ T
فرکانس کاری	۷۱ MHz
منبع یون	PIG type
ماکزیم جریان باریکه	۱۰۰ μA
توان خروجی	۱۵ kW

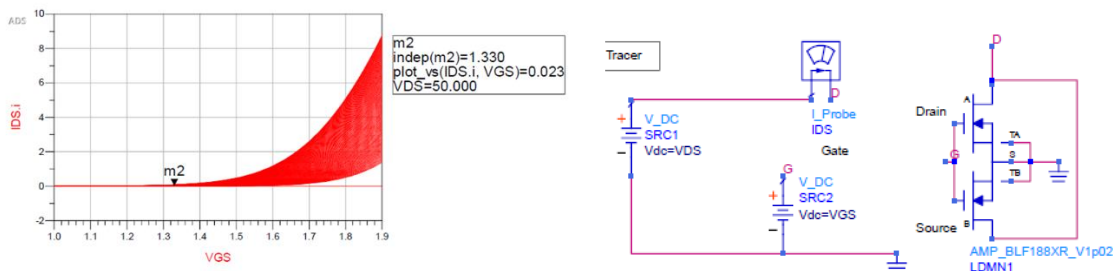
برای شتابدهی به ذرات هیدروژن منفی در Dee حداقل ۱۱ kW توان RF لازم است ولی برای ایجاد فاکتور پایداری باریکه این توان باید در حدود ۱۵ kW باشد. سیگنالی با توان کمتر از ۱ وات در LLRF تولید می شود و پیش تقویت کننده را تغذیه می کند، تا توان را ۳۰ وات افزایش دهد. در قسمت تقویت کننده میانی با ترکیب چهار ماژول تقویت کننده ۷۵۰ وات، توان ۲.۵ کیلو وات برای تغذیه تقویت کننده توان اصلی ایجاد می شود. این تقویت کننده از نوع لامپ تراپود 3CW20000A7 است.

۱.۲. طراحی تقویت کننده ۱ kW :

ترانزیستور بر اساس رنج فرکانسی و توان خروجی تقویت کننده انتخاب می شود. ترانزیستور انتخابی ۲۰ درصد بیشتر از توان خروجی تقویت کننده است. در این صورت عمر ترانزیستور افزایش میابد. ترانزیستور BLF188XR از نوع ترانزیستور های توان LDMOS است که برای کاربردهای علمی و صنعتی و پزشکی در رنج فرکانسی HF تا ۶۰۰ MHz مورد استفاده قرار میگیرد. ماکزیمم توان خروجی این ترانزیستور ۱۴۰۰ وات است. این ترانزیستور کارایی بالا و پایداری حرارتی خوبی دارد [۷].

۲.۲. تحلیل DC :

یک تحلیل DC برای بهبود تنظیم بایاس ترانزیستور توسط نرم افزار ADS انجام شده است [۵]. مقدار V_{DS} ، ۵۰ ولت و V_{GS} بین ۱ تا ۲ ولت قابل تغییر است. نتیجه شبیه سازی در شکل ۱ نشان داده شده است. نمودار جریان درین بر حسب ولتاژ گیت هم قابل مشاهده است.



شکل ۱: شماتیک تحلیل DC و نمودار جریان درین بر حسب ولتاژ گیت

معمولا کلاس های B و AB برای ناحیه عملکردی ترانزیستور انتخاب می شود. بنابراین ولتاژ گیت باید به مقدار ولتاژ آستانه برسد. که بین ۱.۲۵ تا ۲.۲۵ طبق دیتا شیت است. ولتاژ گیت انتخابی ۱.۹ ولت انتخاب شده است.

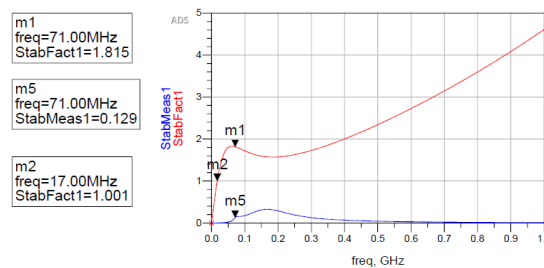
۳.۲. تحلیل پایداری :

اگر امپدانس ورودی یا خروجی دارای یک قسمت واقعی منفی باشد، تقویت کننده دچار نوسان می شود. فاکتورها K و Δ دو فاکتور مهم برای نشان دادن ثبات ترانزیستور هستند [۶]. از معادلات ۱ و ۲ برای تحلیل این فاکتورها استفاده شده است.

$$K = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |\Delta|^2}{2|S_{12}S_{21}|} \geq 1 \quad (1)$$

$$|\Delta| = |S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}| \ll 1 \quad (2)$$

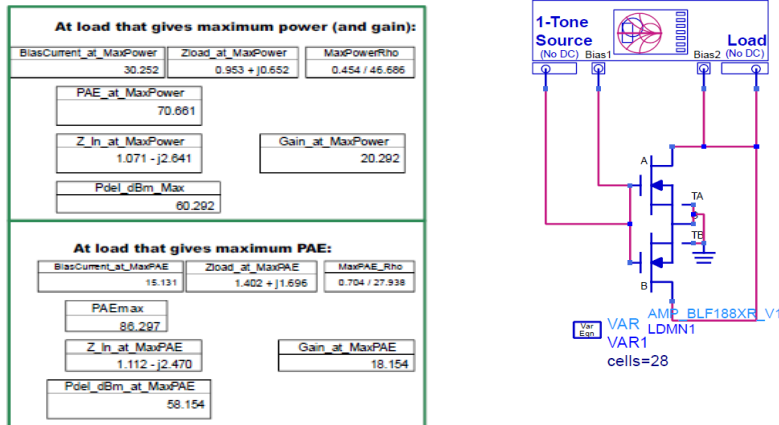
اگر به طور همزمان دو شرط بالا برقرار باشد، سیستم بدون قید و شرط پایدار است. در شکل ۲ شرایط فوق برای فرکانس ۷۱ MHz فراهم شده است. شرایط پایداری در طول طراحی می تواند با تغییر شرایط عملکردی ترانزیستور متفاوت باشد.



شکل ۲: نمودار شرایط پایداری ترانزیستور

۴.۲. تحلیل Load Pull:

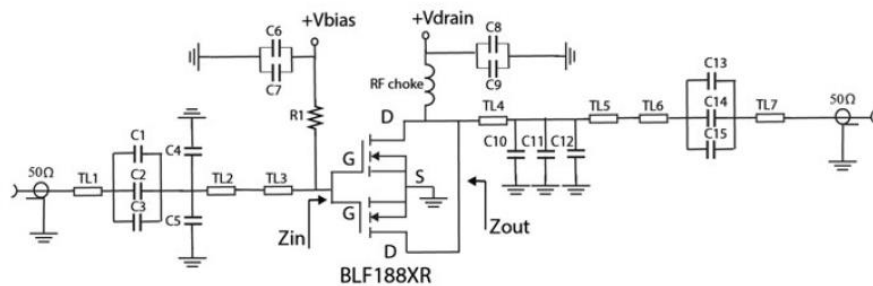
یک روش برای مشخص کردن رفتار سیگنال بزرگ ترانزیستور، استفاده از خطوط توان خروجی در نمودار اسمیت به عنوان تابعی از ضریب بازتاب بار است. به این روش load-pull گفته می شود. برای بدست آوردن امپدانس بهینه در خروجی ترانزیستور، مقدار این شبیه سازی تغییر می کند. در نتیجه این تجزیه و تحلیل، امپدانس های مختلف با در نظر گرفتن اولویت طراحی (حداکثر کارایی، بهترین بهره) بدست آمده و مقدار مناسب انتخاب می شود. تجزیه و تحلیل مشابه این تحلیل برای ورودی ترانزیستور می توان انجام داد، که source pull نامیده می شود [۶]. در این شبیه سازی توان ورودی ۳۹ dBm در نظر گرفته شده است. نتیجه شبیه سازی در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: تحلیل Load-Pull ترانزیستور

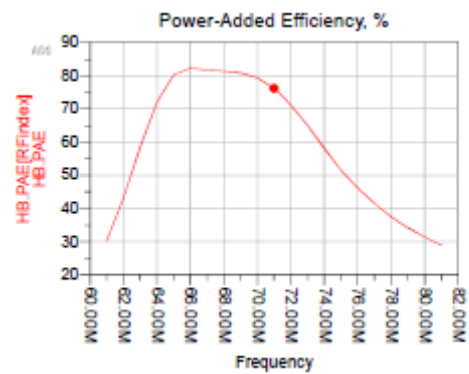
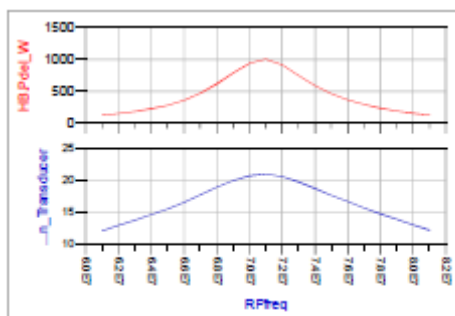
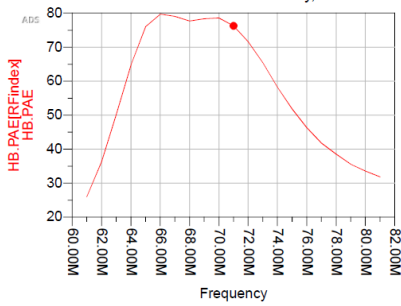
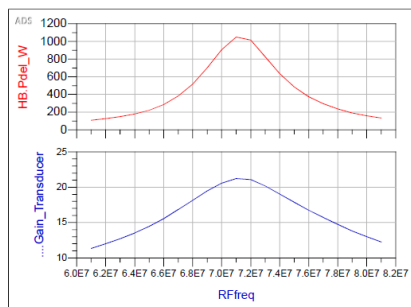
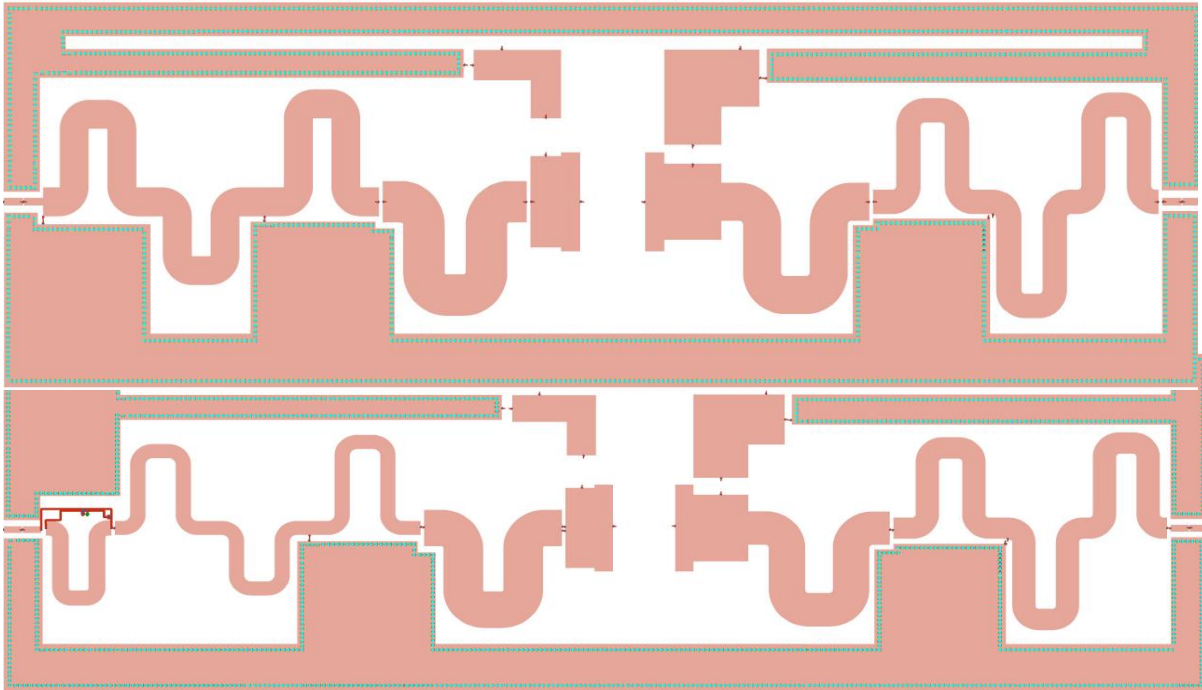
۵.۲. طراحی تقویت کننده Single ended

تقویت کننده های توان با پیکربندی Push-Pull برای تقویت توان های بالا به طور گسترده مورد استفاده قرار می گیرد. مزیت اصلی استفاده از این پیکربندی باعث کاهش اثرات سرب و همچنین تطبیق آسان در ورودی و خروجی است. با این حال تعادل بین شاخه های بالون ها چالش بزرگی است زیرا هر گونه عدم تعادل به ترانزیستور بر می گردد. از آنجاییکه برای تامین سطح توان شتابدهنده سیکلوترون باید از چندین ماژول به صورت حالت جامد استفاده کرد، استفاده از این نوع پیکربندی مناسب نیست [۲]. به همین دلیل پیکربندی single-ended پیشنهاد شده است. در شکل زیر نمونه ای از این پیکربندی قابل مشاهده است.



شکل ۴: نمونه ای پیکربندی single-ended

از مزایای استفاده از این نوع پیکربندی می توان به طراحی بدون نیاز به بالون، مناسب برای تولید انبوه برای ایجاد ایستگاه های ۴۰۰ kW و یک طرح اقتصادی اشاره کرد. در شکل ۵ طرح نهایی تقویت کننده توان برای شتابدهنده IRANCYC-10 نشان داده شده است. یکی از مهمترین مرحله طراحی این تقویت کننده، طراحی مدار های تطبیق امپدانس است که باعث افزایش نسبت سیگنال به نویز و همچنین انتقال حداکثر توان خروجی و اتلاف کم می شود [۱]. به دلیل استفاده از این پیکربندی و فرکانس کاری شتابدهنده اندازه مدار تطبیق بزرگ می شد. به همین دلیل دو رویکرد پیشنهاد داده شد. اول: استفاده از زیر لایه FR4 با ثابت دی الکتریک ۴.۵ و همچنین اضافه کردن المان های فشرده مثل سلف و خازن. دوم: استفاده از ترانسفورمر که تا حد بسیار زیادی باعث کاهش اندازه ماژول شده است. از نرم افزار ADS برای طراحی و شبیه سازی استفاده شده است.



شکل ۸: نتایج نهایی طراحی تقویت کننده توان ۱ kW با ترانسفورمر ورودی

۴. نتیجه گیری:

در این مقاله قسمتی از شبیه سازی و نتایج بخش مولد رادیوفرکانسی شتابدهنده سیکلوترون ارائه شده است. سیستم توان RF این شتابدهنده با پیاده سازی آخرین فن آوری و استراتژی کم مصرف با توان بالا ارائه شده است. در این مقاله راه حلی برای کاهش اندازه ماژول همراه با حداکثر توان و حداقل اتلاف ارائه شده است. حداکثر توان خروجی ۱ kW و بازدهی ۷۴ درصد و گین ۲۱.۲۱ اندازه گیری شده است. اندازه این ماژول ۳۰ * ۱۵ سانتی متر است. همچنین با استفاده از یک جمع کننده، می توان ۱۵ ماژول از این تقویت کننده را جمع کرد و به عنوان تقویت کننده توان اصلی ۱۵ kW و جایگزین لامپ تراپود قرار داد.

تشکر و قدردانی:

از مسئولین سازمان انرژی اتمی و همچنین جناب آقای مهندس عزیزی بابت همکاری و کمک های بی دریغشان تشکر و قدردانی می نمایم.

مراجع:

1. Azizi, H., Dehghan, M., Davani, F. A., & Ghasemi, F. (2018). Design, construction and test of RF solid state power amplifier for IRANCYC-10. *Journal of Instrumentation*, 13(03), P03007.
2. Hoang, L. (2019). *High Power Radio Frequency Solid-State Amplifiers and Combiners for Particle Accelerators: From module to system design approach* (Doctoral dissertation, Acta Universitatis Upsaliensis).
3. P. Marchand, T. Ruan, F. Ribeiro and R. Lopes, *High power 352 MHz solid state amplifiers developed at the Synchrotron SOLEIL*, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **10** (2007) 112001.
4. G. Gautier, J. Jacob, M.L. Langlois and J.M. Mercier, *352:2 MHz–150 kW Solid State Amplifiers at the ESRF*, in proceedings of the *2nd International Particle Accelerator Conference (IPAC 2011)*, San Sebastián, Spain, 4–9 September 2011, *Conf. Proc. C 110904* (2011) 71.
5. Keysight Technologies, *ADS: Advanced Design System webpage*, (2018) <http://www.keysight.com/en/pc-1297113/advanced-design-system-ads>.
6. D.M. Pozar, *Microwave Engineering*, John Wiley & Sons (2012).
7. <https://www.ampleon.com/search.html?q=blf188xr>
8. Haapala, L., Eriksson, A., Duc, L. H., & Dancila, D. (2016). Kilowatt-level power amplifier in a single-ended architecture at 352 MHz. *Electronics Letters*, 52(18), 1552-1554.
9. Johansson, D., & Fredriksson, J. (2015). 1 kW Solid-State Power Amplifier at 100 MHz for Use in Cyclotron.