



طراحی کاواک و کوپلر گرادیان بالا در باند S

سیدعبدالمهدی آقاییان^۱، سیدفرهاد مسعودی^{۱*}، سیدحامد شاکر^۲، فرشاد قاسمی^۳

۱. گروه فیزیک هسته‌ای، دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، صندوق پستی: ۱۵۸۷۵-۴۴۱۶، تهران، ایران

۲. چشمه نور کانادا، ساسکاتون - کانادا

۳. پژوهشکده فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۱۵۵-۱۳۳۹، تهران - ایران

*Email: masoudi@kntu.ac.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۹/۱۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۱۱/۱۵

چکیده

مطالعات شتاب‌دهنده خطی گرادیان بالا از جمله زمینه‌های جدید حوزه شتاب‌دهنده‌ها می‌باشد. مهم‌ترین عامل محدودکننده گرادیان میدان الکتریکی در شتاب‌دهنده‌های خطی، پدیده شکست رادیو فرکانسی است. مطالعات گسترده‌ای که در خصوص تأثیر جنس و روش ساخت کاواک‌ها بر گرادیان قابل‌دستیابی انجام شده، نشان می‌دهند که کاواک‌های ساخته شده از مس سخت، که عملیات حرارتی بر روی آن صورت نگرفته است، در میدان‌های بالا رفتار بهتری از لحاظ نرخ شکست رادیوفرکانسی از خود نشان می‌دهند. استفاده از روش بریزینگ، به‌عنوان متداول‌ترین روش در ساخت کاواک، مستلزم استفاده از کوره‌های دمای بالا است که موجب نرم شدن ساختار مس می‌شود. از این‌رو به کارگیری روش‌های non-brazing در ساخت کاواک‌های گرادیان بالا مورد توجه قرار گرفته است. بر اساس تجربه موفق استفاده از روش انقباضی در ساخت کاواک‌های پروژه شتاب‌دهنده خطی در پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، در پژوهش حاضر استفاده از این روش در طراحی و ساخت کاواک‌های باند S گرادیان بالا پیشنهاد شده است که با جلب همکاری بین‌المللی دنبال خواهد شد. طراحی رادیوفرکانسی کاواک، بررسی جزیی محدودیت شکست رادیوفرکانسی در آن و طراحی کوپلر در این کار انجام شده است. از جمله نتایج به‌دست آمده می‌توان به طراحی شکل و ابعاد مناسب کاواک و کوپلر با هدف افزایش حداکثری گرادیان میدان و دستیابی به میدان 138 MV/m و نرخ شکست رادیوفرکانسی کمتر از 10^{-6} bpp/m در توان ورودی 8 MW و پارامتر S_{11} برابر -60 dB برای کوپلر اشاره نمود.

کلیدواژه‌ها: شتاب‌دهنده خطی، گرادیان بالا، نرخ شکست رادیوفرکانسی، میدان سطحی، پارامتر S_{11}

Design of high gradient S-band cavity and coupler

S.M. Aghayan¹, S.F. Masoudi^{1*}, S.H. Shaker², F. Ghasemi³

1. Department of Physics, K.N Toosi University of Technology, P.O.Box: 15875-4416, Tehran – Iran

2. Canadian Light Source Inc. (CLS), Saskatoon - Canada

3. Physics and Accelerator Research School, Nuclear Sciences and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 14155-1339, Tehran – Iran

Research Article

Received 3.12.2020, Accepted 3.2.2021

Abstract

Studies on high gradient linear accelerators are among the new areas in the field of accelerators. The most important factor that limits the electric field gradient in linear accelerators is the radio frequency breakdown. Many studies have been conducted on the effect of the material and manufacturing method of cavities on the achievable gradient, which shows that rigid structures fabricated without high-temperature processes achieve better performance in high gradient field regarding radio frequency breakdown rate. Employing the brazing method, as the most common method for construction of cavities, requires the use of high-temperature furnaces, which causes softening of the copper. Therefore, using non-brazing methods to construct high gradient cavities has been considered. Based on the experiences gained in the national electron linear accelerator project at the institute for research in fundamental science (IPM) and the shrinking fit method used to fabricate and assemble its acceleration cavities, the design and construction of high gradient S-band cavities are in progress with international cooperation. Radiofrequency design of cavity with vacuum breakdown consideration and coupler design are discussed. Achieving the appropriate shape and dimensions of the cavity and coupler for maximizing the axial electric field (134 MV/m) with a breakdown rate of less than 10^{-6} bpp/m at 8 MW input power and S_{11} parameter -60 dB for the coupler are the results of this article.

Keywords: Linear accelerator, High gradient, Breakdown rate, Surface field, S_{11} parameter



۱. مقدمه

شتاب‌دهنده خطی الکترون پرتعدادترین شتاب‌دهنده دنیا به‌شمار می‌آید که در زمینه‌های مختلف شامل پرتودرمانی، پرتودهی صنعتی مواد، تصویربرداری محموله‌های بزرگ در گمرک، تزریق‌گر شتاب‌دهنده‌های پرنرژی و پژوهش‌های فیزیک ذرات بنیادی به‌کار می‌رود. اساس عملکرد و اجزاء شتاب‌دهنده‌های خطی الکترون در کاربردهای مختلف یکسان است. مطابق با نیاز هر کاربرد، تفاوت آن‌ها تنها در انرژی، جریان و مشخصات دیگر باریکه خروجی است. کاهش قیمت و اندازه این شتاب‌دهنده‌ها همواره جزء اولویت‌های دانشمندان و مهندسان شتاب‌دهنده بوده و نقش اساسی در گسترش این تکنولوژی در کاربردهای گوناگون دارد [۱]. از جمله راهبردهای مؤثر در کاهش اندازه شتاب‌دهنده، دستیابی به گرادیان‌های بالای میدان شتاب‌دهی در کاواک رادیوفرکانسی است. برای رسیدن به انرژی معین، گرادیان میدان الکتریکی طول شتاب‌دهنده خطی را مشخص می‌کند. دستیابی به فن‌آوری ساخت شتاب‌دهنده‌های گرادیان بالا با قابلیت اطمینان و دوام کاری مطلوب، گام مهمی در جهت کوچک‌سازی و گسترش شتاب‌دهنده‌ها خواهد بود. در سال‌های اخیر، گروه‌های پژوهشی زیادی در دنیا در زمینه طراحی و دستیابی به فن‌آوری‌های ساخت شتاب‌دهنده‌های گرادیان بالا فعالیت دارند و این زمینه هم‌اکنون جزو موضوعات به‌روز و جذاب برای پژوهش‌گران به‌شمار می‌رود [۲-۵]. تاکنون مطالعات گسترده‌ای درخصوص تأثیر جنس و روش ساخت کاواک‌ها بر گرادیان قابل دستیابی انجام شده است که نشان می‌دهد مس سخت به‌واسطه آرایش ساختاری آن، در میدان‌های بالا رفتار بهتری نسبت به مس نرم از خود نشان می‌دهد [۱، ۶-۸]. روش لحیم‌کاری در خلأ^۱ به‌عنوان متداول‌ترین روش برای ساخت کاواک، مستلزم استفاده از کوره‌های دمای بالا (در حد 1000°C) می‌باشد. گرم کردن مس در این دماها موجب نرم شدن ساختار آن می‌شود. از این‌رو هم‌اکنون به کارگیری روش‌های non-brazing مانند استفاده از پیچ و مهره و استفاده از جوش باریکه الکترون، در ساخت کاواک‌های گرادیان بالا مورد توجه قرار گرفته است.

در مؤسسه ملی پژوهش‌های فیزیک هسته‌ای (INFN^2) ایتالیا با استفاده از روش پیچ و مهره، فوتوگان گرادیان بالا در باند S با موفقیت ساخته و آزمایش شده است. گرادیان 120 MV/m در طول پالس $1/5\text{ }\mu\text{s}$ و نرخ تکرار 100 Hz برای

این تفنگ به‌دست آمده است [۹، ۱۰]. در آزمایشگاه SLAC آمریکا کاواک‌های گرادیان بالا در باند X با روش‌های مختلف از جمله پیچ و مهره و جوش الکترون ساخته و آزمایش شده است. در این آزمایشگاه، که تاکنون بیش از ۵۰ نوع کاواک مختلف طراحی شده و با جنس‌ها و روش‌های ساخت متفاوت مورد ارزیابی قرار گرفته، بیشینه گرادیان 200 MV/m گزارش شده است [۱۱-۱۳]. از جمله مهم‌ترین تیم‌های پژوهشی دیگر در زمینه تحقیق و توسعه کاواک‌های گرادیان بالا مربوط به پروژه CLIC در سازمان اروپایی پژوهش‌های هسته‌ای^۳ است. این پروژه با مشارکت بیش از ۳۰ کشور جهان در حال طراحی است و قرار است در کنار برخورد دهنده بزرگ هادرونی در مرز سوئیس و فرانسه احداث شود. این طرح در واقع یک شتاب‌دهنده خطی بزرگ به طول 50 km است که الکترون و پوزیترون را با انرژی 3 TeV به‌منظور مطالعات فیزیک ذرات به هم برخورد می‌دهد و در آن ساختارهای شتاب‌دهی گرادیان بالا با گرادیان 100 MV/m در نظر گرفته شده است [۱۴]. این در حالی است که بیش‌ترین گرادیان شتاب‌دهی در شتاب‌دهنده‌های معمول در حدود 10 تا 20 MV/m می‌باشد. از سوی دیگر، پروژه طراحی و ساخت شتاب‌دهنده خطی الکترون در پژوهشگاه دانش‌های بنیادی^۴ اولین تجربه گزارش شده در زمینه طراحی و ساخت کاواک‌های شتاب‌دهی در ایران است [۱۵-۱۷]. در ساخت کاواک‌های باند S شتاب‌دهنده خطی الکترون پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، از روش انقباضی استفاده شده که برخلاف روش لحیم‌کاری در خلأ، در دمای پایین صورت گرفته که در طی آن مس سخت می‌ماند و از این‌رو مقاومت آن مقابل میدان‌های سطحی بالا بیش‌تر خواهد بود. از طرفی سادگی روش ساخت این کاواک‌ها موجب کاهش هزینه در تولید آن‌ها در مقایسه با سایر روش‌ها از جمله لحیم‌کاری در خلأ شده است. گزارش نحوه ساخت کاواک‌های این شتاب‌دهنده به روش انقباضی، توجه به‌کارگیری این روش در طراحی و ساخت کاواک‌های گرادیان بالا را به خود جلب کرده است [۱۸، ۱۹]. در حال حاضر با توجه به ایجاد تفاهم همکاری با آزمایشگاه آزمون توان بالای پروژه CLIC، پروژه‌ای برای بررسی ساخت کاواک‌های گرادیان بالا در باند S به روش انقباضی تعریف شده است.

در مقاله حاضر، طراحی رادیوفرکانسی کاواک‌های موردنظر با رویکرد ساخت به روش انقباضی در راستای این پروژه ارایه شده

3. CERN

4. Institute for Research in Fundamental Science (IPM)
Journal of Nuclear Science and Technology

Vol. 99, No 2, 2022, P 67-75

1. Brazing

2. National Institute for Nuclear Physics



شکل‌های مختلف توزیع میدان در موج‌برها را به‌دنبال خواهد داشت. مد TM_{01} به‌عنوان مد کاربردی در شتاب‌دهنده‌های خطی الکترون به‌کار می‌رود. روابط توزیع میدان برای این مد در مراجع مختلف تشریح شده است [۲۱، ۲۲]. مهم‌ترین مؤلفه شتاب‌دهی به الکترون در این مد، مؤلفه میدان در راستای طولی است که چنان‌چه با E_z نمایش داده شود، رابطه ۱ اندازه آن را نشان می‌دهد.

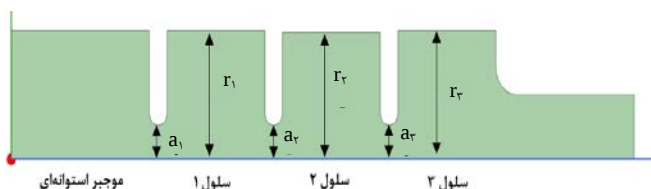
$$E_z = E_0 J_0(k_r r) \cos(\omega t) \quad (1)$$

در این رابطه J_0 تابع بسل مرتبه صفر، Z راستای انتشار موج، k_r عدد موج و E_0 اندازه میدان است [۲۱].

برای تأمین شرایط مرزی در یک کاواک ساده استوانه‌ای لازم است مؤلفه میدان E_z در سطح استوانه صفر باشد. برای این منظور $J_0(k_r r) = 0$ لحاظ می‌شود. با توجه به ویژگی تابع بسل مرتبه صفر، ریشه‌های مشخص و محدودی برای تأمین این شرط وجود خواهد داشت که با اعمال اولین ریشه برابر $x = 2.405$ می‌توان آن را تأمین کرد. در این صورت لازم است $k_r r = 2.405$ در نظر گرفته شود. با اعمال رابطه $k_r = \frac{2\pi}{\lambda_r}$ خواهیم داشت:

$$r_{cavity} = 2.405 \frac{\lambda_r}{2\pi} \quad (2)$$

مهم‌ترین پارامتر در محاسبه کاواک موردنظر نیز مقدار شعاع آن است که از طریق مقدار و لحاظ کردن طول موج مولد رادیوفرکانسی، مقدار تقریبی آن به‌دست می‌آید. البته ابعاد دیگر نیز بر پارامترهای کاواک مؤثر است که در شبیه‌سازی‌ها لحاظ خواهد شد. شکل ۱ نمایی از کاواک و پارامترهای اصلی آن را نشان می‌دهد که شامل ۳ سلول با شعاع روزنه‌های a_1 تا a_3 و شعاع‌های r_1 تا r_3 می‌باشد. شبیه‌سازی کاواک‌ها در نرم‌افزار تحلیل الکترومغناطیس Ansys HFSS صورت گرفته است.



شکل ۱. نمایی از کاواک موردنظر و پارامترهای اصلی آن.

است. هم‌چون سایر پژوهش‌های به‌روز انجام شده [۷، ۱۳]، ساختار کاواک طراحی شده متشکل از سه سلول است که تلاش شده با تمرکز توان بر روی سلول مرکزی، به بیشینه میدان محوری دست یافته شود. پس از ارایه جزئی روند طراحی کاواک، طراحی کوپلر مناسب برای انجام آزمون‌های گرادیان بالا ارایه شده است. با توجه به توان بالای مورد استفاده در آزمون کاواک، تزریق متقارن توان و کمینه کردن توان بازگشتی از ویژگی‌های کوپلر موردنظر می‌باشد.

۲. طراحی رادیوفرکانسی

در SLAC، به‌جای ساخت یک ساختار کامل شتاب‌دهنده به‌منظور آزمون‌های گرادیان بالا، مجموعه‌ای کوچک متشکل از سه سلول و یک کوپلر در باند X طراحی شده است؛ استفاده از این ایده، هزینه ساخت و آزمون‌ها را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش داده است [۱]. طراحی کاواک موج ایستا در مد π به‌گونه‌ای صورت می‌گیرد که میدان محوری در سلول وسط دو برابر میدان سلول‌های جانبی باشد. بدین‌ترتیب توان تزریق شده به سیستم بیش‌تر در سلول وسط متمرکز شده و مطالعات گرادیان بالا در این سلول صورت می‌پذیرد. طراحی کوپلر در این مرکز به‌نحوی است که امکان آزمایش کاواک‌های مختلف ساخته شده با یک کوپلر وجود دارد؛ به این‌ترتیب که کوپلر با استفاده از فلنج استوانه‌ای تعبیه شده به کاواک‌ها متصل شده [۲۰] و از این‌رو هزینه انجام آزمون‌های گرادیان بالا کاهش می‌یابد. این کوپلر شامل موجبر مستطیلی WR۹۰ می‌باشد که به‌طور متقارن از دو طرف به یک موجبر استوانه‌ای متصل می‌گردد.

در این پژوهش حاضر با الهام از روش به‌کار رفته در SLAC برای باند X، طراحی رادیوفرکانسی کاواک‌های گرادیان بالا و کوپلر مناسب در باند S انجام شده است که در ادامه به آن پرداخته می‌شود. تأکید می‌شود که طراحی جدید ارایه شده به لحاظ امکان‌پذیری ساخت، به روش انقباضی است که ملاحظات مهم و جزئی خود را می‌طلبد.

۱.۲ طراحی کاواک باند S

کاواک موردنظر متشکل از یک موجبر استوانه‌ای بارگذاری شده به‌وسیله سه دیسک می‌باشد که از یک طرف موج RF به‌وسیله اتصال کوپلر به آن تزریق می‌شود و طرف دیگر محل اتصال خلأ است. مبنای محاسبات اولیه برای ابعاد کاواک‌های شتاب‌دهنده‌های خطی بر اساس حل معادلات ماکسول در موج‌برهای استوانه‌ای به‌دست می‌آید. حل این معادلات



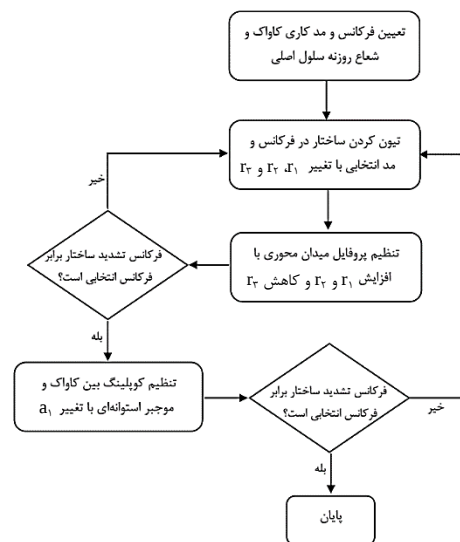
سلول‌های اطراف آن بوده و بیشینه میدان محوری 137 MV/m است. همچنین بیشینه میدان الکتریکی سطحی بر روی لبه دیسک‌های سلول میانی تشکیل می‌شود که معادل 174 MV/m می‌باشد. در شکل ۳ ج، نمودار پارامتر S_{11} گزارش شده است که نشان‌دهنده قله -29 dB در فرکانس تشدید 2998.5 MHz می‌باشد.

به‌منظور اطمینان از نتایج حاصل از نرم‌افزار HFSS، هندسه نهایی کاواک شبیه‌سازی شده در این نرم‌افزار استخراج شده و برای شبیه‌سازی مجدد وارد محیط نرم‌افزار تحلیل الکترومغناطیسی CST شد. شبیه‌سازی در محیط Eigen Mode صورت گرفت و فرکانس تشدید و پروفایل میدان الکتریکی در مد π به‌دست آمد که در شکل ۴ نمایش داده شده است. از آن‌جا که نتایج اندازه میدان الکتریکی در نرم‌افزار CST به انرژی ذخیره شده J_1 ۱ نرمالیزه می‌شود، برای مقایسه، میدان الکتریکی نرمالیزه شده شبیه‌سازی نرم‌افزار HFSS نیز ارایه شده است. همان‌طور که مشخص است، پروفایل میدان الکتریکی در دو نرم‌افزار HFSS و CST با هم تطابق دارند. فرکانس تشدید در CST برابر 2998.7 MHz می‌باشد که 0.2 MHz با نتیجه HFSS متفاوت است و در حد قابل‌قبولی قرار دارد.

۲.۲ بررسی محدودیت شکست رادیوفرکانسی

مهم‌ترین عامل فیزیکی که موجب محدودیت در افزایش گرادیان شتاب‌دهی در شتاب‌دهنده‌های خطی می‌شود، پدیده شکست رادیوفرکانسی^۲ در کاواک‌های شتاب‌دهی است. اندازه‌گیری تعداد و نرخ شکست^۳ در طول مرحله آماده‌سازی توانی یا کاندیشنینگ^۴ یکی از پارامترهای کلیدی در اندازه‌گیری‌های گرادیان بالا می‌باشد. نرخ تخلیه به‌صورت تعداد تخلیه به ازای هر پالس رادیو فرکانسی بر واحد طول ساختار یا نسبت تعداد پالس‌های همراه تخلیه به تعداد کل پالس‌ها تعریف می‌شود. به‌طور مثال این پارامتر برای ساختار شتاب‌دهی در پروژه کلیک در حدود 3×10^{-7} تخلیه به ازای هر پالس در واحد طول است. شکست RF پدیده‌ای پیچیده است که اثرات و سازوکار آن در زمینه‌های مختلف فیزیک کاربردی مانند فیزیک سطح، علم مواد، فیزیک پلاسما و الکترومغناطیس توضیح داده شده است. تاکنون هیچ تئوری کمی‌ای شکست RF در خلأ را به‌طور

مد مورد مطالعه در این ساختار به‌منظور متمرکز کردن توان در سلول میانی، مد π می‌باشد. همچنین با توجه به فرکانس منابع توانی پرکاربرد مانند مگنترون‌ها و تقویت‌کننده‌های کلاسترونی، فرکانس کاری کاواک 2998.5 MHz انتخاب شد که کلیه طراحی‌ها در این فرکانس انجام خواهد شد. در ابتدا با تغییر شعاع سلول‌ها، فرکانس مد موردنظر در 2998.5 MHz تنظیم می‌شود. سپس با افزایش r_1 و r_2 و کاهش r_3 تلاش می‌شود میدان الکتریکی محوری در سلول وسط تا ۲ برابر سلول‌های اطراف تنظیم شود. البته این تغییر شعاع سلول‌ها موجب تغییر فرکانس تشدید خواهد شد که نیاز به تیون مجدد خواهد بود. با تکرار این فرایند در نهایت پروفایل میدان فرکانس تشدید تیون خواهد شد. پس از تنظیم پروفایل میدان محوری، کوپلینگ بین موجر استوانه‌ای و کاواک به‌منظور به‌دست آوردن ضریب کوپلاژ $\beta=1$ باید تنظیم شود که این کار با تغییر شعاع روزنه سلول اول که coupling cell نامیده می‌شود، صورت می‌پذیرد. در نهایت، مجدداً تنظیم فرکانس تشدید با تغییر اندک شعاع سلول‌ها صورت می‌پذیرد؛ این تغییرات تأثیر ناچیزی در پروفایل میدان و ضریب کوپلاژ خواهد داشت. شکل ۲ روندنمای مراحل طراحی و تیون کاواک را نشان می‌دهد.



شکل ۲. روندنمای طراحی و تیون کاواک.

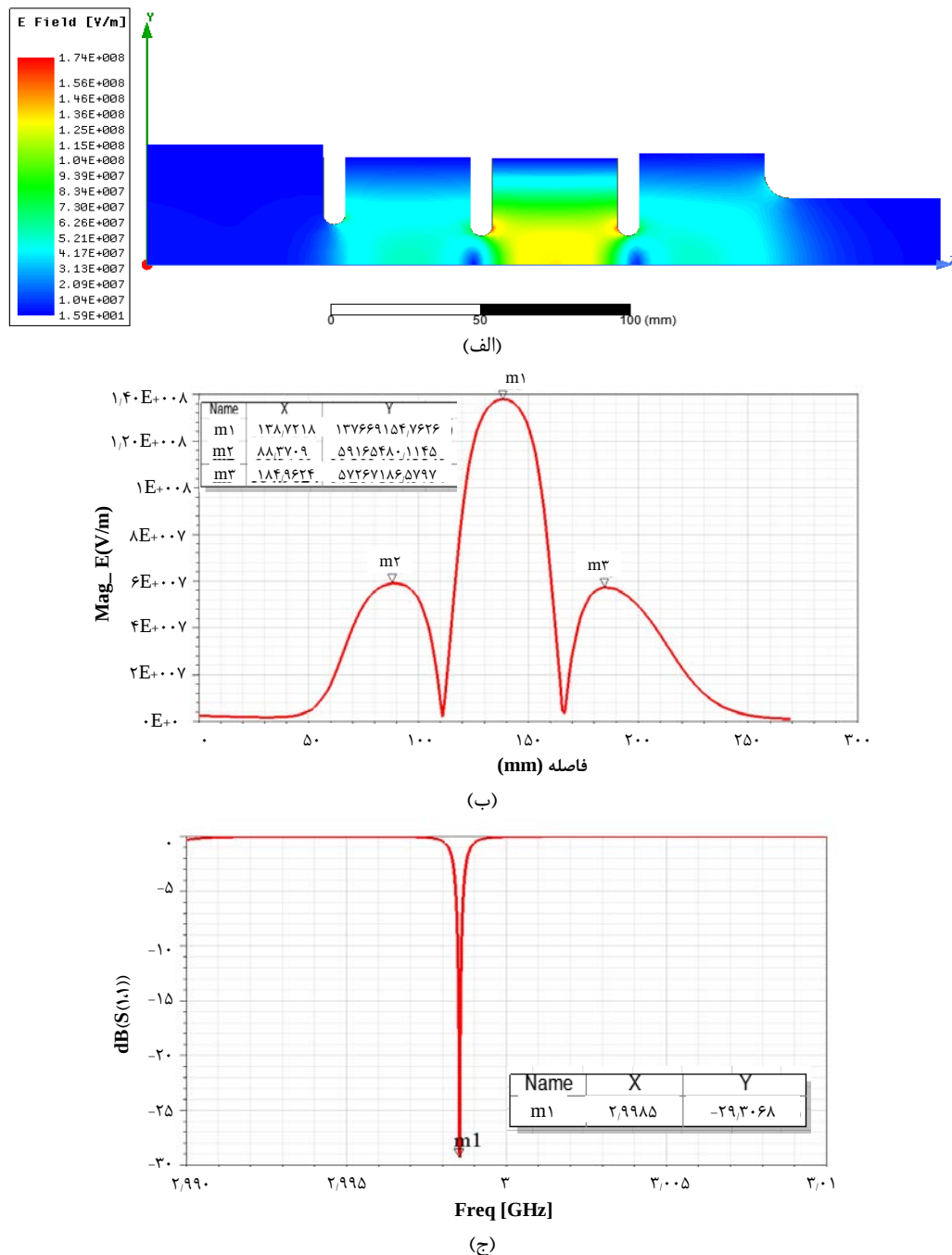
تصویر اندازه میدان الکتریکی سطحی و همچنین پروفایل میدان محوری برای توان ورودی 8 MW در شکل‌های ۳ الف و ۳ ب نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است، میدان الکتریکی محوری در سلول میانی بیش از دو برابر میدان در

1. Stored Energy
2. RF Breakdown
3. Breakdown Rate (BDR)
4. Conditioning



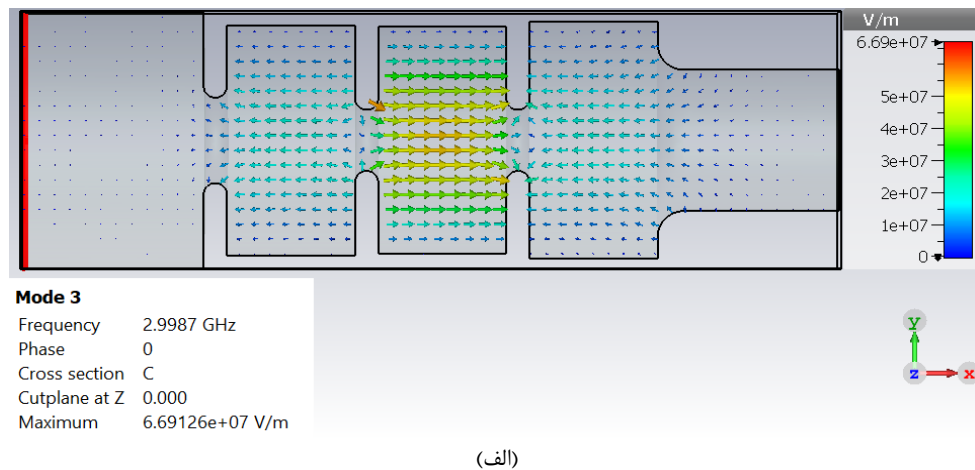
گرفته و تلاش شده است تا با جمع‌آوری تمام داده‌های آزمایشی موجود در باند X نسبت به صحت اعتبار این کمیت اقدام شود. این کمیت که "بردار پوینتینگ اصلاح شده" نام‌گذاری شده، از ترکیب میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی تشکیل شده و هم‌اکنون به‌طور گسترده در طراحی ساختارهای گرادیان بالا به‌منظور لحاظ کردن محدودیت شکست رادیوفرکانسی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

رضایت‌بخشی توضیح نداده و پیش‌بینی نمی‌کند [۲۳]. برای مدت‌زمان قابل‌توجهی فرض بر این بوده است که میدان الکتریکی سطحی به‌دلیل ایجاد field emission به‌عنوان مهم‌ترین عامل محدودکننده گرادیان شتاب‌دهی به شمار می‌رود و میدان مغناطیسی هیچ تأثیری در این موضوع ندارد. اما در چارچوب پژوهش‌های انجام شده در پروژه CLIC، مطالعات قابل‌توجهی به‌منظور تبیین محدودیت‌های گرادیان بالا و تعریف کمیت مناسب برای پیش‌بینی شکست RF صورت

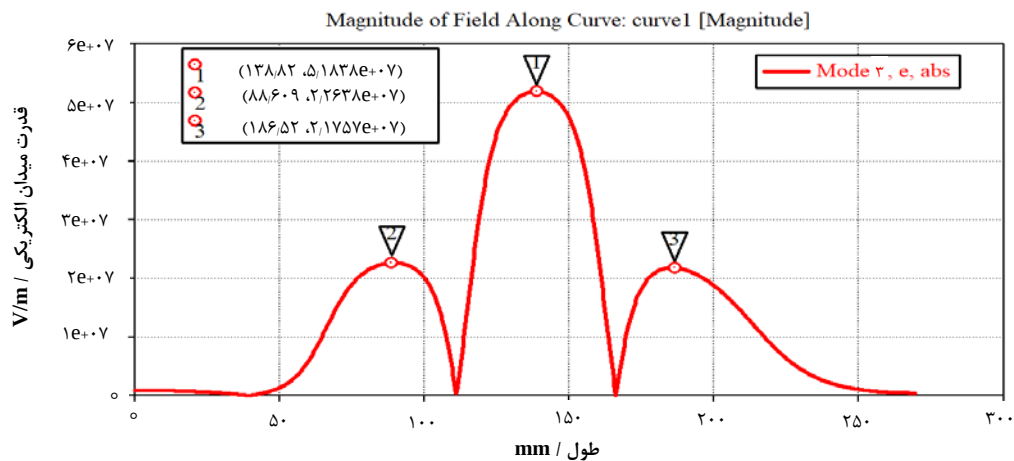


شکل ۳. نتایج طراحی کاواک در محیط HFSS شامل الف) اندازه میدان الکتریکی، ب) پروفایل میدان محوری برای توان ورودی ۸ MW و ج) نمودار پارامتر S_{11} .

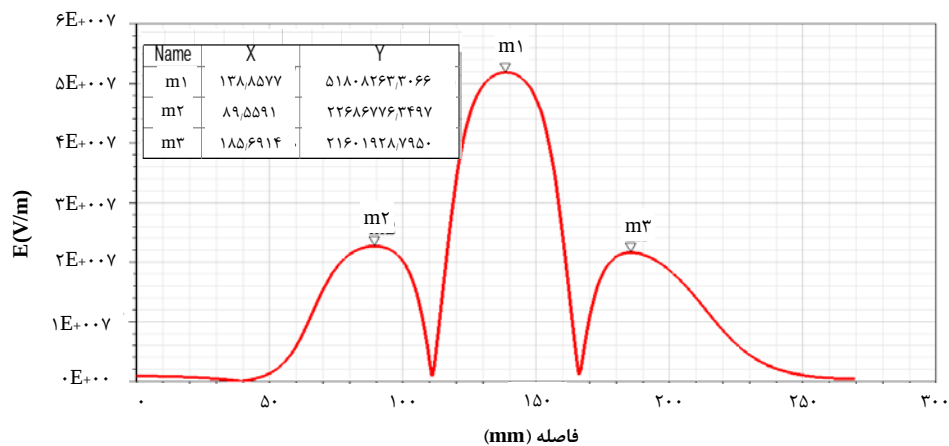




(الف)



(ب)



(ج)

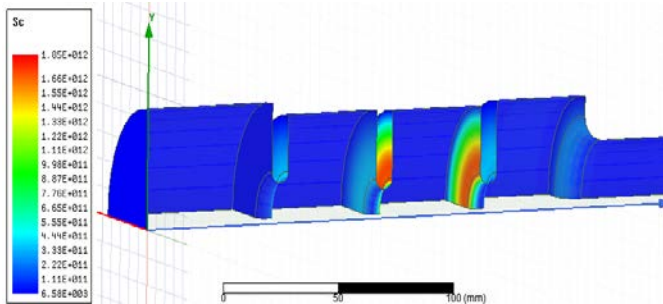
شکل ۴. نتایج طراحی کاواک در محیط CST شامل (الف) اندازه میدان الکتریکی، (ب) پروفایل میدان محوری نرمالیزه شده به انرژی ذخیره شده J و (ج) پروفایل میدان محوری نرمالیزه شده به انرژی ذخیره شده J در نرم افزار HFSS.

بر اساس داده‌های تجربی از کاواک‌های متعدد، برای داشتن نرخ شکست (BDR) کمتر از 10^{-6} bpp/m در طول پالس ۲۰۰ ns، مقدار عددی کمیت S_c نباید از $5 \text{ W}/\mu\text{m}^2$ تجاوز کند [۲۳].

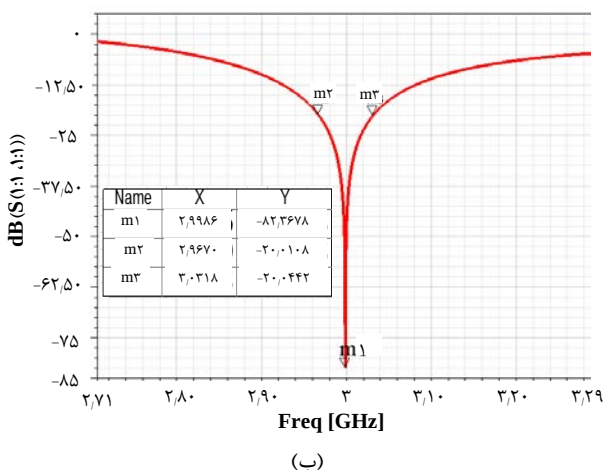
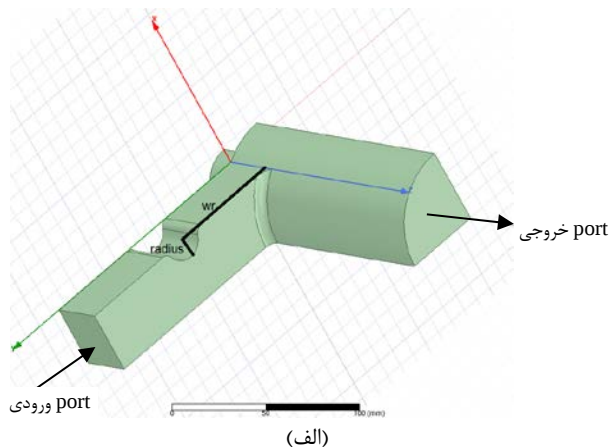
اگر S بردار پوینتینگ در حالت مختلط باشد، بردار پوینتینگ اصلاح شده برابر است با:

$$S_c = \text{Re} \{S\} + \frac{1}{\epsilon} \text{Im} \{S\} \quad (3)$$





شکل ۵. کمیت S_{11} برای توان ورودی ۸ MW.



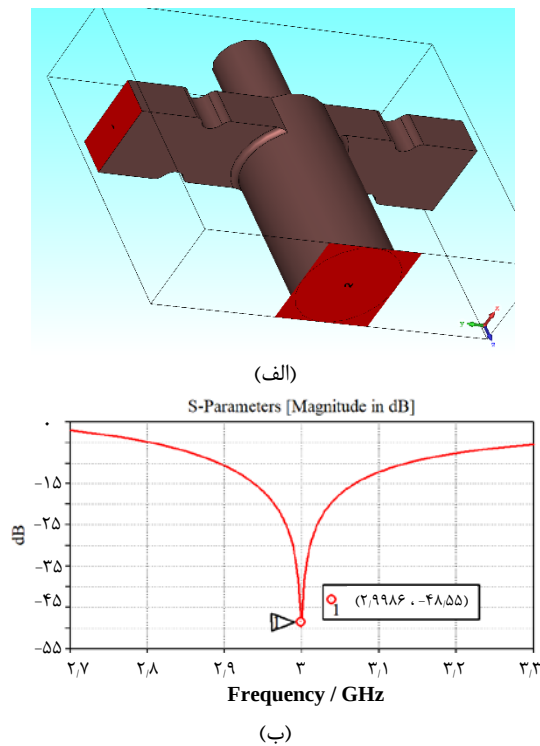
شکل ۶. شبیه‌سازی اتصال موجبر مستطیلی WR284 به موجبر استوانه‌ای در نرم‌افزار HFSS (الف) هندسه پورت‌های ورودی و خروجی (ب) پارامتر S_{11} .

براین اساس برای کاواک‌های طراحی شده، کمیت S_{11} در نرم‌افزار HFSS به‌صورت مجزا فرمول‌نویسی و اعمال شد. نمودار این کمیت برای توان ورودی ۸ MW در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است، بیشینه مقدار این کمیت $1/85 \text{ W}/\mu\text{m}^2$ می‌باشد که کمتر از حد مجاز است. از این‌رو طراحی انجام شده برای آزمون‌های گرادیان بالا در توان ۸ MW از نظر نرخ شکست RF در حد مجاز قرار دارد.

۳.۲ طراحی کوپلر باند S

در طراحی کوپلر باند S موجبر مستطیلی WR284 به‌طور متقارن از دو طرف به موجبر استوانه‌ای متصل می‌شود. دو برآمدگی استوانه‌ای در موجبر مستطیلی قبل از محل اتصال به موجبر استوانه‌ای به‌گونه‌ای تعبیه می‌شود که موج بازگشتی به کم‌ترین مقدار برسد [۲۰، ۲۴، ۲۵]. شکل ۶ الف شبیه‌سازی انجام شده جهت تعیین شعاع و محل این استوانه در نرم‌افزار HFSS را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل ۶ ب مشخص است، پارامتر S در فرکانس موردنظر کمتر از -۸۰ dB بوده و پهنای آن در -۲۰ dB در حدود ۶۴ MHz است. در نهایت طراحی و شبیه‌سازی مجموعه کامل موجبر با استفاده از نرم‌افزار HFSS انجام شد و همان‌طور که در شکل ۷ مشخص است، برای توان ورودی ۸ MW، بیشینه میدان الکتریکی و مغناطیسی سطحی به‌ترتیب ۵ MV/m و ۱۷ kA/m می‌باشد. همچنین پارامتر S برای کوپلر در فرکانس موردنظر کمتر از -۶۰ dB بوده و پهنای آن در -۲۰ dB در حدود ۲۸ MHz است که در شکل ۸ نشان داده شده است. در نهایت به‌منظور اطمینان از نتایج حاصل از نرم‌افزار HFSS، هندسه شکل ۶ از این نرم‌افزار استخراج شده و برای شبیه‌سازی مجدد وارد محیط نرم‌افزار تحلیل الکترومغناطیسی CST شد. شبیه‌سازی در محیط Frequency domain صورت گرفت که هندسه موردنظر و نمودار پارامتر S در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که در نمودار مشخص است، پارامتر S در فرکانس موردنظر کمتر از -۴۸ dB می‌باشد که کمتر از حد نیاز برای کوپلر بوده و قابل‌قبول است.

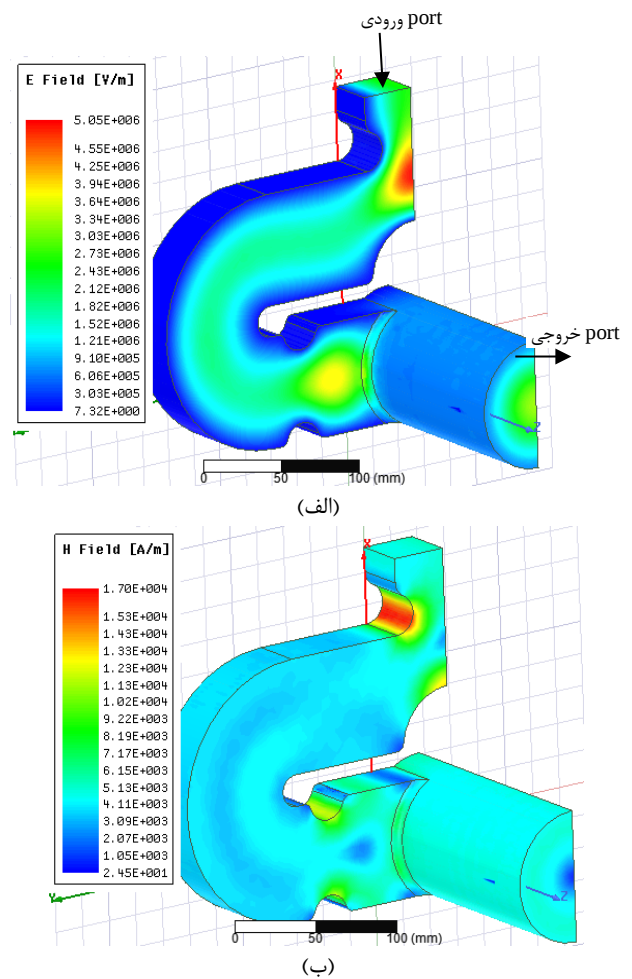




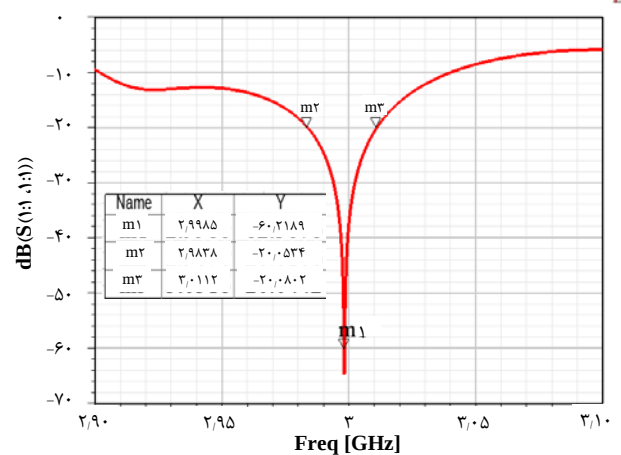
شکل ۹. شبیه‌سازی اتصال موجبر مستطیلی WR۲۸۴ به موجبر استوانه‌ای در نرم‌افزار CST (الف) هندسه پورت‌های ورودی و خروجی (ب) پارامتر S.

۳. نتیجه‌گیری

استفاده از روش انقباضی به‌عنوان روشی جدید در ساخت کاواک‌های گرادیان بالا پیشنهاد می‌شود. برای این منظور لازم است تا ملاحظات ساخت به این روش را در طراحی کاواک و کوپلر در نظر گرفت. استفاده از نرم‌افزار تحلیل الکترومغناطیس Ansys HFSS در بررسی طراحی رادیوفرکانسی کاواک‌های گرادیان بالا و کوپلر مناسب در باند S، نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهد. طراحی کاواک موج ایستا متشکل از ۳ سلول در مد π و فرکانس ۲۹۹۸/۵ MHz نشان می‌دهد بیشینه میدان محوری ۱۳۷ MV/m برای توان ورودی ۸ MW قابل‌دستیابی است. در این توان بیشینه، میدان الکتریکی سطحی بر روی لبه دیسک‌های سلول میانی تشکیل می‌شود که معادل ۱۷۴ MV/m می‌باشد. بررسی بردار پوینتینگ اصلاح شده نشان داد طراحی انجام شده برای آزمون‌های گرادیان بالا در توان ۸ MW از نظر نرخ شکست RF در حد مجاز قرار دارد. طراحی و شبیه‌سازی کوپلر با استفاده از نرم‌افزار HFSS انجام شد و پارامتر S برای کوپلر در فرکانس ۲۹۹۸/۵ MHz کمتر از ۶۰ dB بوده و پهنای آن در ۲۰ dB حدود ۲۸ MHz است. بیشینه میدان الکتریکی و مغناطیسی سطحی برای توان ورودی ۸ MW به ترتیب ۵ MV/m و ۱۷ kA/m می‌باشد که به مراتب از میدان‌های کاواک کوچک‌تر است.



شکل ۷. میدان‌های (الف) الکتریکی و (ب) مغناطیسی برای هندسه کامل کوپلر در توان ورودی ۸ MW.



شکل ۸. نمودار پارامتر S برای هندسه کامل کوپلر در شکل ۷.



تشکر و قدردانی

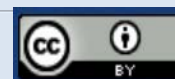
از آقای دکتر Walter Wuensch رئیس گروه کاواک‌های میدان بالای پروژه CLIC در سرن بابت پشتیبانی و راهنمایی‌های ارزنده در شکل‌گیری این پژوهش تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

1. E.I. Simakov, V.A. Dolgashev, S.G. Tantawi, *Advances in high gradient normal conducting accelerator structures*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **907**, 221-230 (2018).
2. A. Vnuchenko, et al., *High-gradient testing of an S-band, normal-conducting low phase velocity accelerating structure*, *Physical Review Accelerators and Beams*, **23**(8), 084801 (2020).
3. N. Shafqat, C. Serpico, T. Lucas, *Design and high-power test of a short prototype of high gradient S-band accelerating structure for the FERMI free electron laser linac upgrade*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **979**, 164473 (2020).
4. M. Diomedede, *High-gradient structures and rf systems for high-brightness electron linacs* (Phd thesis), *Università degli studi di Roma-La Sapienza* (2020).
5. D. Angal-Kalinin, et al., *Design, specifications, and first beam measurements of the compact linear accelerator for research and applications front end*, *Physical Review Accelerators and Beams*, **23**(4), 044801 (2020).
6. A. Korsbäck, et al., *Vacuum electrical breakdown conditioning study in a parallel plate electrode pulsed dc system*, *Physical Review Accelerators and Beams*, **23**(3), 033102 (2020).
7. V. Dolgashev, et al., *Materials and technological processes for High-Gradient accelerating structures: new results from mechanical tests of an innovative braze-free cavity*, *Journal of Instrumentation*, **15**(01), P01029 (2020).
8. V. Dolgashev, et al., *Innovative compact braze-free accelerating cavity*, *Journal of Instrumentation*, **13**(09), P09017 (2018).
9. D. Alesini, et al., *Design, realization, and high power test of high gradient, high repetition rate brazing-free S-band photogun*, *Physical Review Accelerators and Beams*, **21**(11), 112001 (2018).
10. D. Alesini, et al., *New technology based on clamping for high gradient radio frequency photogun*, *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*, **18**(9), 092001 (2015).
11. V.A. Dolgashev, et al., *RF breakdown in normal conducting single-cell structures*. in *Particle Accelerator Conference, Knoxville, Tennessee*. (2005).
12. V. Dolgashev, et al., *Status of high power tests of normal conducting single-cell structures*, *In Conf. Proc.*, (2008).
13. V. Dolgashev, *Building and High Power Testing Welded Accelerating Structures*. in *12th International Workshop on Breakdown Science and High-Gradient Technology*, **HG2019, from 10 to 14 June 2019, Chamonix, France. (2019).**
14. M. Aicheler, et al., *A Multi-TeV linear collider based on CLIC technology: CLIC Conceptual Design Report*, *SLAC National Accelerator Lab., Menlo Park, CA (United States)* (2014).
15. F. Ghasemi, et al., *Design, construction and tuning of S-band coupler for electron linear accelerator of institute for research in fundamental sciences (IPM E-linac)*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **772**, 52-62 (2015).
16. S.S. Hajari, et al., *RF emittance in a low energy electron linear accelerator*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **888**, 250-256 (2018).
17. H. Shaker, F. Ghasemi, *Design of a Pi/2 Mode S-Band Low Energy TW Electron Linear Accelerator*, *In Conf. Proc.* (2011).
18. M. Aghayan, F.M., H. Shaker, F. Ghasemi, *Plans for constructing high-gradient S-band cavities using non-brazing method in Iran*, *International Workshop on Breakdown Science and High Gradient Technology* (HG2018), (2018).
19. H. Shaker, *Electron linac in Iran*, *International Workshop on Breakdown Science and High Gradient Technology* (HG2017), (2017).
20. C. Nantista, S. Tantawi, V. Dolgashev, *Low-field accelerator structure couplers and design techniques*, *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*, **7**(7), 072001 (2004).
21. T.P. Wangler, *RF Linear accelerators*, *John Wiley & Sons* (2008).
22. C. Karzmark, C.S. Nunan, E. Tanabe, *Medical electron accelerators*, *McGraw-Hill* (1993).
23. A. Grudiev, S. Calatroni, W. Wuensch, *New local field quantity describing the high gradient limit of accelerating structures*, *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*, **12**(10), 102001 (2009).
24. G. Castorina, et al., *A TM01 mode launcher with quadrupole field components cancellation for high brightness applications*, *In Journal of Physics: Conference Series*, *IOP Publishing* (2018).
25. A. Cahill, et al., *RF design for the TOPGUN photogun: A cryogenic normal conducting copper electron gun*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **865**, 105-108 (2017).

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

سیدعبدالمهدی آقایان، سیدفرهاد مسعودی، سیدحامد شاکر، فرشاد قاسمی (۱۴۰۱)، طراحی کاواک و کوپلر گرادیان بالا در باند S، ۶۷-۷۵

DOR: 20.1001.1.17351871.1401.43.1.8.1

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1351.html

