امکان سنجی ساخت شتابدهنده الکترون با کاواک کواکسیال وتزویج مستقیم توان توسط تقویت کننده‌های حالت جامد

***پورصالح، علی محمد[۱و۲]؛ جباری، ایرج[۱]؛ خلفی، حسین[۲]**

[۱] دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، گروه مهندسی هسته‌ای

[۲] سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم وفنون هسته ای، مجتمع پژوهشی ایران مرکزی (یزد)

چکیده:

در روش تزویج مستقیم توان RF به کاواک شتابدهنده‌های موج رادیویی توسط مدول‌های تقویت کننده حالت جامد یک شیار در اطراف کاواک شتابدهنده ایجاد می‌شود و مدول‌های کوچک ترانزیستوری به صورت مستقیم به کاواک متصل می‌گردد. در این طرح کاواک شتابدهنده علاوه بر نقش محفظه شتاب به عنوان ترکیب کننده توان نیز عمل می‌کند. با استفاده از این روش می‌توان به نسل نوینی از شتابدهنده‌های موج رادیویی کم حجم و اقتصادی دست یافت. نتایج امکان سنجی در این تحقیق امکان ساخت یک شتابدهنده با کاواک کواکسیال نظیر شتابدهنده رودترون با استفاده از روش تزویج مستقیم توان، به شرط کنترل دقیق فرکانس وفاز مدول‌های تقویت کننده را تائید می‌کند.

کلمات کلیدی: شتابدهنده رودترون، تزویج مستقیم توان RF، کاواک کواکسیال، تقویت کننده حالت جامد

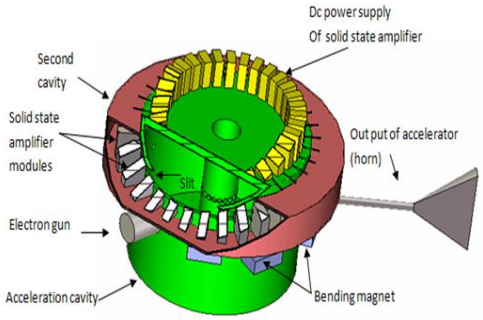
مقدمه:

به طور معمول توان RF در شتابدهنده‌های موج رادیویی با استفاده از انواع تیوب‌های یا اصطلاحاً لامپ‌های RF تامین می‌گردد[۱]. امروزه با گسترش علم الکترونیک قطعات حالت جامد یا ترانزیستوری با توان‌های بالا در حد کیلو وات به بازار آمده‌اند که می‌توان با ترکیب آنها به توان مورد نظر دست یافت. لیکن در مواردی ممکن است مقرون به صرفه و اجرایی نباشد[۲]. استفاده از تقویت کننده‌ها ی ترانزیستوری نسبت به لامپی دارای مزایای زیادی است که می‌توان به برخی از آنها از قبیل طول عمر بسیار بالاتر و عدم نیاز به تعویض‌های دوره‌ای، تعمیرات بسیار راحتر وسریع تر، امکان ساخت خانگی، عدم نیاز به آماده سازی تقویت کننده یا پیش گرم سازی آن، مدولار بودن، عدم نیاز به ولتاژ بالا و رهایی از خطرات ناشی از آن، قابلیت اطمینان بیشتر، عدم نیاز به تیونیگ‌های سخت و نگرانی‌های ناشی از بین رفتن تیوب اشاره نمود[۳]. اولین مرکز شتاب‌دهنده که از این تکنولوژی استفاده نموده است، مرکز شتاب‌دهنده فرانسه است[۴]. به طور متداول در تمامی مراکز، مدول‌های تقویت کننده در بلوک‌های کوچک با هم ترکیب و در نهایت توسط یک کوپلر به کاواک شتابدهنده متصل می‌گردند. لیکن این روش دارای حجم زیادی می‌باشد. شرکت زیمنس اولین شرکتی است که فعالیت در زمینه استفاده از ایده اتصال مستقیم مدول‌های تقویت کننده حالت جامد را با استفاده از ترانزیستورهای SiC –VJFET که دارای امپدانس ورودی زیاد و قدرت جریان دهی بالا است را جهت یک

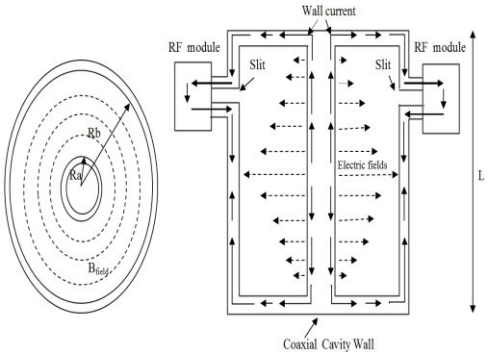
کاواک استوانه ای آغاز نموده است[۵]. ولی در این تحقیق امکان استفاده از این روش برای کاواک کواکسیال به منظور گسترش و استفاده آن در شتابدهنده رودترون که یک شتابدهنده صنعتی الکترون متداول است [۶]، بررسی خواهد شد.

روش کار:

برای تحلیل وامکان سنجی استفاده از طرح اتصال مستقیم مدول‌های تقویت کننده به کاواک کواکسیال به منظور ساخت یک شتاب‌دهنده الکترونی با ساختار شتاب‌دهنده رودترون در ابتدا طرح کلی کاواک و شتابدهنده مذکور مطابق شکل‌های ۱ و ۲ در نظر گرفته شد. شکل ۱ نحوه اتصال مدول‌های تقویت کننده ترانزیستوری به کاواک کواکسیال و چگونگی عبور جریان سطحی و همچنین شکل میدان الکتریکی و مغناطیسی ایجاده شده را نشان می دهد. در شکل ۲ شماتیک کلی این طرح برای استفاده در شتاب‌دهنده رودترون نشان داده شده است.



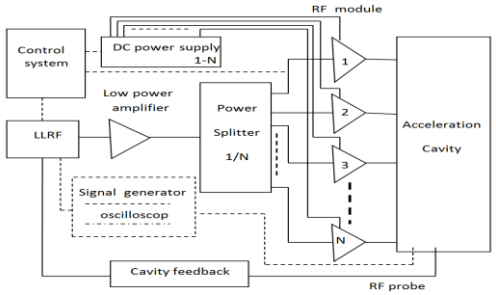
شکل۱: نحوه تزویج مستقیم توان به کاواک کواکسیال



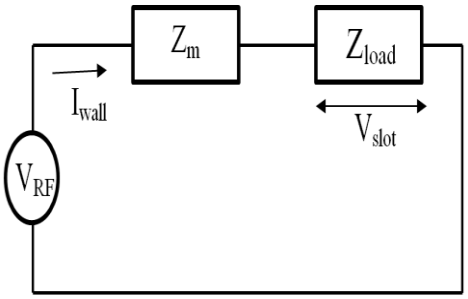
شکل۲: طرح کلی شتابدهنده رودترون تزویج مستقیم توان

چنانچه درشکل‌های ۱ و ۲ مشاهده می‌شود، اطراف کاواک یک شیار سرتاسری ایجاد شده و مدول‌های تقویت کننده به صورت مجزا و به طور مستقیم به کاواک متصل شده است. برای حفظ خلاء کاواک در حد فاصل شیار ایجاد شده از یک ماده عایق مناسب نظیر آلومینا با خلوص بالا استفاده می‌شود. با این روش در واقع کاواک شتابدهنده هم به عنوان محفظه شتاب و هم به عنوان ترکیب کننده توان عمل می‌کند و نیازی به ترکیب کننده توان و یا کوپلر تزویج توان به صورت جداگانه نمی‌باشد. همانطور که در شکل ۱ مشهود است، جریان سطحی عبوری بر روی پوسته محفظه در محل شیار به جای عبور از پوسته محفظه از طریق مدول‌های تقویت کننده که تماماً به صورت موازی در اطراف کاواک قرار دارند، عبور می‌کند. به عبارتی کاواک و مدول‌های تقویت کننده به صورت سری نسبت به هم قرار داشته و با عبور جریان سطحی از میان آنها تشدید در مد TEM در کاواک محقق می‌گردد تا از میدان الکتریکی ایجاد شده برای شتاب باریکه

الکترونی استفاده گردد. مراحل شتاب در این طرح مانند شتاب‌دهنده رودترون می‌باشد و باریکه الکترونی با عبوراز میانه و قطر کاواک کواکسیال شتاب می‌گیرد و توسط مگنت‌های اطراف کاواک برای شتاب بیشتر به کاواک برگردانده می‌شود تا در نهایت پس از ده بار چرخش و کسب شتاب وانرژی لازم از کاواک خارج شده و توسط سیستم استخراج به هدف مورد نظر تابیده شود. در شکل ۳ طرح سیستم RF در این شتاب‌دهنده نشان داده شده است. با توجه به شکل در این طرح سیگنال تولیدی توسط LLRF پس از یک مرحله پیش تقویت وارد تقسیم کننده توان می‌شود و سیگنال‌های خروجی از تقسیم کننده توسط مدول‌ها تقویت می‌شود. تعداد این مدول‌ها بستگی به توان در نظر گرفته شده برای هر مدول و همچنین توان کل مورد نیاز برای ایجاد میدان الکتریکی و شتاب به باریکه الکترونی برای رسیدن به شتاب مورد نظر دارد.



شکل۳: سیستم RF شتابدهنده با استفاده طرح پیشنهادی



شکل۴: مدار معادل اتصال یک مدول تقویت کننده به کاواک

در شکل ۴ مدار معادل اتصال یک مدول به کاواک نشان داده شده است. اگرتعداد N مدول به کاواک متصل باشد امپدانس دیده شده از طرف هر مدول از رابطه (۱) به دست می‌آید.

$$Z_{load}=Z_{cavity}.N \qquad (۱)$$

که در Z_{cavity} امپدانس موثر کاواک است. در این حالت جریان سطحی و توان تلفاتی کاواک بینN مدول متصل به شیار کاواک به طور مساوی تقسیم می‌شود. حال اگر یک مدول به دلیل خرابی غیرفعال و اتصال کوتاه شود، دیگر رابطه (۱) صادق نخواهد بود و از رابطه (۲) باید استفاده شود.

$$Z_{load} =Z_{cavity}.(N+S)^2/N \qquad (۲)$$

در این رابطه N تعداد مدول‌های فعال وS مدول‌های اتصال کوتاه شده می‌باشد. همچنین در صورتیکه یک مدول اتصال باز شده و یا از مدار خارج شود به جای رابطه (۱) از رابطه (۳) باید استفاده شود.

$$Z_{load}= Z_{cavity}.(N-1) \qquad (۳)$$

براساس رابطه بین امپدانس و توان تلفاتی، کل توان RF تحویلی توسط مدول‌های تقویت کننده برابر رابطه (۴) است.

$$P_{load}=V^2_{RF}.Z_{load}.N/(Z_{load}+Z_m)^2 \qquad (۴)$$

که در آن Z_m امپدانس مربوط به مدول تقویت کننده می‌باشد. فرآیند شبیه سازی طرح پیشنهادی توسط نرم افزار CST انجام شد. برای تست‌های آزمایشگاهی، یک کاواک کواکسیال کوچک آلومینیمی به طول ۴۷۸.۹

میلی‌متر و شعاع‌های داخلی و بیرونی ۱۶.۹۵ و۵۴.۸۸ میلی‌متر و فاصله شیار ۴.۷۲ میلی‌متر مطابق شکل ۵ ساخته شد.

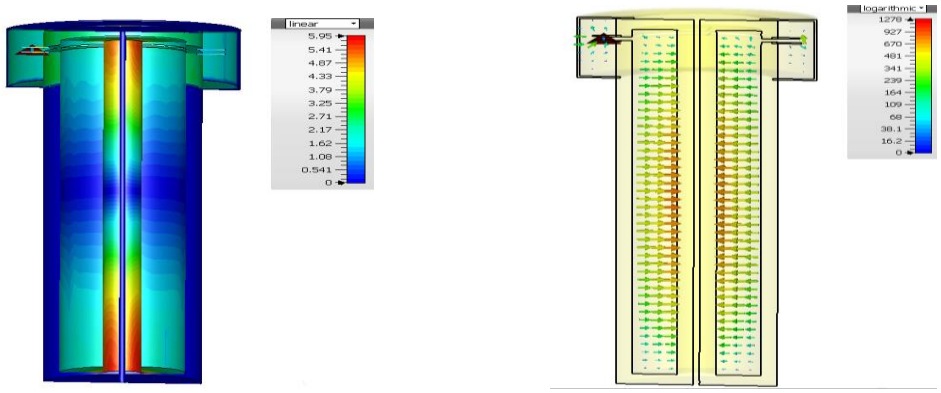
شکل۵: تصاویری از کاواک کواکسیال آلومینیومی ساخته شده جهت تست‌های آزمایشگاهی طرح تزویج توان مستقیم

در شکل (۵الف) تصویری از کاواک کواکسیال با اتصال مستقیم چهار منبع تزویج توان RF مشاهده می‌شود. همچنین در شکل (۵ب) تصویری ازنحوه اتصال کوتاه دو محل از شیار کاواک به منظور بررسی اثر اتصال کوتاه مدول‌ها نشان داده شده است. برای تست مد رزونانسی میدان الکتریکی ایجاد شده در کاواک مطابق شکل، یک پراب کوچک در وسط کاواک تعبیه شده است تا ولتاژ متناظر میدان الکتریکی قرائت گردد و تاثیر اتصال مدول‌های تقویت کننده و یا غیر فعال و اتصال کوتاه شدن برخی از مدول‌ها بر روی فرکانس و همچنین میدان الکتریکی کاواک بررسی گردد. برای جلوگیری از نشت امواج RF به بیرون مطابق شکل (۵ج) از پوشش اطراف کاواک برای ایزوله کردن مدول‌های تقویت کننده متصل به شیار با محیط بیرون استفاده می‌شود که اصطلاحاً آنرا کاواک دوم می‌نامیم. شکل (۵د) تصویری از کاواک با تزویج مستقیم با وجود کاواک دوم و در حال تست را نشان می‌دهد.

نتایج:

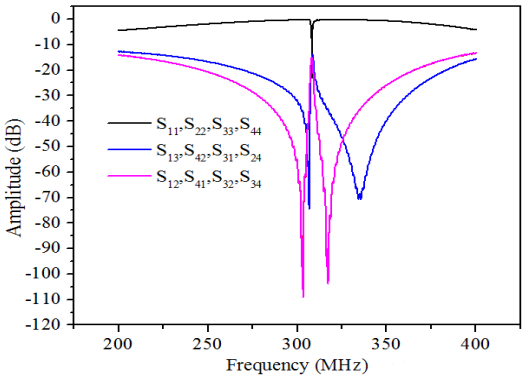
نتایج حاصل از شبیه سازی شکل میدان الکتریکی و جریان سطحی ناشی از میدان مغناطیسی در مد TEM در کاواک کواکسیال با تزویج مستقیم توان در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۶ ملاحظه می‌شود شکل میدان الکتریکی و مغناطیسی به گونه‌ای است که حداکثر میدان الکتریکی درمیانه کاواک قرار دارد و میدان مغناطیسی در این مکان صفر می‌باشد. لذا همانند شتاب‌دهنده رودترون می‌توان از میدان الکتریکی ایجاد شده در وسط کاواک برای شتاب باریکه الکترونی استفاده کرد. شکل ۷ نتایج شبیه سازی پارامترهای S درهنگام اتصال مستقیم چهار پورت یا مدول تقویت کننده به کاواک که حاکی از توان برگشتی و همچنین ایزولاسیون مناسب بین مدول‌های تقویت کننده است را نشان می‌دهد. در شکل ۸ سیگنال اندازه‌گیری شده از پراب وسط کاواک، ناشی از میدان الکتریکی در کاواک به صورت تجربی نشان داده شده

است. این سیگنال در حالتی است که نحوه چیدمان چهار مدول اطراف کاواک به صورت متقارن می‌باشد. فرکانس سیگنال‌های خروجی هر مدول دقیقاً یکسان ولی در فازهای متفاوت مورد تست قرار گرفته است.

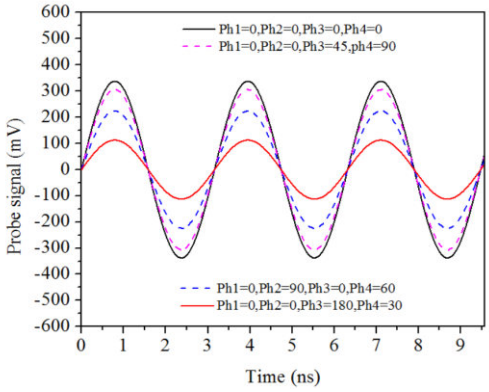


شکل ۶:راست) میدان الکتریکی در کاواک، چپ)جریان سطحی ناشی از میدان مغناطیسی در کاواک

همانگونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود بهترین پاسخ مربوط به زمانی است که سیگنال خروجی از مدول‌های تقویت کننده هم فاز باشند. نتیجه مشابه این تست برای چیدمان مدول‌ها و فرکانس سیگنال خروجی از مدول‌ها مورد تست قرار گرفت و مشاهده شد که بهترین پاسخ مربوط به زمانی است که فرکانس سیگنال‌های خروجی یکسان و چیدمان مدول‌های تقویت کننده در اطراف کاواک نیز متقارن باشد.



شکل۷: پارامترهای S مربوط به پورتهای متصل به کاواک



شکل۸: سیگنال اندازه‌گیری شده از پراب میانه کاواک

با توجه به نتایج با چهار پورت تزویج توان در عمل نسبت به افزایش پورت یا مدول‌های تزویج توان به کاواک تا ۸ پورت اقدام شد. که نتایج آن در جدول ۱ نشان داده شده است. در این تست چیدمان کلیه پورت‌ها متقارن و فرکانس و فاز سیگنال پورت‌ها نیز یکسان می‌باشد. با توجه به نتایج جدول ۱ توان اعمالی به کاواک از طریق اندازه گیری با رابطه (۴) تطابق دارد، همچنین چنانکه انتظار می‌رفت با افزایش پورت‌های ورودی سطح سیگنال اندازه‌گیری شده از پراب میانه کاواک نیز متناظر با تعداد پورت‌ها افزایش یافت. بر

اساس نتایج تجربی وشبیه سازی اتصال کوتاه یا غیرفعال شدن برخی مدول‌ها باعث جابجایی جزیی فرکانس و همچنین کاهش میدان الکتریکی داخل محفظه می‌گردد ولذا این طرح حتماً باید مجهز به یک سیستم کنترلی دقیق باشد تا همواره فرکانس و فاز سیگنال مدول‌های تقویت‌کننده را تست نماید و در صورت غیر فعال شدن یک مدول با علایم هشداری، اپراتور شتاب‌دهنده را آگاه سازد تا نسبت به تعویض مدول‌های تقویت کننده اقدام نماید. با توجه با اینکه این تقویت کننده‌ها حالت مدولار دارند به راحتی و به سرعت توسط اپراتور قابل تعویض می‌باشند.

جدول۱: مقادیر تجربی کاواک کواکسیال با تزویج مستقیم توان تا هشت مدول تقویت کننده

تعداد مدول متصل به کاواک	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
توان اعمالی به کاواک(میلی وات)	۵۰۰	۹۹۷	۱۴۹۷	۱۹۹۶	۲۴۹۴	۲۹۹۷	۳۴۹۳	۳۹۹۱
ولتاژ اندازه‌گیری شده از پراب(میلی ولت)	۸۷	۱۷۳	۲۵۹	۳۴۶	۴۳۲	۵۱۹	۶۰۷	۶۹۰

بحث ونتیجه گیری:

نتایج حاصل از شبیه سازی و تست‌های تجربی نشان داد که استفاده از روش تزویج مستقیم توان به کاواک کواکسیال امکان پذیر است. با استفاده از این روش می‌توان بدون نیاز به تیوب‌های RF که عمدتاً تهیه و استفاده از آن‌ها مشکلات زیادی دارد، از مزایای یک شتاب‌دهنده با سیستم ترانزیستوری برخوردار شد. همچنین برخلاف سایر شتاب‌دهنده‌های ترانزیستوری، در این طرح نیاز به خطوط انتقال توان، ترکیب کننده توان و همچنین کوپلر پرقدرت تزویج توان RF به کاواک نیست. با این طرح می‌توان به یک شتابدهنده رودترون به صورت مجتمع، اقتصادی وایمن دست یافت. البته از مشکلات این طرح ساخت سرامیک عایق پرکننده شیار اطراف کاواک جهت حفظ خلا، حفاظ گذاری مناسب برد های تقویت کننده اطراف کاواک و استفاده از یک مدار کنترلی برای کنترل دائمی فرکانس و فاز سیگنال خروجی از مدول‌های تقویت کننده است.

مراجع:

[1] J. C. Whitaker, "Power vacuum tubes handbook", CRC Press LLC, 2000.
[2] K.J. Russell, "Microwave Power Combining Techniques", IEEE Transactions on Microwaves Theory and Techniques, 27(5), pp:472-478,1979.
[3] M. D. Giacomo, "Solid state RF amplifiers for accelerator applications", PAC09, 2009.
[4] P. Marchand et al., "Operation of the SOLEIL RF system", Proceedings of SRF2007, conference, Peking Univ., Beijing, China, pp: 615-617, 2007.

[5] O. Heid, T. Hughes, "Compact solid state direct drive RF linac", Proceedings of IPAC'10, Japan, 2010.
[6] J .Pottier, "A new type of RF electron accelerator: the Rhodotron"", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 40/41, pp: 943-945, 1989.