

مقایسه انواع مدولاتورهای راه‌انداز لامپ کلاسترون شتابدهنده خطی الکترون و طراحی و ساخت نمونه اولیه به روش استفاده از سوئیچ‌های نیمه‌هادی

وحید اصلانی^۱ - فریدون عباسی دوانی^{۱*} - محمد لامعی رشتی^۲ - فرشاد قاسمی^۱

^۱ دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه کاربرد پرتوها

^۲ پژوهشگاه دانش‌های بنیادی (IPM)، پژوهشکده ذرات و شتابدهنده‌ها

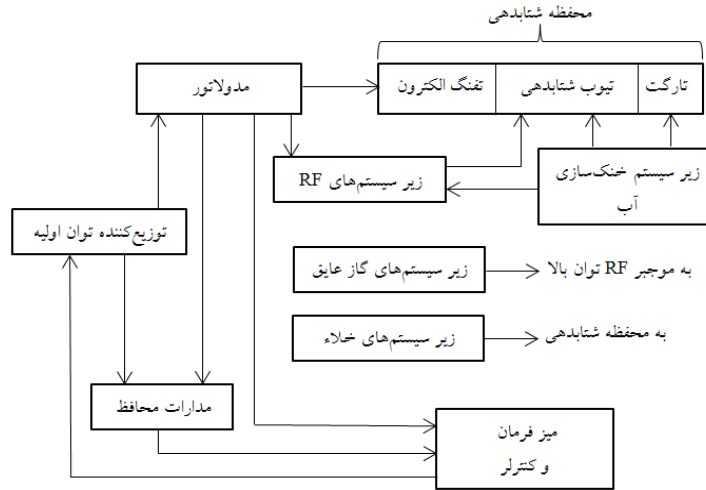
چکیده:

در این مقاله پس از توضیح جایگاه مدولاتور در عملکرد شتابدهنده خطی الکترون، انواع مدولاتورهای راه‌انداز لامپ کلاسترون مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با گسترش کاربرد سوئیچ‌های نیمه‌هادی، انواع مدرن مدولاتورها گزینه مناسبی برای طراحی و ساخت مولد مورد نظراند. با انتخاب روش یکپارچه پایه‌گذاری شده بر اساس ترانس پالس، نیازی به دستیابی ولتاژ اولیه بالا نیست. پس از ساخت، نتایج عملی روش انتخاب شده با طراحی آن مطابقت دارد. ارائه نمونه اولیه مدولاتور مورد نیاز برای راه‌اندازی لامپ کلاسترون پروژه ساخت شتابدهنده خطی الکترون، از نتایج این مقاله است.

کلید واژه: شتابدهنده خطی الکترون، لامپ کلاسترون، مدولاتور و سوئیچ نیمه‌هادی

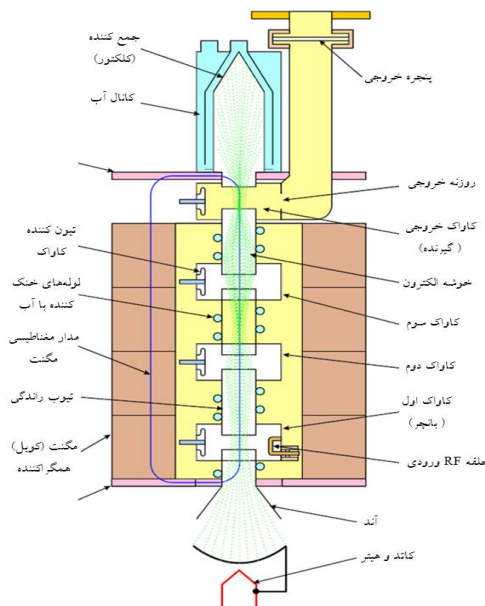
مقدمه:

پروژه طراحی و ساخت یک شتابدهنده خطی الکترون در پژوهشگاه دانش‌های بنیادی با همکاری گروه کاربرد پرتوها دانشکده مهندسی هسته‌ای دانشگاه شهید بهشتی در حال انجام است. این مقاله حاصل انجام قسمتی از این پروژه است که نقش مهمی در تکمیل آن دارد. اجزای اصلی یک شتابدهنده خطی الکترون شامل چشمه الکترون، تیوب اصلی شتابدهنده، منبع توان RF، سیستم خلاء، قطعات موجبر جهت انتقال توان RF به قسمت شتابگر، سیستم خنک‌کننده، سیستم کنترل و نمایشگر می‌باشند. شکل ۱ اجزاء شتابدهنده خطی الکترون و ارتباط میان آن‌ها را نشان می‌دهد [۱]. یکی از مهمترین قسمت‌های این نوع از شتابدهنده‌ها زیر سیستم RF آن است که وظیفه تامین موج رادیو فرکانسی توان بالا را برای تیوب شتابدهنده بر عهده دارد. از آنجا که موج الکترومغناطیسی مورد نیاز باید توان بسیار بالا (چند مگاوات) داشته‌باشد، توسط لامپ‌های مایکروویو، به صورت پالس‌های با پهنای کم (چند میکروثانیه) تولید می‌شوند [۲]. این لامپ‌ها را به دو دسته لامپ‌های باریکه خطی، همچون کلاسترون، توایسترون و TWT و لامپ‌های میدان متقاطع همچون مگنترون‌ها می‌توان دسته‌بندی نمود. به طور معمول در شتابدهنده‌هایی که به توان RF بسیار بالا برای شتاب‌دهی ذرات نیاز دارند، از لامپ کلاسترون استفاده می‌شود. لامپ‌های کلاسترون، ابزارهایی هستند که برای تولید و یا تقویت سیگنال در طیف فرکانس مایکروویو بکار می‌روند. این لامپ‌ها، متداول‌ترین منابع برای کاربردهای تولید توان بالا، فرکانس بالا و پهنای وسیع می‌باشند. برای این کار لامپ کلاسترون به پالس‌های با ولتاژ و جریان بالا نیاز دارد که بوسیله مدولاتور قدرت تولید می‌شود. در واقع کلاسترون‌ها از رایج‌ترین تقویت‌کننده‌های توان بالای RF می‌باشند که با توان خروجی در رنج چند صد کیلووات تا چند ده مگاوات، کاربرد گسترده‌ای در انواع شتابدهنده‌ها دارند [۳].



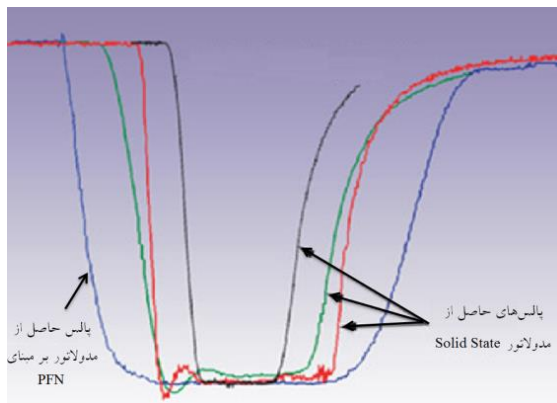
شکل ۱: اجزاء شتابدهنده خطی الکترون و ارتباط میان آن‌ها [۱]

شکل ۲ یک کلايسترون و اجزاء آن را نشان می‌دهد. در کلايسترون یک باریکه الکترونی از سمت کاتد یک تفنگ الکترونی به سمت کاواک رزونانسی شتاب می‌گیرد. در واقع اختلاف پتانسیل الکتریکی اعمال شده میان کاتد و آند لامپ، سبب حرکت الکترون‌ها به سمت کلکتور خواهد شد. الکترون‌ها در گذر از میان کاواک‌ها بر اساس سازوکار مدولاسیون سرعت، خوشه (بانچ) می‌شوند. زمانی که خوشه‌های الکترونی به کاواک آخر می‌رسند، امواج میکروویوی در اثر تغییر چگالی الکترون‌ها و تابش ترمزی آن‌ها تولید می‌شود [۴].

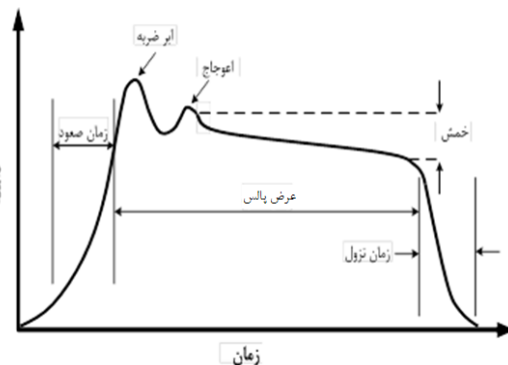


شکل ۲: کلايسترون چهار کاواکه و اجزاء آن [۴]

در سیستم تامین RF توان بالای یک شتابدهنده خطی الکترون، پس از کلايسترون مهمترين نقش را مدولاتور بر عهده دارد. مدولاتور توان خط AC ورودی برق را به توان پالس ولتاژ بالا تبدیل می‌کند. پالس حاصل از مدولاتور، برای اعمال بین آند و کاتد کلايسترون مورد نیاز است. در واقع کاواک‌های شتابدهنده خطی، برای شتابدهی به توان بالای RF نیاز دارند. اما ایجاد توان بالای RF بطور پیوسته به سادگی امکان‌پذیر نیست. در نتیجه لامپ‌هایی مانند کلايسترون این توان بالا را به صورت پالسی می‌توانند ارائه دهند. برای این منظور کافی است تا در کلايسترون، شتاب اولیه مورد نیاز به الکترون‌ها را به صورت پالسی اعمال کنیم. مدولاتور وظیفه تامین چنین پالسی را دارد. لازم است تا این پالس دارای ویژگی‌های خاصی باشد. شکل ۳-الف مشخصات یک پالس و جدول ۱ کمیت‌های پالس موردنظر در این مقاله را نشان می‌دهد. بخاطر محدود نمودن تغییرات فاز و دامنه خروجی RF کلايسترون، سطح نوسانات سوار بر پالس، نباید از $\pm 0.5\%$ تجاوز کند و برای دستیابی به بیشترین راندمان ممکن، زمان هایافت و خیز پالس باید تا حد ممکن کوچک باشد [۵]. در ادامه این مقاله پس از مرور انواع متداول روش‌های پیاده سازی مدولاتورهای راه‌انداز لامپ کلايسترون، روش مناسب انتخاب و در پایان گزارشی از نتایج بدست‌آمده در ساخت آن ارائه شده‌است.



ب



الف

شکل ۳: الف- مشخصات یک پالس و ب- پالس‌های حاصل از انواع مدولاتورها

جدول ۱: کمیت‌های پالس موردنظر در این مقاله

کمیت	پهنای پالس	زمان صعود و نزول پالس	دامنه ولتاژ	دامنه جریان	نرخ تکرار	توان پالس	توان متوسط
مقدار	۱۰ میکرو ثانیه	۱ میکرو ثانیه <	۱۰۰-۱۲۰ کیلو ولت	۵۰ آمپر	۱۰۰ هرتز	۲ مگا وات	۲ کیلو وات

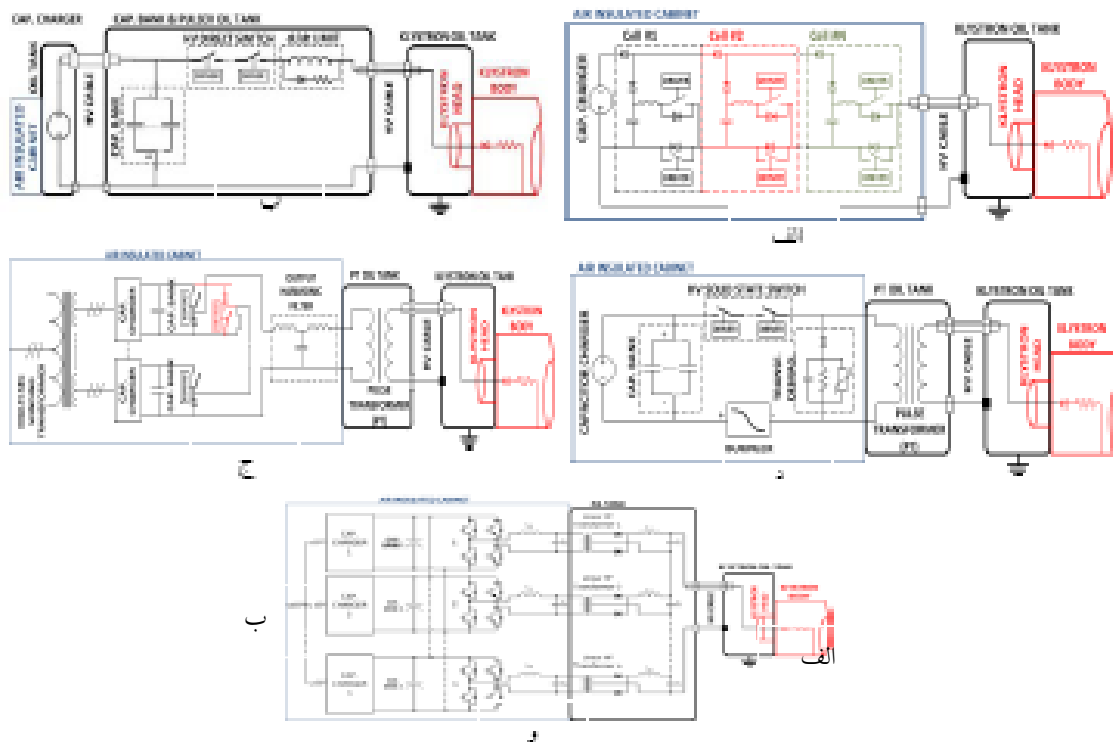
انواع مدولاتور و انتخاب مدل مناسب جهت ساخت:

ذخیره انرژی توسط یک منبع انرژی با توان پایین در یک ذخیره‌کننده انرژی الکتریکی و سپس آزادسازی بسیار سریع این انرژی در یک بار به صورت پالس، ایده اساسی اغلب روش‌های رایج در تولید پالس توان بالا است. همانطور که

در بخش مقدمه اشاره شد، لبه بالا رونده تیز، همواری سطح مناسب و لبه پایین رونده تیز از مهمترین ویژگی‌های پالس مناسب برای لامپ کلاسترون است [۳]. در مورد لامپ‌های نوسان‌گر (مانند مگنترون) در صورت تیز نبودن لبه بالا رونده پالس، لامپ قبل از رسیدن پالس به مقدار نهایی خود، شروع به نوسان می‌کند که این نوسان در یک مد ناخواسته خواهد بود و لذا پدیده تغییر مد رخ داده و خروجی ناخواسته‌ای از لامپ خواهیم داشت. در مورد لامپ‌های تقویت‌کننده (مانند کلاسترون) نیز از آنجا که توان خروجی تقویت‌کننده متناسب با دامنه ولتاژ خروجی مدولاتور است در صورت تیز نبودن لبه بالا رونده پالس، خروجی‌های نامطلوبی ایجاد می‌گردد که تنها باعث ایجاد حرارت در شتابدهنده می‌شود. اجزای اصلی هر مدولاتور عبارتند از: منبع شارژ، امپدانس شارژ، المان ذخیره‌کننده انرژی، سوئیچ و افزایشنده سطح ولتاژ [۵].

وظیفه منبع شارژ، تامین انرژی لازم برای شارژ المان ذخیره انرژی در سطح ولتاژ و توان معین است. این منبع معمولاً یک ترانسفورماتور و یک مدار یکسو کننده است که از طریق برق شهر، دیزل ژنراتور و یا از طریق باتری تغذیه می‌گردد. امپدانس شارژ، وظیفه کنترل زمان شارژ و محدود کردن جریان شارژ را بر عهده دارد. معمول‌ترین امپدانس‌های شارژ، نوع مقاومتی و نوع سلفی هستند که در مدولاتورهای با نرخ تکرار پالس بالا، اغلب از نوع سلفی استفاده می‌شود. المان ذخیره انرژی، وظیفه ذخیره انرژی اولیه حاصل از منبع شارژ و تخلیه در لامپ را در زمان و نرخ تکرار لازم بر عهده دارد. المان ذخیره خازنی، خطوط انتقال (PFL)، شبکه شکل‌دهنده پالس و المان ذخیره سلفی، انواع متداول المان‌های ذخیره انرژی می‌باشند. سوئیچ کار قطع و وصل جریان در مدار را به عهده دارد. سرعت، حداکثر جریانی عبوری و حداکثر ولتاژ از ویژگی‌های سوئیچ است. اسپارک گپ، تیراترون، سوئیچ‌های مغناطیسی و سوئیچ-های نیمه‌هادی انواع سوئیچ‌های قابل استفاده در مدولاتورها هستند. در مدولاتورها به علت محدودیت‌های عملی، المان ذخیره انرژی معمولاً در سطح ولتاژ پایینی شارژ می‌شود (در عمل حداکثر تا حدود ۵۰kV). لذا برای دستیابی به ولتاژهای بالاتر در خروجی مدولاتور، باید از یک افزایشنده سطح ولتاژ استفاده کرد. استفاده از ترانسفورماتور پالس و استفاده از مولد مارکس دو روش افزایش سطح ولتاژ هستند. مدولاتورها بر حسب اینکه از چه ترکیبی از المان‌های اشاره شده فوق برای هر قسمت استفاده می‌کنند، انواع مختلفی دارند. اما به لحاظ سطح فن‌آوری، می‌توان مدولاتورها را به دو دسته کلاسیک و مدرن تقسیم‌بندی کرد. مدولاتورهای کلاسیک مشتمل بر دو دسته: الف- مدولاتورهای هارد تیوب یا لامپ خلاء و ب- مدولاتورهای شبه خطی هستند. در مدولاتورهای هارد تیوب المان ذخیره انرژی یک خازن یا بانک خازنی بوده و از لامپ خلاء نیز به عنوان سوئیچ استفاده می‌شود. در مدولاتور شبه خطی از خط انتقال به عنوان شکل‌دهنده پالس (PFL) استفاده می‌شود. این روش معمولاً برای تولید پالس‌های مربعی با پهنای کوچک (کسری از میکرو ثانیه) بکار می‌رود. برای طول پالس‌های با پهنای بیشتر به جای استفاده از یک خط انتقال می‌توان از مجموعه گسترده از چند خط انتقال استفاده کرد که به این نوع مدارها شبکه شکل‌دهنده پالس (PFN) گفته می‌شود. پالس‌های مستطیلی بهتر، تغییر آسان طول پالس از مزایا و راندمان پایینتر، نیاز به منبع ولتاژ بالاتر و عرض پالس کوتاه از معایب روش هارد تیوب نسبت به شبه خطی است. توسعه مدولاتورهای مدرن با سوئیچ‌های نیمه‌هادی آغاز شد. در واقع، استفاده از انواع سوئیچ‌های نیمه‌هادی (Insulated Gate Bipolar, GTO (Gate Turn Off Thruster) و IGBT Transistor) ، IGCT (Insulated Gate Controlled Thyristor) و Metal Oxide (Semiconductor Field- MOSFET effect Transistor) و تریتورهای مدرن است. اما بر اساس اینکه در این مدولاتورها از چه المان ذخیره انرژی و افزایشنده ولتاژ استفاده می‌شود، انواع مختلفی دارند. شکل ۴ انواع متداول مدولاتورهای مدرن را نشان می‌دهد که هر یک مزایا و معایب خاص خود را دارند. شکل ۳-ب پالس‌های حاصل از مدولاتور بر

مبنای استفاده از PFN و سه روش مدرن را در کنار هم نشان می‌دهد. امکان دسترسی به نرخ تکرار بسیار بالا، سادگی تنظیم مشخصات پالس، ماژولار بودن سیستم، کم بودن زمان صعود و نزول پالس و تنوع روش پیاده‌سازی ویژگی‌هایی است که باعث شد تا ما در این پروژه ساخت مدولاتور را با روش استفاده از سوئیچ نیمه‌هادی دنبال کنیم. از میان روش‌های مدرن روش شکل ۴-ج انتخاب شد. ساده و عملیاتی بودن مدار سوئیچینگ، کارکرد مدارات قدرت (شارژ و سوئیچینگ) در ولتاژ پایین بواسطه استفاده از ترانس پالس، محدودیت شیب افزایش جریان بواسطه وجود ترانس پالس و کم بودن ریبیل‌های فرکانس بالا در قسمت سطح پالس دلایل انتخاب این روش هستند.

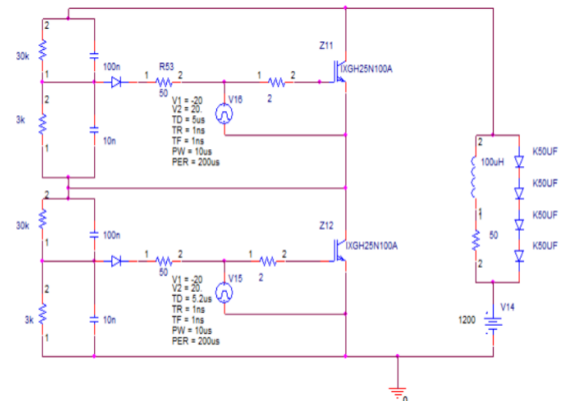
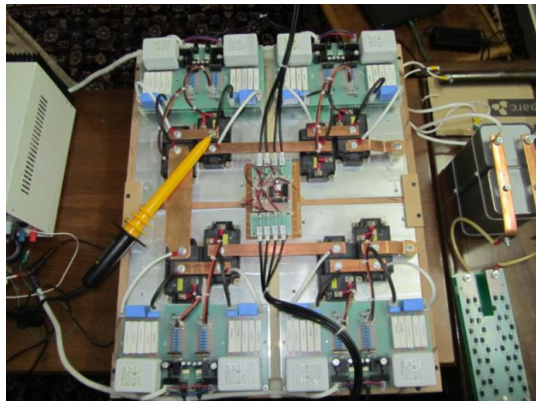


شکل ۴: انواع متداول مدولاتورهای مدرن؛ الف- چیدمان‌های مولد مارکس پایه گذاری شده بر اساس سوئیچ‌های نیمه هادی، ب- روش پایه گذاری شده بر اساس سوئیچ مستقیم، ج- روش یکپارچه پایه گذاری شده بر اساس ترانس پالس، د- روش مجزا پایه گذاری شده بر اساس ترانس پالس و و- روش استفاده از مبدل‌های رزونانسی

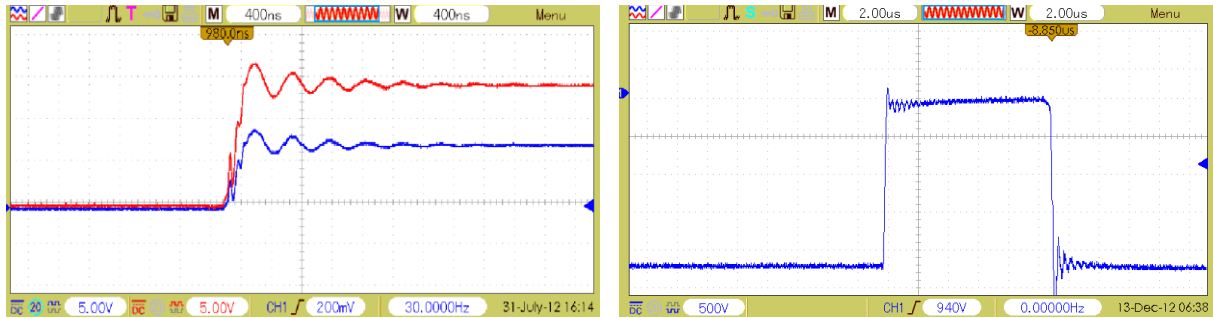
ساخت نمونه آزمایشگاهی و نتایج آن:

در روش انتخابی یک بانک خازنی ولتاژ متوسط از طریق یک شارژر خازنی، شارژ می‌شود. سپس این ولتاژ از طریق یک بانک سوئیچ به اولیه ترانس پالس اعمال می‌گردد. ترانس پالس از نوع افزایشنده بوده و در سمت ثانویه سطح

ولتاژ موردنیاز برای اعمال مستقیم به پایانه‌های کاتد و بدنه لامپ را فراهم می‌کند. در نتیجه در اولیه ترانس پالس نیازی به ولتاژ بالا نیست. از اینرو در قدم اول طراحی و ساخت مولد ۸ کیلو ولتی در دستور کار قرار گرفت. برای سوئیچ این مولد از سوئیچ‌های IGBT استفاده شده است. این سوئیچ‌ها بواسطه توان بالا، سرعت، قیمت و دسترسی آسان گزینه مناسب هستند. در نمونه ساخته شده، سیگنال درایورگیت هر کدام از IGBT ها از طریق یک فرستنده و گیرنده نوری و کابل فیبرنوری مجزا تأمین می‌گردد که این امر در ایزولاسیون ولتاژی و همزمانی سیگنال گیت ها تاثیر بسزایی دارد. هر برد درایور شامل یک تغذیه مثبت ۱۶ ولت جهت روشن شدن و یک تغذیه منفی ۸- ولت جهت خاموش شدن می باشد. تغذیه و سیگنال تریگر هر یک از IGBT مجزاً بوده و سیگنال تریگر همه IGBT ها از یک برد مشترک تأمین می‌گردد. در مجموع ۸ ترانزیستور IGBT وجود دارد که به دلیل ایزوله نبودن کلکتور و امیتر از سطح بین آن، آن‌ها را به صورت مجزا در هیت سینک‌های مختلف نصب نموده ایم. سطح تحمل ولتاژ هر یک از IGBT ها ۱۲۰۰ ولت است. مدارات توازن گر ولتاژ نیز جهت برقراری توازن ولتاژ میان سوئیچ‌ها در نظر گرفته شده است تا از (over-voltage) شدن و آسیب دیدن ترانزیستورها جلوگیری شود. در شکل ۵-الف شماتیک مداری دو طبقه از مدار آورده شده است. شکل ۵-ب نیز کل مولد ساخته شده ۸ طبقه را نشان می‌دهد. شکل ۶-الف سیگنال خروجی حدود سه کیلو ولت، ۱۰۰ هرتز با عرض پالس ۱۰ میکرو ثانیه را که از اسیلوسکوپ ذخیره شده‌است را نشان می‌دهد. و شکل ۶-ب نیز ولتاژ دو تا از سوئیچ‌های اندازه‌گیری شده در عمل در لحظه روشن شدن است که همزمانی مطلوب از مرتبه نانو ثانیه را برای سوئیچینگ نشان می‌دهد.



شکل ۵: الف- شماتیک مداری دو طبقه از مدار و ب- مولد ۸ طبقه ساخته شده



شکل ۶: الف-پالس حاصل از مولد اندازه‌گیری شده در اسیلوسکوپ و ب-ولتاژ دو تا از سوئیچ‌ها هنگام روشن شدن

نتیجه‌گیری:

یکی از مهمترین قسمت‌های شتابدهنده‌های خطی الکترون، زیر سیستم RF آن است که وظیفه تامین موج رادیو فرکانسی توان بالا را برای تیوب شتابدهی بر عهده دارد. کلاسترون‌ها از رایج ترین تقویت کننده‌های توان بالای RF می‌باشند که با توان خروجی در رنج چند صد کیلووات تا چند ده مگاوات، کاربرد گسترده‌ای در انواع شتابدهنده‌ها دارند. این لامپ‌ها برای کار به پالس‌های با ولتاژ و جریان بالا نیاز دارد که بوسیله مدولاتور پالس تولید می‌شود. پالس حاصل از مدولاتور، برای اعمال بین آند و کاتد کلاسترون مورد نیاز است. مدولاتور توان خط AC ورودی برق را به توان پالس ولتاژ بالا تبدیل می‌کند. منبع شارژ، امپدانس شارژ، المان ذخیره کننده انرژی، سوئیچ و افزایشده سطح ولتاژ اجزای اصلی هر مدولاتوراند که بر این اساس مدولاتورها به انواع کلاسیک و مدرن تقسیم می‌شوند. در انواع مدرن مدولاتورها از سوئیچ‌های نیمه‌هادی استفاده می‌شود. در این پروژه روش یکپارچه پایه گذاری شده بر اساس ترانس پالس بکار گرفته شده که در آن ۸ طبقه سوئیچ IGBT بکار رفته است. خروجی‌های بدست آمده تطابق طراحی و عمل را نشان می‌دهند. که در آن‌ها نمونه اولیه پالس و همزمانی سوئیچینگ بخوبی بدست آمده است.

مراجع:

[۱]. C.J. Karzmark, Medical Linear Accelerator, Department of radiation Oncology, Stanford University, McGRAW-HILL, 1993

[۲]. فرشاد قاسمی، طراحی و ساخت کاواک تیوب شتابدهنده خطی الکترون، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه کاربرد پرتوها دانشکده مهندسی هسته‌ای دانشگاه شهید بهشتی، ۱۳۸۸

[۳]. G. Schaffer, 'Components for High Power RF System in Modern Accelerators', Lecture given at the 3rd Workshop, New Techniques for Future Accelerators, May, 1987

[۴]. Varian company, Clinac Hand book, 2003

[۵]. G. Caryotakis, 'The Klystron: A Microwave Source of Surprising Range and Endurance', Phys. Plasmas 5, 1997.