



بررسی محدوده فرمان‌پذیری و زمان وصل در یک کلید گازی سه الکترودی با حالت‌های آتش همقطبش و ناهمقطبش

مجید آرام*

مرکز تحقیقات لیزر، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۱۵۵-۱۳۳۹، تهران - ایران

چکیده: کلید گازی سه الکترودی «تریگاترون» در مدار مولد جریان ولتاژ اغلب لیزرهای گازی فشار بالا مانند لیزر گازکربنیک و ازت بکار می‌رود. در این مقاله مشخصاتی همچون حداقل ولتاژ شکست و زمان اتصال در یک کلید گازی سه الکترودی با تغییر فشار گاز درون کلید، که گاز ازت بوده است و فاصله بین الکترودها در دو آرایش آتش همقطبش و ناهمقطبش بررسی شده است. نتایج تجربی حاصل در پاره‌ای از موارد با نتایج کار دیگران تطابق داشته و در مواردی هم جدید بوده‌اند. این نتایج بطور کلی حاکی از آنند که بهترین وضعیت به لحاظ سرعت اتصال کلید با آرایش آتش «ناهمقطبش» بدست می‌آید. علاوه بر این با چنین آرایشی، محدوده ولتاژ کار قابل کنترل، یعنی محدوده‌ای که در آن کلید بدون فرمان آتش عمل نمی‌کند، بزرگتر از حالت آرایش «همقطبش» است.

واژه‌های کلیدی: کلید جرقه سه الکترودی، کلیدهای گازی ولتاژ بالا، آرایش‌های آتش

Characteristics Study of a Trigratron with Homo and Hetero-Polar Triggering Configurations

M. Aram*

Laser Research Center, AEOL, P.O. Box: 14155-1339, Tehran - Iran

Abstract: Three electrodes spark gap (Trigratron) is widely used in the pulsed high voltage generator circuit in most of the high pressure gas lasers, such as carbon dioxide and nitrogen lasers. In this work switch parameters such as minimum breakdown voltage and switching time of a trigratron under different experimental conditions such as nitrogen gas pressure and discharge gap are investigated. The experimental results are in good agreement with other researcher's results where some of them have not been already demonstrated. The results have shown that the best condition of switching speed will be reached by using hetero-polar triggering configuration. Also, by using the hetero-polar triggering configuration the controllable operation area of switching voltage, i.e. the voltage area where the switch is not operational without triggering, is higher than homo-polar configuration.

Keywords: three electrode spark gap, gaseous high voltage switches, trigger configurations

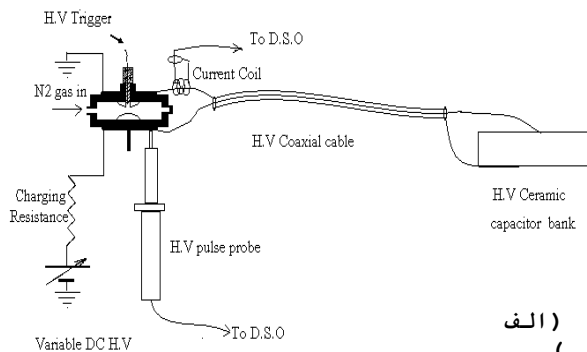
**۱- مقدمه**

بار الکتریکی از منبع متصل به الکترودهای اصلی سبب تقویت درجه یونش محیط و در نهایت اتصال الکترودهای اصلی و بسته شدن کلید می‌گردد. در این رابطه، یک بررسی تجربی که در ولتاژ بالا در محدوده‌ای تا ۵۰ کیلوولت، و شکاف تخلیه تا ۹ میلی‌متر انجام گرفته، نشان داده است که آرایش ناهمقطبش کارایی بهتری دارد [۳]. چنین کلیدی بدلیل ارزان بودن و سادگی ساخت و راه‌اندازی، نسبت به کلیدهای گازی ولتاژ بالای دیگر مانند تایراترون^(۲) [۶]، به ویژه امکان گذار به حالت اتصال در محدوده زمانی کمتر از ۱۰ نانوثانیه، به طور گسترده در مدار تحریک لیزرهای گازی با بسامد پائین بکار برده شده است [۷ و ۸]. یکی از نقاط ضعف تریگاترونهای معمولی نسبت به تایراترون، پایین بودن جریان وصل در آن است، بدین معنی که اگر مقاومت، اهمی یا سلفی، جداکننده بین کلید و منبع ولتاژ پیوسته به حد کافی بزرگ نباشد کلید در حالت وصل باقی می‌ماند، در نتیجه تایراترون با راحتی بیشتری در بسامدهای بالا، از مرتبه کیلوهرتز، به ویژه برای راه‌اندازی لیزرهای گازی با بسامد بالا بکار برده شده است [۹]. ولی اخیراً نمونه‌هایی خاص از کلید تریگاترون با بسامدی از مرتبه کیلوهرتز مورد بررسی قرار گرفته [۱۰] و نمونه‌ای نیز با کاربرد در تحریک لیزرهای گازی تکرار بالا گزارش داده شده است [۱۱]. نکته دیگر در مقایسه این دو کلید این است که در تایراترون تخلیه به صورت افروخته است که آسیب کمتری به سطح الکترودها وارد می‌شود ولی حداکثر قله جریان عبوری قابل تحمل برای تایراترون در بهترین شرایط بسیار کمتر از تریگاترون، در حدود ۲۰ کیلوآمپر است. در صورتی که تریگاترون با طراحی مناسب، استفاده از فلزهای دیرگداز در ساخت الکترودها و گازهای با ضریب دی‌الکتریک

کلید گازی سه الکترودی، ۳۳ تریگاترون^(۱)، نخستین بار توسط کراگ، هاین و میک معرفی شده است و از آن زمان به عنوان کلید قابل کنترل سریع و نسبتاً ارزان در کلیدزنی ولتاژ پیوسته بسیار بالا، میلیون ولت، و با قابلیت عبوردهی قله جریان از مرتبه میلیون آمپر بکار می‌رود [۱ و ۲]. علاوه بر این، فرایندهای فیزیکی تخلیه ضربانی فشار بالا در چنین کلیدهایی نیز به صورت تجربی [۳] و نظری [۴ و ۵] مورد بررسی قرار گرفته‌اند. الکترودهای این کلید به ترتیب عبارتند از: دو الکترود اصلی، که یکی در ولتاژ مرجع (زمینه مشترک مدار) و دیگری در ولتاژ بالا قرار می‌گیرد، و یک الکترود که ولتاژ ضربانی آتش بین آن و الکترود مرجع اعمال می‌گردد. اصولاً آرایش آتش در این کلید را برحسب اینکه ولتاژ (ضربانی) بکاررفته برای راه‌اندازی آن موافق یا مخالف با ولتاژ «الکترود ولتاژ بالا» باشد به دو گروه همقطبش و ناهمقطبش تقسیم بندی می‌کنند. در آرایش همقطبش که علامتهای ولتاژ ضربانی آتش و ولتاژ بالای «پیوسته» یکسانند، تابش فوتونهای ناشی از تخلیه جرقه ابتدایی بین الکترود آتش و الکترود مرجع به محیط گازی بین الکترودهای اصلی، به ویژه ناحیه مجاور الکترود ولتاژ بالا، باعث تولید بهمن‌های الکترونی می‌شود که برحسب قطبش ولتاژ بالای اعمال شده با پیشروی به سوی الکترود مرجع یا در خلاف سوی آن، سبب اتصال الکترودهای اصلی و بسته شدن کلید می‌گردد. اما در آرایش ناهمقطبش، به دلیل اختلاف در علامت، اندازه اختلاف ولتاژ بین الکترود آتش و الکترود ولتاژ بالا بیش از مقدار اختلاف ولتاژ بین الکترودهای اصلی است. بنابراین با اعمال ضربان ولتاژ آتش یک کانال پلاسمایی ضعیف بین الکترود اصلی ولتاژ بالا و الکترود مرجع، به واسطه الکترود آتش، ایجاد می‌شود که جریان یافتن



قطر ۲۲ میلی‌متر و ضخامت ۵ میلی‌متر ساخته شده است و با استفاده از پیچ متصل به وسط آن، امکان جابجایی در تمام طول شکاف تخلیه را با دقت ۱ میلی‌متر دارد. الکتروود مرجع، که در ولتاژ صفر قرار می‌گیرد، دارای یک برجستگی استوانه‌ای در وسط است که مشابه الکتروود ولتاژ بالا بوده ولی دارای یک سوراخ به قطر ۵ میلی‌متر در وسط می‌باشد که نوک الکتروود آتش‌کننده از سمت خارج در وسط آن قرار می‌گیرد. محیط حاوی گاز دارای گاز ازت با خلوص ۹۹/۹۹٪ است. خازن بکار رفته متشکل از ۱۶ خازن سرامیکی سریع با تحمل ولتاژ ۳۰ کیلوولت است. منبع ولتاژ متغیر ۰-۳۰ کیلوولت، ساخت universal voltronics به همراه یک مقاومت ۱/۵ مگا اهم برای تأمین ولتاژ تغذیه خازن‌ها بکار رفته است. برای کاهش اثر خودالقایی مدار از یک کابل هم محور ولتاژ بالا با خودالقایی ۰/۵ میکروهانری و ظرفیت ۳۵ پیکوفاراد و برای ایجاد ضربان آتش نیز از یک مولد ضربان ولتاژ بالا دو حالت EG&G TM-12 A استفاده شده که ضربان خروجی آن در وضعیت بدون بار در شکل ۳ نشان داده شده است. اندازه‌گیری تغییرات ولتاژ کلید و جریان عبوری از آن به ترتیب با یک کاونده ولتاژ ۱:۱۰۰۰ P6015A Tektronix و یک مبدل جریان ۱:۴۰ Pearson 1025 electronics انجام گرفته و مشاهده و ثبت نتایج نیز با یک نوسان‌نمای 3052 Tektronix صورت گرفته است.



الف)

بالا، مانند SF_6 ، می‌تواند قله جریان‌های از مرتبه ۱۰۰ کیلوآمپر را عبور دهد. مزیت مهم تریگاترون نسبت به کلید جرقه^(۳) امکان کنترل فرایند بسته شدن کلید در کلید جرقه بسته شدن کلید تنها به وسیله ولتاژ شکست خودبخودی آن، که با رابطه پاشن^(۴) ($V_B=f(Pd)$) بیان می‌شود [۱]، کنترل می‌گردد و دارای پرش‌های آماری^(۵) ذاتی می‌باشد. در صورتی که در تریگاترون به سبب وجود الکتروود اضافی که عمل آتش را انجام می‌دهد می‌توان این کلید را به صورت کنترل شده در ولتاژ کمتر از حالت شکست خودبخودی راه‌اندازی کرد. علاوه بر این در صورت کنترل دمایی محیط گازی درون کلید، تمییز نگه داشتن سطح الکتروودها و استفاده از مولد آتش با پرش آماری کم، تریگاترون می‌تواند با پرش آماری خیلی پایین عمل کند به نحوی که امکان استفاده از آن در آزمایش حساسی مانند اندازه‌گیری ضریب بهره^(۶) لیزرهای ضربانی سریع با روش نوسانگر-تقویت‌کننده^(۷) وجود داشته باشد [۱۲]. این موضوع یک مزیت نسبی دیگر برای تریگاترون در مقایسه با تیراترون است، زیرا کلید تیراترون با پرش آماری ذاتی «حدود ۱۰ نانوثانیه» بسیار گرانبیتم و حساستر از تریگاترون است. (لازم به ذکر است که پرش‌های آماری در فرایند وصل شدن کلید به شدت تابع کیفیت اجزای کلید، ساختار هندسی آن، همچنین پرش‌های آماری در ضربان آتش می‌باشد به طوری که دو کلید گازی با محدوده کاری یکسان ممکن است از این لحاظ در حد زیادی با یکدیگر متفاوت باشند و این عامل در قیمت کلید نقش تعیین‌کننده‌ای دارد).

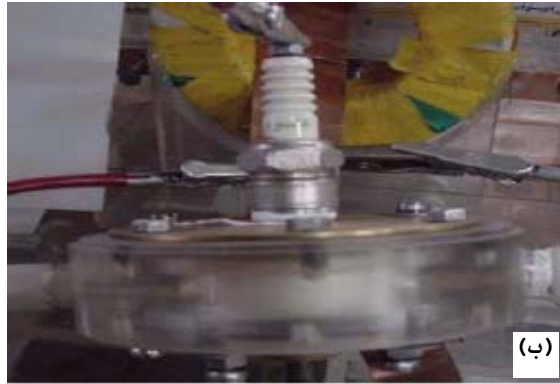
۲- آرایش تجربی

آرایش تجربی و نمایی از کلید گازی در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. بدنه کلید از پلیمر شفاف، پرسپکس و الکتروودها از برنج ساخته شده‌اند. الکتروود متصل به ولتاژ بالا به شکل استوانه با

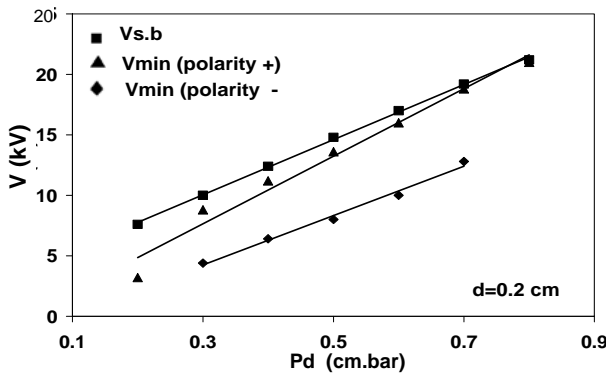


در شکل ۳ فاصله الکترودها ۲ میلی‌متر بوده و فشار گاز از ۱ تا ۴/۵ جو تغییر کرده است، در صورتی که در شکل ۴ فشار گاز در ۱/۵ جو ثابت بوده و فاصله الکترودها از ۱ تا ۶ میلی‌متر تغییر داده شده است.

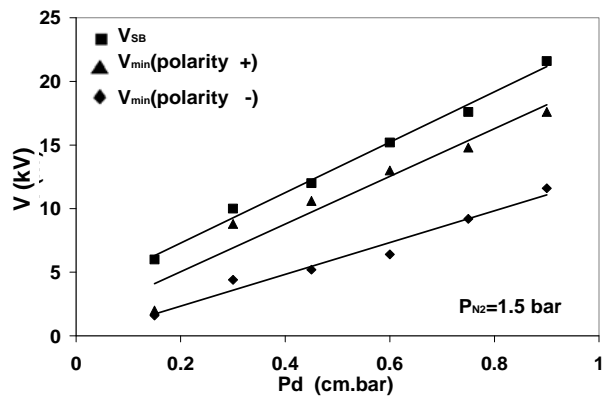
همانطور که در شکل ۳ دیده می‌شود فاصله $V_{min(-)}$ تا V_{SB} تقریباً ثابت بوده است اما فاصله $V_{min(+)}$ تا V_{SB} به سرعت کاهش یافته تا نهایتاً به V_{SB} رسیده است که به معنای شکست خودبخودی کلید می‌باشد و این وضعیت با نتایج گزارش داده شده در مرجع شماره ۴ بطور کیفی در تطابق است. البته د ۲۵



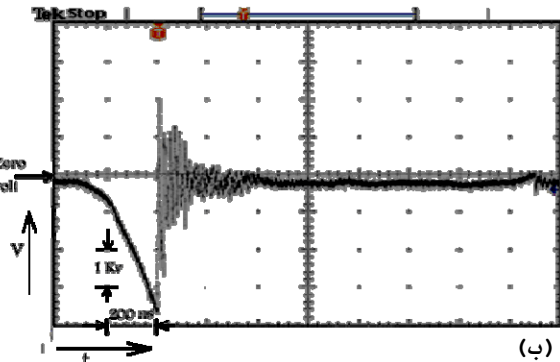
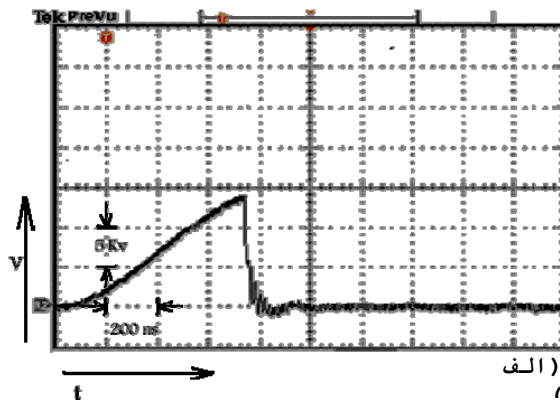
شکل ۱- (الف) آرایش تجربی بکار رفته (ب) عکس کلید جرقه سه الکترودی (تریگاترون).



شکل ۳- تغییر ولتاژ شکست کلید تریگاترون برحسب حاصلضرب فشار، p، و فاصله الکترودها، d.



شکل ۴- تغییر ولتاژ شکست کلید تریگاترون برحسب حاصلضرب فشار، p، و فاصله الکترودها، d. گزارش فوق چون فاصله الکترودها بیش از کار فعلی بوده و نوع گاز بکار رفته نیز متفاوت می‌باشد، محدوده ولتاژ کاری افزایش یافته است.



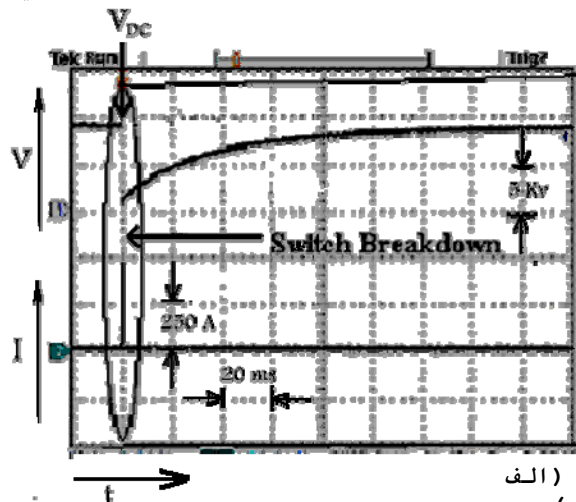
شکل ۲- تغییرات زمانی ولتاژ آتش با حداکثر دامنه در دو وضعیت (الف) برای آرایش همقطبش (ب) برای آرایش ناهمقطبش.

۳- بررسی نتایج تجربی

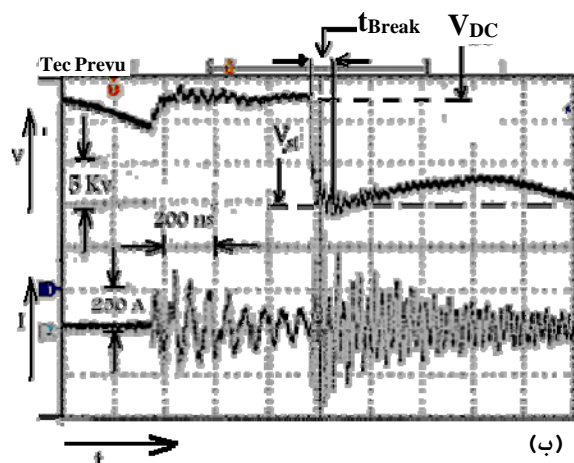
ابتدا حداقل ولتاژ شکست کلید با حداکثر ولتاژ آتش در هر دو آرایش همقطب و ناهمقطب برحسب فشار گاز ازت و فاصله الکترودها اندازه‌گیری شد (شکل‌های ۳ و ۴). در این شکل‌ها $V_{min(+)}$ ، $V_{min(-)}$ و $V_{S.B}$ ترتیب مربوط به شکست خودبخودی، در اثر افزایش ولتاژ و بدون فرمان، شکست با فرمان همقطبش و شکست با فرمان ناهمقطبش می‌باشد.



در ادامه کار، تغییرات زمان وصل کلید در سه حالت با فشار ثابت، با فاصله الکترودهای ثابت و با حاصل ضرب فشار در فاصله الکترودهای ثابت با تغییر ولتاژ کار آن با آرایش آتش نا همقطبش بررسی شد: در دو حالت اول ولتاژ مساوی



(الف)



(ب)

شکل ۵- تغییرات زمانی ولتاژ کلید و جریان عبوری از آن در مقیاسهای زمانی مختلف الف- مقیاس زمانی ۲۰ میلی ثانیه، ب- مقیاس زمانی ۲۰۰ نانو ثانیه. رفتارهای زمانی V و I بترتیب در تصاویر بالا و پائین نشان داده شده‌اند.

حداقل ولتاژ شکست کلید با وجود ضربان آتش است، ولی حالت سوم از حداقل ولتاژ کار کلید شروع شده و تا مقداری کمتر از ولتاژ شکست خودبخود ادامه داده شده است.

در شکل ۶ تغییرات زمان وصل کلید بر حسب شدت میدان الکتریکی

اکنون با توجه به شکل ۴، که فاصله الکترودها در فشار ثابت افزایش داده شده است، در این حالت فاصله V_{min} تا V_{SB} تقریباً ثابت است، در حالی که فاصله V_{min} از V_{SB} بتدریج زیاد شده که به معنای افزایش محدوده فرمان‌پذیری کلید است. این وضعیت را، که به معنای افزایش تأثیر فرمان آتش در آرایش همقطبش بر عملکرد تریگاترون بوده و در مراجع دیگر گزارش داده نشده است، می‌توان با در نظر گرفتن عامل پوشش آزاد میانگین^(۸) برای فوتونهای تولید شده توضیح داد. پوشش آزاد میانگین عامل مهمی در گسترش فوتونهای فرابنفش حاصل از جرقه در محیط گازی است و بیشترین میزان فوتیونش در این فاصله از منبع مولد جرقه در محیط گازی رخ می‌دهد [۱۳]. با این ترتیب و با توجه به توضیحات داده شده در ابتدای مقاله در رابطه با بسته شدن کلید با آرایش همقطبش، می‌توان نتیجه گرفت که در این حالت، پوشش آزاد میانگین فوتون در محیط گاز از حداقل در حدود ۶ میلی‌متر است. یادآوری می‌شود که با این سیستم امکان افزایش بیشتر فاصله و حصول حالت بهینه وجود نداشت. پس از این مرحله مشخصات مربوط به رفتار زمانی کلید در طی گذار از حالت قطع به حالت وصل بررسی شد. تغییرات زمانی ولتاژ و جریان کلید در شکل ۵ نشان داده شده است.

چگونگی گذار به حالت وصل و سنجه‌های مورد استفاده در بیان مشخصات زمانی کلید در شکل ۵ مشخص شده‌اند. از شکل ۵- ب مشخص است که قسمت اعظم جریان تخلیه در طی مدت زمان نشان داده شده با t_{Break} از کلید می‌گذرد که در طی آن ولتاژ سر کلید از ولتاژ منبع تغذیه به یک مقدار تقریباً ثابت، V_{steady} افت می‌کند که بعد معلوم شد این وضعیت مربوط به سرعت پایین تخلیه خازنهای سرامیکی است. بنابراین زمان فوق بعنوان سنجه نشان‌دهنده سرعت کلید مورد استفاده قرار گرفته است.



میدان الکتریکی خارجی به کیلوولت بر سانتی‌متر و k_T ضریبی به نام به "ثابت توپلر" است که مقدار آن برای گاز ازت داده شده است.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

بهترین آرایش از لحاظ قطبش نسبی ولتاژ آتش و ولتاژ تغذیه در یک کلید گازی سه الکترودی که برای دستیابی به حداکثر کنترل‌پذیری و حداقل زمان بسته شدن، مورد بررسی قرار گرفته نشان داده است که با آرایش ناهمقطبش، حداکثر بازه ولتاژ کار کنترل‌پذیر برای این کلید، صرف‌نظر از تغییر فشار یا فاصله الکترودها بدست می‌آید. چنانچه حاصلضرب فشار در فاصله الکترودها نیز در حداقل ممکن، به شرطی که در ولتاژ کار

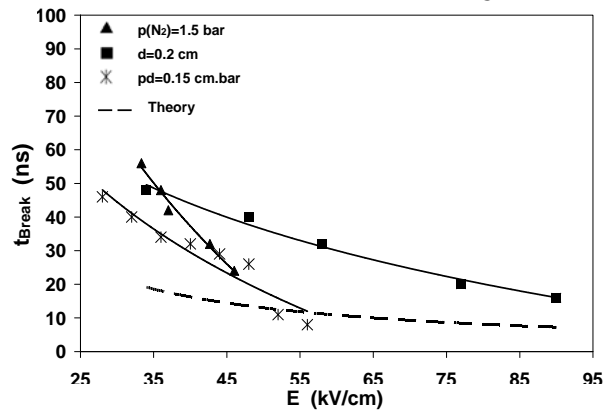
مورد نظر کلید خود-راه اندازی نشود، تنظیم گردد زمان بسته شدن کلید نیز به کمترین مقدار خود خواهد رسید و این برتری تریگاترون نسبت به کلید جرقه و تایراترون، در ولتاژ کار یکسان است. کلید جرقه، گرچه دارای کمترین زمان وصل است ولی بطوری که گفته شد، ولتاژ کار آن تنها تابع حاصلضرب فشار در فاصله الکترودها است، علاوه بر این پرشهای آماری ذاتی آن بسیار بیشتر از دو کلید دیگر است. از طرف دیگر کلید تایراترون با آنکه مانند تریگاترون کنترل‌پذیر بوده و پرشهای آماری آن

همکاری در انجام آزمایشهای عملی و از آقای مهندس سید حسین فخرايي و سرکار خانم مهندس فریبا منصوري بخاطر همکاری در تعمیر و راه‌اندازی سیستم مولد ضربهان آتش ابراز می‌دارد.

پي‌نوشتها :

- ۱- Trigatron
- ۲- Thyatron
- ۳- Spark Gap
- ۴- Paschen
- ۵- Gain

ناشی از ولتاژ تغذیه با آرایش آتش ناهمقطبش نشان داده شده است. بطوری که مشاهده می‌شود، کمترین زمان اتصال برای افزایش ولتاژ تا نزدیک حالت شکست خودبخود با حاصلضرب فشار در فاصله الکترودها ثابت حاصل شده و تا حدود ۱۰ نانوثانیه رسیده است. نمودار پیوستگی بر اساس رابطه توپلر که برای زمان وصل یک کلید گازی در حالت شکست خودبخود داده شده به این شرح است [۲]:



شکل ۶- تغییرات زمان وصل (t_{Break}) کلید برحسب شدت میدان الکتریکی خارجی با آرایش آتش ناهمقطبش.

(۱)

$$t_{Break} \text{ (ns)} \cong 13 * 10^6 \frac{k_T}{E(\text{kv})}$$

$$k_T = 0.05 \text{ (kv.s/cm)}$$

در این رابطه t_{Break} زمان تخلیه الکتریکی در گاز، یعنی همان زمان وصل کلید، به نانوثانیه، E شدت خیلی کمتر از کلید جرقه است ولی زمان وصل آن به دلیل محدود بودن شیب تغییر ولتاژ و جریان، که از مشخصات آن بوده و توسط سازنده اعلام می‌گردد، بیشتر از تریگاترون است به طوری که بی‌توجهی به این عامل سبب آسیب‌دیدگی کلید و از کار افتادن آن می‌گردد.

تشکر و قدردانی

نگارنده بدینوسیله مراتب سپاس و امتنان خود را از آقایان مجید دارابی و ابوالفضل جمهوری بخاطر



۸- Mean Free Path

۶- Jitter

۷- Oscillator-Amplifier

References:

1. E. Kauffel and W. S.Zaengel "High voltage engineering fundamentals," pergamon press, chapter 2&5 (1984).
2. M.A. Gundersen, "Gas-phase pulsed power switches," IEEE.Trans.Plasma Sci., **19**, 1123-1131 (1991).
3. J.M. Koutsoubis, S.J. MacGregor, S.M. Turnbull, "Triggered switch performance in SF₆, air, and an SF₆/air mixture," IEEE.Trans.on Plasma Science, **27**, 272-281 (1999).
4. P.F. Willams and F.E. Peterkin, "Triggering in trigatron spark gaps:a fundamental study," J.Appl.Phys., **66**, 4163-4175 (1989).
5. S.K. Dhali, P.F. Willams, "Two-dimensional studies of streamers in gases", J.Appl.Phys., **62**, 4696-4707 (1987).
6. F. Frungel, "High speed pulse technology," Academic press, vol. **1**, ch 2 (1965).
7. ا. حریری، م. ترکاشوند، ف. اردوانی، ع. یراقچی، "بررسی تجربی لیزر ازت مولکولی که به طریق عرضی فعالیت می کند،" نشریه علمی سازمان انرژی اتمی ایران، **۳**، (پائیز ۱۳۶۲).
8. M. Aram, F. Soltanmoradi, A. Behjat, "Investigation on parallel spark array pre-ionization TEA CO₂ laser," Proceedings SPIE, 6th Int.A.M.P.L, Tomsk,Russia, **5483**, 43-50 (2003).
9. R. Marcheti, E. Penco, G. Salveti, "Sealed, miniaturized, corona-preionized, high-repetition-rate TEA-CO₂ laser using hydrogen buffered gas mixtures," IEEE.J.Quantum Electron., QE-21, 1766-1771 (1985).
10. S.J. MacGregor, S.M. Turnbull, F.A. Tuema, O. Farish, "Factors affecting and methods of improving the pulse repetition frequency of pulse-charged and DC-charged high-pressure gas switches," IEEE.Trans.on Plasma Sci., **25**, 110-117 (1997).
11. R. Tan, C. Wan, J. Qi, S. Liu, J. Zhou, W. Xie, J. Wu, "A sequential discharge TEA CO₂ laser with high repetition rate and high output power," Optics and Laser Technology, **31**, 393-396 (1999).
12. S. Ghoreyshi, K. Rahimian, A. Hariri, "Gain and saturation energy measurments in low pressure longitudinally excited N₂-lasers," opt.communications, **238**, 139-149 (2004).
13. O.P. Judd and J.Y. Wada, "Investigations of a UV preionized electrical discharge and CO₂ laser," IEEE.J.quantum .Electron., QE-10, 12-20 (1974).