

## بهینه سازی طراحی الکترودهای مولد پلاسمای کانونی مینیاتوری با ابزار تصویربرداری از ستون تنگش

جعفری، حسین - حبیبی، مرتضی - اطاعتی، غلامرضا

(<sup>۱</sup>) دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی هسته ای و فیزیک، گروه مهندسی گداخت هسته ای

### چکیده

در این پژوهش پس از طراحی و ساخت یک مولد پلاسمای کانونی اقدام به بررسی عملکرد آن توسط ابزارهای تشخیصی مختلف شد تا ابعاد بهینه الکتروود مولد تعیین گردد. نتایج به دست آمده از پیچه روگوفسکی به همراه نتایج پروب ولتاژ فشار قوی و عکس‌های دوربین عکسبرداری دیجیتال نشان دادند که وقوع تنگش در این دستگاه در فشار گاز آرگن در حدود ۱ الی ۱٫۱ تور و در ولتاژ شارژ ۸٫۵ الی ۸٫۸ کیلو ولت اتفاق می‌افتد. پس از انجام آزمایش‌های متعدد بر روی الکتروودها، از کاتد میله‌ای متشکل از ۶ میله مسی به عنوان هندسه بهینه کاتد انتخاب گردید. پس از دستیابی به تنگش، مقادیر پارمترهای طراحی در این دستگاه محاسبه شدند. دامنه‌ی جریان با شرایط بهینه‌ی کاری و با ولتاژ حدود ۸٫۸ کیلوولت و فشار گاز آرگون ۱ تور برابر ۷٫۵ کیلوآمپر اندازه‌گیری شد. در این صورت کمیت‌های ضریب سرعت و چگالی انرژی پلاسمای به ترتیب برابر  $184.9 \text{ A/cm.torr}^{1/2}$  -  $77.18$  و  $10^{10} \times 4.17 \text{ J/m}^3$  محاسبه شدند. مقادیر این کمیت‌ها نشان از تطابق آنها با مقادیر گزارش شده در مقالات علمی داشت، لذا این نتیجه نیز صحت عملکرد دستگاه را نشان داد.

کلمات کلیدی: مولد پلاسمای کانونی مینیاتوری ۳ ژول، پایداری عملکرد، سیگنال‌های تخلیه

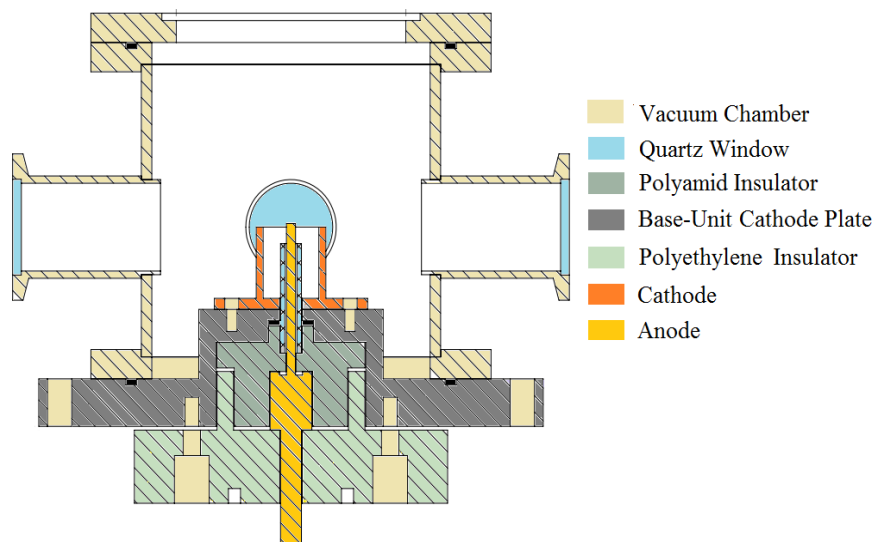
### مقدمه

مولد پلاسمای کانونی، دستگاهی است که بر پایه ی بروز پدیده‌ی تنگش پلاسمای در انتها الکتروود مرکزی، به کمک عبور یک جریان بسیار بالا از یک گاز کم فشار شرایط وقوع برهمکنش‌های گداخت گرما هسته‌ای را فراهم می‌آورد. این دستگاه قادر به تولید پلاسمای داغ و چگال (به ترتیب در حدود ۱ keV و  $10^{20} \text{ m}^{-3}$ ) با نیمه عمر کوتاه است [۱-۳]. با توجه به این‌که در مولدهای

پلاسمای کانونی مینیاتوری تمام فرایندهای فیزیکی آن در مقایسه با دستگاه‌های بزرگتر، طراحی و بهینه‌سازی الکترودهای آن بسیار دشوار بوده و نیاز به آزمایش‌های گوناگونی دارد. از این رو با توجه به روند رو به رشد تحقیقات گداخت هسته‌ای در کشور و سیر مطالعات محققین بر روی دستگاه‌های پلاسمای کانونی در گستره‌ی انرژی‌های پایین‌تر از کیلو ژول [۴]، در گام اول اقدام به طراحی و ساخت یک مولد پلاسمای کانونی بسیار کوچک با انرژی ۳ ژول گردید. سپس بررسی عملکرد آن توسط ابزارهای تشخیصی مختلف در دستور کار قرار گرفت تا ابعاد بهینه الکتروود مولد تعیین گردد.

### چیدمان آزمایش

مولد پلاسمای کانونی مورد استفاده در این پژوهش دارای یک بانک خازنی با ظرفیت اسمی  $84 \text{ nF}$  و ولتاژ شارژ  $15 \text{ kV}$  است که از ۱۲ عدد خازن سرامیکی  $7.2 \text{ nF}$  با اتصال موازی تشکیل شده است. اتصال بانک خازنی به الکترودهای محفظه‌ی مولد پلاسمای از طریق یک کلید اسپارک گپ و با کمترین اتصالات انجام شده است تا کمترین مسیر عبور جریان (کمترین امپدانس مدار) ایجاد شود. به منظور کاهش اندوکتانس سیستم به حداقل مقدار ممکن نیز اتصالات خازن‌ها و نیز ارتباط بانک خازنی به کلید و الکترودها به صورت کاملاً هم‌مرکز و متقارن انجام گردید. در شکل ۱ می‌توان تصویر جزئیات محفظه‌ی مولد پلاسمای ۳ ژول را به همراه هندسه‌ی الکترودهای آن مشاهده نمود.



شکل ۱: جزئیات محفظه‌ی مولد پلاسمای ۳ ژول را به همراه هندسه‌ی الکترودها.

در حین ساخت، به منظور افزایش میدان مغناطیسی القایی در ناحیهی قلهی آند، شکل آن را به صورت مخروطی صیقل داده تا امکان فشرده سازی پلاسما در این ناحیه افزایش یابد. در جدول ۱ مشخصات هندسی و الکتریکی مولد پلاسما مینیاتوری ۳ ژول آورده شده است.

جدول ۱: مشخصات هندسی و الکتریکی مولد پلاسما مینیاتوری ۳ ژول.

| مقدار         | کمیت             |                  |
|---------------|------------------|------------------|
| ۸/۵ - ۹ keV   | ولتاژ شارژ       | V                |
| ۷۶ nF         | ظرفیت بانک خازنی | C <sub>0</sub>   |
| ۲/۵ - ۳ J     | انرژی بانک خازنی | E                |
| ۷/۵ kA        | جریان تخلیه      | I                |
| ۱ - ۱/۱ Torr  | فشار گاز کاری    | P                |
| ۱/۲ mm        | شعاع آند         | a                |
| ۱/۷ mm        | طول موثر آند     | z <sub>a</sub>   |
| ۱۷ mm         | شعاع کاتد        | b                |
| ۱۴ mm         | طول موثر عایق    | L                |
| SS            | جنس آند          | mat <sub>a</sub> |
| SS/ Al/ Brass | جنس کاتد         | mat <sub>c</sub> |
| Pyrex         | جنس عایق         | mat <sub>i</sub> |

### ابزار اندازه گیری

با توجه به ابعاد بسیار کوچک ستون پلاسما در مولدهای کانونی مینیاتوری و نیز طول عمر بسیار کوتاه آنها، در این آزمایشها از ابزار اندازه گیری ویژه ای که از پاسخ زمانی بالایی برخوردار بودند استفاده شد. همچنین به دلیل این که سیگنال جریان این دستگاه دارای فرکانسهای بسیار بالایی است، بنابراین احتمال تداخل نوفه های محیطی با سیگنال اصلی مولد وجود دارد. لذا، برای نمونه برداری از سیگنال جریان مولد از یک پیچهی روگوفسکی با پهنای باند ۱۶ MHz (ساخت شرکت power electronic measurements ltd) و برای اندازه گیری ولتاژ تخلیه مولد از یک پروب ولتاژ فشار قوی با قابلیت اندازه گیری ولتاژ ۴۰ kVDC اندازه گیری می شود. دوربین دیجیتال بکار رفته در این آزمایشها ساخت شرکت canon با مدل PowerShot SX60 HS می باشد. این دوربین قادر به عکسبرداری با بزرگنمایی نوری ۶۵× است.

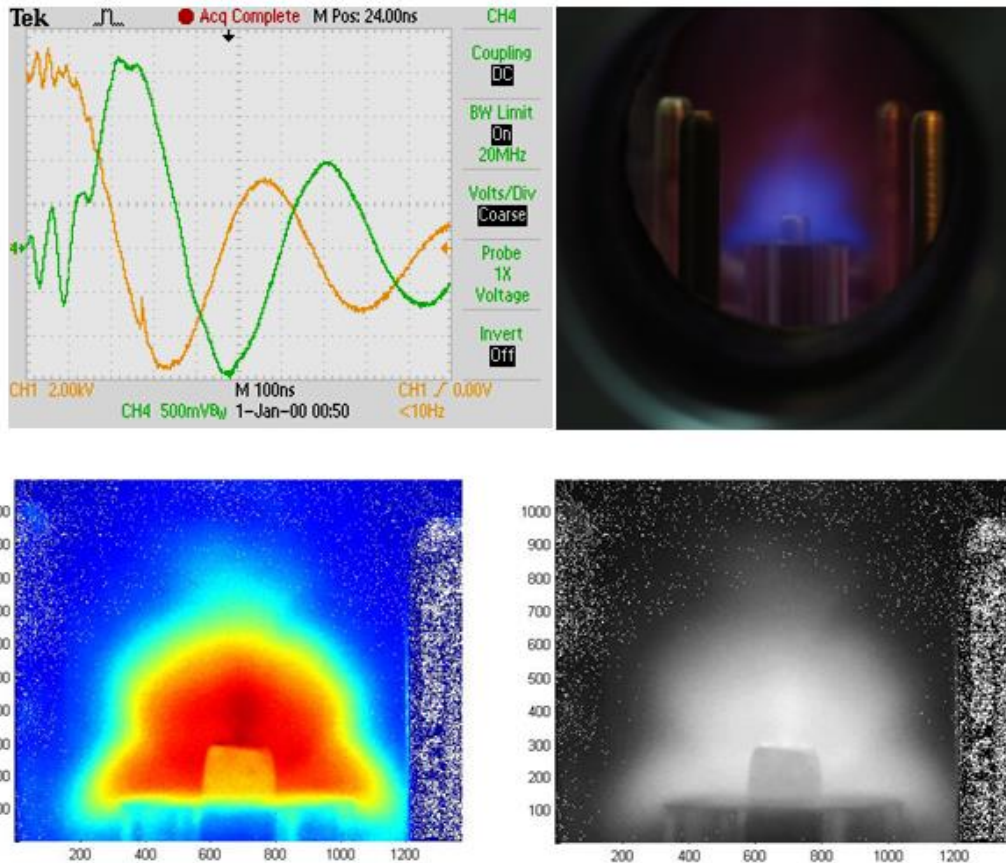
## نتایج آزمایشگاهی و بحث

پس از ساخت مولد پلاسمای مینیاتوری J ۳ بهینه سازی الکترودهای آن در دستور کار قرار گرفت بدین صورت که در طی آزمایش‌های مختلف از آند و کاتد مختلف (با جنس و ابعاد مختلف) استفاده شد. در اولین آزمایش، از آند با سر استوانه‌ای که دارای طول موثر  $4.53 \text{ mm}$  است (محاسبات آن در مرجع [۵] موجود است) استفاده شد. کاتد استفاده شده در این آزمایش نیز از نوع استوانه‌ای است که به ترتیب دارای ارتفاع و شعاع داخلی  $1.5 \text{ cm}$  و  $1.7 \text{ cm}$  می‌باشد.

با انجام آزمایش‌هایی تحت ولتاژ مذکور و فشار کاری در حدود  $3/5 \text{ torr}$  مشخص گردید که طول آند نسبت به طول کاتد زیاد است، به گونه‌ای که ستون پلازما به دلیل انرژی پایین مولد قادر به رسیدن به فاز شعاعی نیست. همچنین نتایج نشان دادند در فشارهای بالا، شدت نور گسیل شده از دستگاه بسیار بالا می‌باشد که این اتفاق می‌تواند به دلیل برانگیزش و وانگیزش کسر زیادی از گاز حاضر در محفظه باشد [۶]. با این وجود شروع فاز شکست از قسمت بالای الکترودها صورت گرفت. اما با کاهش فشار گاز آرگون از  $3/5$  تور به مقادیر کمتر از  $1/5$  تور، ضمن این که از شدت نور پوسته‌ی پلازما بسیار کاسته شد، انرژی کم بانک خازنی قادر خواهد بود که فازهای مختلف پلازما و نهایتاً فاز انبساط ستون پلازما را پدید آورد. لذا با برآیند نتایج آزمایش‌های فوق و نیز انجام آزمایش‌های متعدد با ارتفاع آند مختلف ارتفاع بهینه آند به اندازه‌ی ۵ میلی‌متر کوتاه‌تر از کاتد انتخاب گردید، ضمن این که فشار کاری دستگاه نیز به کمتر از  $1/5$  تور رسید. تحت این شرایط، مسیر جریان پوسته‌ی پلازما در امتداد کاتد با مقاومت کمتری مواجه گشته و پوسته‌ی پلازما به انرژی کمتری جهت دسترسی به قله‌ی آند نیاز خواهد داشت و امکان این که بخش ناچیزی از انرژی بانک خازنی که بعد از اتلاف در فازهای شکست و محوری در بانک باقی مانده است، بتواند در فاز شعاعی شرکت کرده و منجر به وقوع تنگش گردد، افزایش خواهد یافت. نکته دیگر در طراحی اولیه این مولد مینیاتوری این است که به دلیل پیوسته بودن کاتد، چگالی سطحی جریان در تمام سطح کاتد توزیع شده و رشته‌های تشکیل دهنده‌ی پوسته‌ی پلازما دارای جریان اندکی هستند. بنابراین در فاز بعد چیدمان کاتد به صورت میله‌ای و متشکل از ۶ میله مسی انتخاب گردید.

در شکل ۲ می‌توان سیگنال‌های ولتاژ و جریان تخلیه با فشار گاز آرگون ۱ تور و ولتاژ شارژ  $8/8$  کیلو ولت و همچنین عکس گرفته شده از ستون تنگش مربوط به فاز شتابگیری شعاعی (فاز تنگش) را مشاهده نمود. با دقت در سیگنال‌های جریان و ولتاژ تخلیه و همچنین تصویر گرفته شده از ستون

تنگش پلاسما مشاهده می شود که الکترو د میله ای طراحی شده به خوبی منجر به نتیجه مطلوب در ایجاد تنگش قوی شده است.



شکل ۲: سیگنال های تخلیه با فشار گاز آرگون ۱ تور و ولتاژ ۸/۸ کیلو ولت؛ ولتاژ تخلیه (کانال ۱) و جریان تخلیه (کانال ۲)؛ و عکس گرفته شده از ستون تنگش مربوط به فاز شتابگیری شعاعی (فاز تنگش).

لازم به ذکر است به منظور درک بهتر از عکس های گرفته شده از تنگش پلاسما در شکل ۲، ابتدا تصویر سیاه/سفید آن (تصویر سمت راست) را با بزرگنمایی در نرم افزار متلب<sup>۱</sup> نمایش داده و سپس جهت نمایش بهتر ستون تنگش تشکیل شده در فاز شعاعی دینامیک پلاسما از توزیع رنگی (شبه رنگی سازی) jet در نرم افزار متلب استفاده گردید. همانطور که از عکس سمت راست شکل ۲ مشخص است ستون تنگش در قسمت مرکزی آند به خوبی قابل مشاهده می باشد.

<sup>۱</sup> MATLAB

با توجه به حساسیت روگوفسکی استفاده شده که برابر  $2 \text{ mV/A}$  است، دامنه‌ی جریان تخلیه برای الکترودهای بهینه و تحت شرایط ولتاژ و گاز بهینه، (ولتاژ شارژ در حدود  $8/8$  کیلوولت و فشار گاز آرگون ۱ تور) از روی شکل موج جریان قابل اندازه‌گیری است. با دقت در سیگنال جریان، مقدار بهینه آن برابر  $7/5$  کیلوآمپر به دست آمد. در این صورت کمیت‌های ضریب سرعت و چگالی انرژی پلاسما به ترتیب برابر  $84/9 - 77/18 \text{ A/cm.torr}^{1/2}$  و  $4/17 \times 10^{10} \text{ J/m}^3$  به دست می‌آیند. با مقایسه این مقادیر با مقادیر ارائه شده در مرجع [۷] مشخص شد که کمیت‌های طراحی این دستگاه با مقادیر گزارش شده در مقالات علمی مطابقت بسیار خوبی دارند، لذا این نتیجه نیز صحت عملکرد دستگاه را نشان می‌دهد.

### نتیجه گیری

با توجه به آزمایش‌های انجام شده بر روی انواع مختلف الکترودها باید بیان کرد به دلیل انرژی بسیار پایین دستگاه، شروع فاز شکست در فشارهای بالای  $3/5 \text{ torr}$  از قسمت‌های بالایی الکترودها انجام می‌گیرد که نتیجه‌ی آن تشکیل یک پوسته‌ی نامتقارن و کاهش انرژی باقی مانده جهت فشرده سازی پوسته‌ی پلاسما در فاز شعاعی و تنگش است. اما هرچه از فشار گاز آرگون کاسته می‌شود، تشکیل و حرکت پوسته‌ی پلاسما از قسمت پایین الکترودها به خوبی آغاز شده که منجر به انتقال انرژی بیشتر به پوسته پلاسما، متناسب با فازهای مربوطه می‌شود. نتایج به دست آمده از پیچه روگوفسکی به همراه نتایج پروب ولتاژ فشار قوی و عکس‌های دوربین عکسبرداری دیجیتال نشان دادند که وقوع تنگش در این دستگاه در فشار گاز آرگن در حدود ۱ الی  $1/1$  تور و در ولتاژ شارژ  $8/5$  الی  $8/8$  کیلو ولت اتفاق می‌افتد.

### مراجع

1. Lee, S., et al., *A simple facility for the teaching of plasma dynamics and plasma nuclear fusion*. American Journal of Physics, 1988. **56**(1): p. 62-68.
2. Lee, S. and A. Serban, *Dimensions and lifetime of the plasma focus pinch*. Plasma Science, IEEE Transactions on, 1996. **24**(3): p. 1101-1105.
3. Verma, R., et al., *Miniature plasma focus device as a compact hard X-ray source for fast radiography applications*. IEEE Transactions on Plasma Science, 2010. **38**(4 PART 1): p. 652-657.
4. Leopoldo, S., et al., *Nanofocus: an ultra-miniature dense pinch plasma focus device with submillimetric anode operating at 0.1 J*. Plasma Sources Science and Technology, 2009. **18**(1): p. 015007.

5. Jafari, H. and M. Habibi, *Simulation of electrical discharge in a 3.6 Joule miniature plasma focus device using SIMULINK*. The European Physical Journal D, 2014. **68**(8): p. 1-11.
6. Hassan, S., et al. *Shadowgraphic and euv emission studies of low energy miniature plasma focus device*. in *2007 16th IEEE International Pulsed Power Conference*. 2007. IEEE.
7. Soto, L., et al., *Studies on scalability and scaling laws for the plasma focus: similarities and differences in devices from 1 MJ to 0.1 J*. Plasma Sources Science and Technology, 2010. **19**(5): p. 055017.