

Optoelectronic

Open
Access

ORIGINAL ARTICLE

Experimental Study of the Effect of Filter Thickness on Soft X-Ray in 5 kJ Mather Plasma Focus

Maryam Akbari Nasaji¹, Dariush Rostamifard², Noushin Pishbin^{3*}, Ali Nasiri⁴

1 Ph.D. Student, Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, Tehran, Iran.

2 Ph.D., Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, Tehran, Iran.

3 Assistant Professor, Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, Tehran, Iran.

4 MS.c., Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research, AEOI, Tehran, Iran.

Correspondence

Noushin Pishbin

Email: npishbin1985@gmail.com

How to cite

Akbari Nasaji, M., Rostamifard, D., Pishbin, N., Nasiri, A. (2023). Experimental Study of the Effect of Filter Thickness on Soft X-Ray in 5 kJ Mather Plasma Focus, *Optoelectronic*, 5(2), 53-60.

ABSTRACT

Soft X-ray is one of the primary forms of radiation in a plasma focus. Pin diode detectors, which provide integral and time-lapse manner, are commonly for soft X-ray detection. Among the pin diodes used for miniature generators, PBX65 is a notable choice. In this study, we employ attenuating filters (beryllium and aluminum) measure soft X-rays in front of the pin diode spectrometer channels. We experimentally investigate the effect of filter thickness on soft X-ray intensity. Notably, thinner filters exhibit higher X-ray transmission. Multiple parameters play a crucial role in the photodiode response and the efficiency of X-ray measurements in these devices. These parameters include the geometry of the filter maker, quantum efficiency of the photodiode, absorbers within the device, and the generation of X-rays from the working gas of the device. This article comprehensively examines the impact of these parameters.

KEYWORDS

Plasma Focus, Pin Diode, Soft X-Ray.

دوفصلنامه علمی
اپتوالکترونیک

«مقاله پژوهشی»

مطالعه تجربی اثر فیلتر بر پرتو پرتو ایکس نرم در پلاسمای کانونی مدر پنج کیلوژول

مریم اکبری نساجی¹، داریوش رستمی فرد²، نوشین پیش بین^{3*}، علی نصیری⁴

چکیده

یکی از اصلی‌ترین پرتوهای تابشی در پلاسمای کانونی، پرتو ایکس نرم است. برای اندازه‌گیری پرتو ایکس نرم به صورت انتگرالی و تفکیک زمانی، عموماً از آشکارسازهای پین دیود استفاده می‌شود. از رایج‌ترین پین دیودهای مورد استفاده در آشکارسازی پرتو ایکس نرم مولدهای مینیاتوری، می‌توان به PBX65 اشاره کرد. در این مقاله از فیلترهای تضعیف‌کننده (برلیوم و آلومینیوم-مایلار) برای اندازه‌گیری پرتو ایکس نرم در جلوی کانال‌های طیف‌سنج پین دیود استفاده کرده‌ایم. اثر ضخامت بر روی شدت پرتو ایکس نرم به طور تجربی بررسی شده است. فیلتر آلومینیوم عبوردهی بیشتری از برلیوم دارد. همچنین ضخامت کمتر فیلتر، عبوردهی بالاتر پرتو ایکس را نشان می‌دهد. پارامترهای متعددی در سیگنال پاسخ آشکارساز فوتودیود و اندازه‌گیری بازدهی پرتوهای ایکس دستگاه موثر هستند. این پارامترها هندسه آشکارساز، بازدهی کوانتومی فوتودیود، فیلترهای جاذب مقابل آشکارساز و طیف پرتوهای ایکس تابش شده از گاز کاری دستگاه هستند. بررسی اثر این پارامترها در این مقاله مطالعه شده است.

واژه‌های کلیدی

پلاسمای کانونی، پین دیود، ایکس نرم.

1 دانشجوی دکترا، پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران.
2 دکترای تخصصی، پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران.
3 استادیار، پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران.
4 کارشناسی ارشد، پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران.

نویسنده مسئول:

نوشین پیش بین

رایانامه: npishbin1985@gmail.com

استناد به این مقاله:

مریم اکبری نساجی، داریوش رستمی فرد، نوشین پیش بین، علی نصیری (1402). مطالعه تجربی اثر فیلتر بر پرتو پرتو ایکس نرم در پلاسمای کانونی مدر 5 کیلوژول. دوفصلنامه علمی اپتوالکترونیک، 25(2)، 53-60.

<https://jphys.journals.pnu.ac.ir>

مقدمه

دستگاه پلاسمای کانونی یکی از ابزارهای مهم در گداخت هسته‌ای به شمار می‌رود که در زمینه‌های تحقیقاتی گسترده‌ای مورد استفاده است. این سیستم یکی از چشمه‌های مهم در تولید پرتو ایکس است. ماشین‌های مولد پلاسمای تنگش¹، یکی از دستگاه‌های گداخت هسته‌ای هستند که قادر به ایجاد برهم‌کنش‌های گداخت گرما هسته‌ای و باریکه هدف می‌باشند. ماشین‌های مولد تنگش پلاسمای با قابلیت عبور یک جریان بسیار بالا از یک گاز کم فشار و تشکیل پلاسمای تنگیده شده در انتهای آند، ضمن تولید یک پلاسمای داغ در حدود 0/2 تا 2 کیلو الکترون ولت، چگال (در حدود 10^{20} m^{-3}) و با نیمه عمر کوتاه در حدود 16 تا 400 نانو ثانیه، شرایط وقوع واکنش گداخت دوتریوم-دوتریوم را فراهم نموده که مهم‌ترین محصولات آن نوترون‌های سریع با انرژی مگا الکترون ولت 2/45 پرتو ایکس نرم انرژی کمتر از 10 کیلو الکترون ولت و پرتو ایکس سخت با انرژی در حدود 10 تا 500 کیلو الکترون ولت و یون‌های پرانرژی در حدود 1 کیلو الکترون ولت تا 10 مگا الکترون ولت است. تامین انرژی این دستگاه‌ها از طریق منابع تغذیه ولتاژ بالای پالسی 2/4 کیلو الکترون ولت تا 1 مگا الکترون ولت است که متشکل از بانک خازنی اندوکنانس پایین در حدود 5 تا 65 نانو هانری، واحد مولد ولتاژ بالا و واحد تریگرکننده می‌باشد. عملکرد این دستگاه به این صورت است که بعد از شارژ بانک خازنی تا پتانسیل مورد نظر، بخش کنترل آن با ارسال یک پالس ولتاژ بالای کوتاه مدت به سوئیچ اسپارک گپ، منجر به تخلیه انرژی بانک به گاز کم فشار موجود در فضای بین آند و کاتد و یونیزه شدن آن می‌شود. پس از این مرحله، جریان الکتریکی به صورت شعاعی از آند به طرف کاتد جریان می‌یابد. در اثر عبور جریان از محور آند، میدان مغناطیسی حول آن و در راستای قطبی برقرار شده و ضمن تعامل با جریان عبوری از پلاسمای منجر به ایجاد نیروی لورنتز در راستای محور عمودی می‌شود. این نیرو، پوسته پلاسمای را در راستای محور به سمت انتهای آند می‌راند. در حین حرکت به سمت بالا، پوسته پلاسمای حجم گازی را که با آن برخورد نماید، یونیزه می‌کند و به طرف انتهای آند جاروب می‌نماید. هنگامی که پوسته پلاسمای به انتهای آند برسد، قسمتی از آن که روی آند حرکت می‌کرد در جهت شعاعی و به سمت محور مرکزی و انتهای دیگر آن نیز همچنان روی دیواره داخلی کاتد حرکت می‌کند. این مرحله تا آنجا پیش می‌رود که

پوسته پلاسمای به محور مرکزی آند برسد. حرکت شعاعی پوسته پلاسمای، سبب فشردگی بیشتر پلاسمای می‌شود. در طی مرحله فشرده سازی، به تدریج بر طول ستون پلاسمای افزوده و از شعاع آن کاسته خواهد شد تا شعاع پلاسمای به حداقل مقدار خود برسد. در این حالت یک ستون پلاسمای داغ و چگال ایجاد می‌شود. مطالعات زیادی بر روی پرتو ایکس دستگاه‌های پلاسمای کانونی کم انرژی انجام شده است [11-4]. در همین زمینه بورخالتر² و همکارانش اثر انرژی خازن تخلیه شده بر روی شدت پرتو ایکس بررسی کرده‌اند [12]. آن‌ها اثر تغییر قطر آند را مطالعه و مشاهده کردند که کاهش قطر آند و افزایش انرژی خازن باعث گسترش در تولید پرتو ایکس می‌شود. همچنین سادوسکی³ و همکارانش اثر انرژی تخلیه بر روی پرتو ایکس را مطالعه کردند و نشان دادند کاهش اندوکنانس مدار از 100 به 10 بازده انرژی پلاسمای را از 3 تا 10 درصد افزایش می‌دهد [13]. علاوه بر این، استفاده از مخلوط گازها باعث افزایش بازده دستگاه پلاسمای کانونی شده است. مطالعات دیگری نیز در این زمینه انجام شده که از آن میان می‌توان به مراجع [14-16] اشاره کرد. پلوخین⁴ و همکارانش نشان دادند که پرتو پرتو ایکس نرم از سطح تنگش پلاسمای کانونی و ایکس سخت از سر آند خارج می‌شود [17]. زاکاولا⁵ و همکارانش ثابت کردند شدت پرتو ایکس وابسته به شکل سر آند است [18]. نتایج دیگری نیز در این زمینه توسط محققان به ثبت رسیده است که می‌توان در مراجع [19-23] مشاهده کرد. در ادامه مطالعات انجام شده، اکنون هدف از این پژوهش، مطالعه کیفی و کمی تابش پرتو پرتو ایکس نرم دستگاه پلاسمای کانونی مدر 5 کیلوژول است. علاوه بر این، اثر نوع گاز و ضخامت فیلتر بر روی پرتو ایکس نرم نیز بررسی شده است.

روش کار

تئوری روش

بیشترین تغییرات در پلاسمای در ارتباط با انتشار پرتوهای پرتو ایکس نرم و سخت، نوترون‌های سریع و الکترون‌ها است. یک میدان الکتریکی به طور موضعی با رشد ناپایداری تقویت می‌شود. به ترتیب الکترون‌ها به سمت الکتروود داخلی و یون‌ها به سمت مخالف شتاب می‌گیرند. چگالی پلاسمای مجدداً تا cm^{-3}

2 Burkhalter

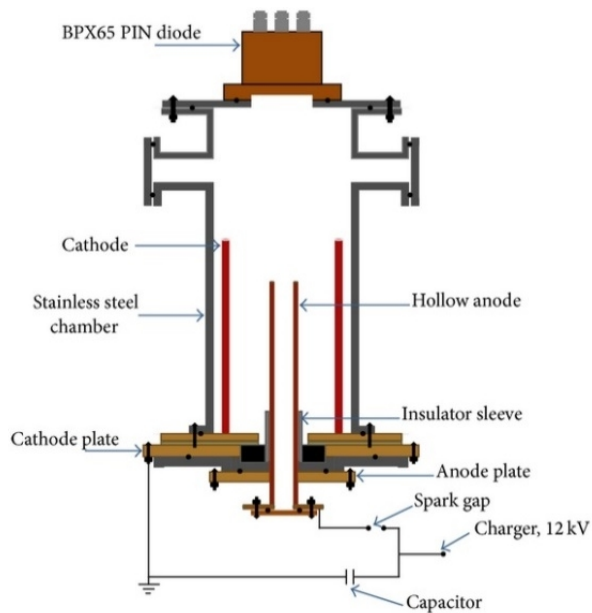
3 Sadowski

4 Polukhin

5 Zakauallah

1 Pinch

ولتاژ تخلیه نیز 20 کیلو ولت می‌باشد. اجزای مکانیکی دستگاه شامل محفظه گاز، آند، کاتد، سیستم خلاء و تزریق گاز می‌باشد. سیستم خلاء این دستگاه توسط یک پمپ روتاری و یک دام ازت مایع تا فشار $10^{-3} \times 4$ تور تامین می‌شود. در این جا از یک کاتد قفس سنجایی شامل دوازه میله مسی استفاده کرده‌ایم. زیرا مشخص شده است که استفاده از کاتد میله‌ای کمک می‌کند تا توزیع چگالی جریان عبوری از آند و الکترودهای میله‌ای به صورت متمرکز و یکنواخت انجام شود که به نوبه خود کمک می‌کند تا میدان الکتریکی بین شکاف الکترودها افزایش یابد و در نتیجه شکل‌گیری تخلیه سطحی بر روی الکترودها بهتر انجام می‌شود.



شکل 2. شماتیک دستگاه پلاسمای کانونی مدر 5 کیلو ژول

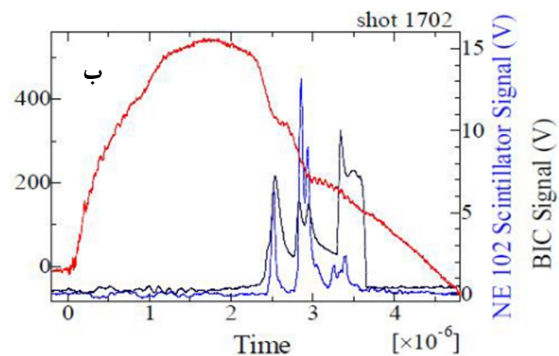
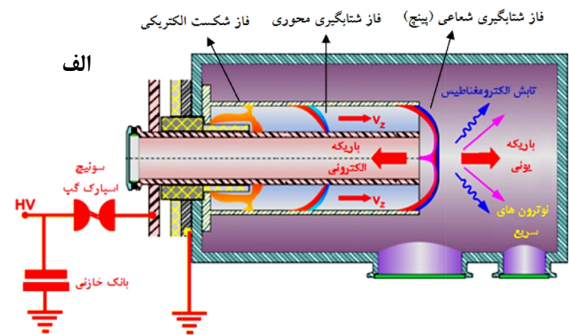
مشخصات فنی دستگاه پلاسمای کانونی در جدول 1 نشان داده شده است.

جدول 1. مشخصات فنی دستگاه پلاسمای کانونی مدر 5 کیلوژول

نام دستگاه	MTPF-2
انرژی دستگاه	5 کیلو ژول
جریان تخلیه الکتریکی	100 کیلو آمپر
ظرفیت بانک خازنی	13 میکروفاراد
اندوکنانس دستگاه	120 نانو هانری
دوره تناوب تخلیه الکتریکی	75/8 میکروثانیه

عملکرد این دستگاه به این صورت است که بعد از شارژ بانک خازنی تا پتانسیل مورد نظر، بخش کنترل آن با ارسال

10^{19} افزایش می‌یابد. در اثر برخورد الکترون‌ها با سر آند مقدار زیادی ناخالصی ایجاد می‌شود و به درون ستون پلاسما نفوذ می‌کند. این ناخالصی‌ها تولید تنگش را با مشکل مواجه می‌کنند. انتشار پرتو ایکس نرم در خلال متلاشی شدن تنگش افزایش می‌یابد و در فاصله کمی از تنگش به یک قله می‌رسد و برای مدت بیش از 300 نانوثانیه به یک مقدار زیاد و ثابت می‌رسد. مرحله فروپاشی ستون پلاسما و تابش پرتوهای مختلف در شکل 1 نشان داده شده است [1-3].

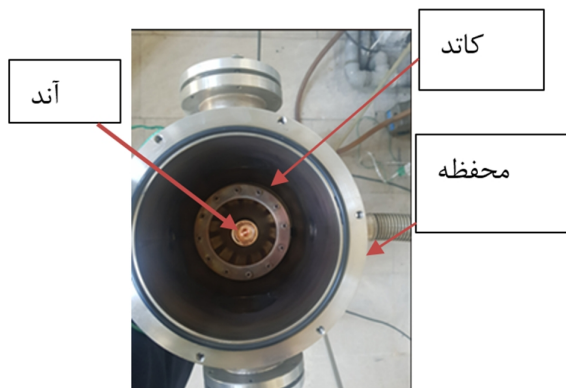


شکل 1. الف) مرحله فروپاشی ستون پلاسما و تابش‌های مختلف (ب) منحنی جریان (با رنگ قرمز)، پاسخ آشکارساز سوسوزن به ایکس سخت (رنگ آبی)، پاسخ فارادی کاپ به یون‌ها (رنگ سیاه) [1].

چیدمان دستگاه

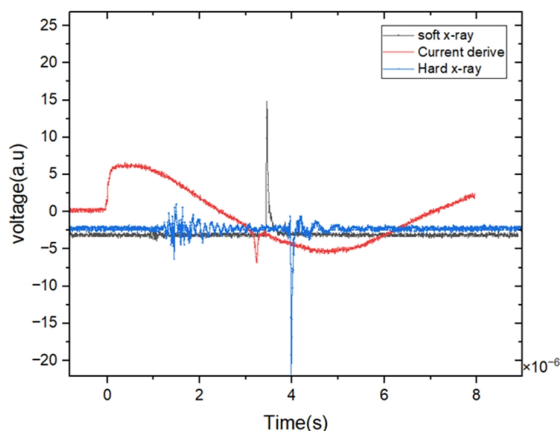
دستگاه پلاسمای کانونی مدر با انرژی 5 کیلو ژول که در پژوهشکده فیزیک پلاسما و گداخت هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران طراحی و ساخته شده، از نوع مدر است. شکل 2، نمای کلی این دستگاه را نشان می‌دهد. به صورت کلی می‌توان گفته که این دستگاه از دو قسمت الکتریکی و مکانیکی تشکیل شده است. اجزای الکتریکی آن شامل تابلو برق، ترانس ولتاژ بالا با نسبت 220 ولت به 35 کیلوولت، بانک خازنی با ظرفیت 22/4 میکروفاراد، کلید جرقه‌ای، دمپر و تریگر می‌باشد. بیشینه

طول موثر آند $9/5$ سانتی متر است. شعاع آند 3 سانتی متر است. ارتفاع موثر عایق 5 سانتی متر است. جنس عایق پیرکس است. ضخامت عایق $2/5$ سانتی متر است. ارتفاع موثر میله‌های کاتد $14/5$ است.



شکل 4. هندسه دستگاه پلاسمای کانونی مدر

در اینجا یک نمونه شات برای دستگاه پلاسمای کانونی 5 کیلوژول نشان داده‌ایم. گاز مورد استفاده آرگون، ولتاژ تخلیه 14 کیلو ولت و فشار $2/5$ تور است. در شکل 5 مشتق جریان و پرتو ایکس نرم برای یک نمونه تخلیه نشان داده شده است. زمان تشکیل تنگش $2/27$ میکروثانیه است. در فاصله کمی از زمان تشکیل پینچ ایکس نرم و سخت تشکیل می‌شوند. در هر اندازه‌گیری ده تخلیه موفق در نظر گرفته شده است. منظور از تخلیه موفق، تخلیه‌ای است که علاوه بر ایجاد شکستگی در سیگنال جریان در آشکارساز سوسوزن پلاستیکی نیز پرتوهای ایکس یکسانی تولید شود.



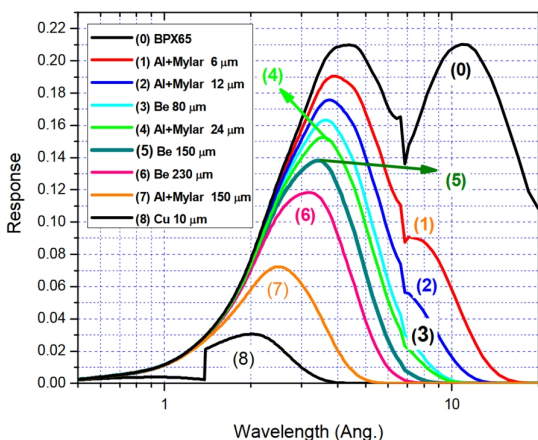
شکل 5. نمودار مشتق جریان و پرتو پرتو ایکس نرم و سخت در یک نمونه شات

یک پالس ولتاژ بالای کوتاه مدت به سوئیچ اسپارک گپ، منجر به تخلیه انرژی بانک به گاز کم فشار موجود در فضای بین آند و کاتد و یونیزه شدن آن می‌شود. برای اندازه‌گیری پرتو پرتو ایکس نرم به صورت انتگرالی و تفکیک زمانی، عموماً از آشکارسازهای پین دیود استفاده می‌شود. در این آشکارسازها، ناحیه تهی مستقل از ولتاژ بایاس و به صورت ناحیه‌ای با غلظت ناخالصی کم است. آشکارساز پین دیود به دلیل نوفه کم و سرعت بالا به صورت گسترده‌ای در اندازه‌گیری تابش‌های پالسی استفاده می‌شود. به دلیل ضخامت پایین ویفر سیلیکون آن، قابلیت جذب پرتو ایکس با انرژی‌های پایین نیز وجود دارد. با این حال، به دلیل استفاده از یک حفاظ شیشه‌ای در قسمت ورودی این فوتودیود، احتمال جذب فوتون‌های کم انرژی ایکس بالا می‌رود به همین دلیل برای آشکارسازی فوتون‌های ایکس کم انرژی لازم است که این حفاظ برداشته شود. در راه اندازی پین دیود باید از بایاس معکوس در تغذیه استفاده شود زیرا با این کار ناحیه تهی آن افزایش می‌یابد و امکان جذب فوتون بالا می‌رود. طراحی پین دیود به گونه‌ای انجام شده است که قابلیت نصب فیلترهای مختلف وجود داشته باشد. همچنین از یک محفظه نگهدارنده برای قرارگیری بر روی پنجره استفاده شده است که خلا سیستم از بین نرود. در شکل 3 محفظه نگهدارنده پین دیود و اتصالات محفظه نگهدارنده پرتو پرتو ایکس نرم بر روی پلاسمای کانونی نشان داده شده است. طیف سنج دیودی 5 کاناله است که از 3 کانال آن استفاده کرده‌ایم.



شکل 3. محفظه نگهدارنده پین دیود و اتصالات نگهدارنده پرتو ایکس نرم بر روی پلاسمای کانونی

به منظور آشکارسازی ایکس نرم، الکتروود مرکزی استوانه‌ای توپر است. تصویر مربوط به هندسه مورد تست در شکل 4 نشان داده شده است. الکتروود مرکزی آند از جنس مس است و 12 الکتروود کاتد است که اطراف آند قرار گرفته است.



شکل 7. پاسخ آشکارساز فوتودیود به همراه فویل بر حسب طول موج [23].

برای محاسبه پاسخ آشکارساز فوتودیود، به همراه فویل باید ضریب گسیلدهی فویل را در ضریب پاسخ آشکارساز ضرب کرد.

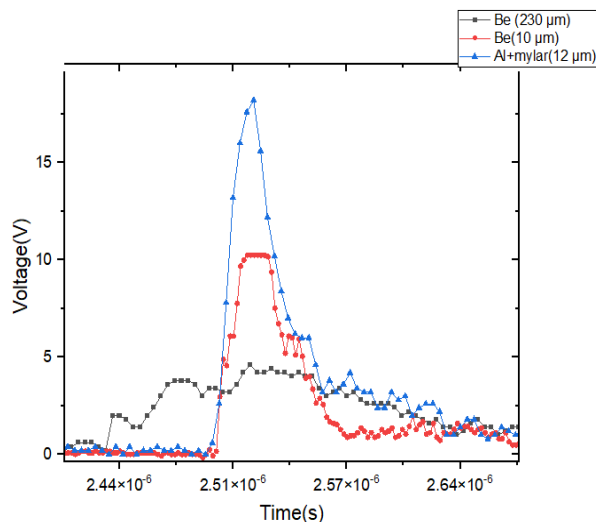
$$R(\text{BPX65}+\text{Foil})=\mu_1(\lambda) \times \eta(\lambda)$$

در شکل 7 منحنی پاسخ آشکارساز به همراه فیلترهای مختلف نشان شده است. شدت سیگنال کانال آلومینیوم - مایلار حدود $1/66$ برابر کانال برلیوم است. از روی نمودارها نشان داده شده است هر چه ضخامت فیلتر بیشتر باشد، شدت کمتری عبور می‌کند. عبوردهی فیلتر آلومینیوم به دلیل عدد اتمی کمتر، از برلیوم بالاتر است. مطالعه مکانیسم گسیل پرتوهای ایکس سخت و نرم نشان می‌دهد که برای ولتاژ ثابت، در فشارهای پایین گسیل پرتوهای ایکس سخت غالب است. زیرا در فشارهای پایین دمای پلاسما و به تبع آن دمای الکترون‌ها بالاست. بنابر این بیشتر به سطح آند برخورد می‌کند و پرتوهای ایکس سخت مس بیشتر تابش می‌شود. در فشارهای بالاتر نیز به دلیل کاهش دما شدت تابش ناشی از مکانیسم گسیل خطی و بازترکیب گسیل پرتوهای ایکس نرم افزایش می‌یابد و برعکس شدت پرتوهای ایکس سخت کم می‌شود.

بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله پرتو پرتو ایکس نرم به صورت کیفی اندازه‌گیری شده است. در دستگاه پلاسما کیلوثول بعد از شارژ بانک خازنی تا پتانسیل مورد نظر، بخش کنترل آن با ارسال یک پالس ولتاژ بالای کوتاه مدت به سوئیچ اسپارک گپ، منجر به تخلیه انرژی بانک به گاز کم فشار موجود در فضای بین آند و کاتد و یونیزه شدن آن می‌شود. تابش حاصل از این نقطه تنگش پلاسمايي اغلب در ناحیه ایکس قرار می‌گیرد. فرآیندهای تابش

در ادامه به منظور دستیابی به پرتو ایکس نرم، از فیلترهای تضعیف کننده برلیوم 10 میکرون و برلیوم 230 میکرون و آلومینیوم - مایلار 12 میکرون استفاده کرده‌ایم. در شکل 6 سیگنال‌های مربوط به پرتو ایکس نرم با فیلترهای مذکور نشان داده شده است. ولتاژ شارژ بانک خازنی 14 کیلو ولت و ظرفیت بانک خازنی 230 میکروفاراد است. گاز مورد استفاده آرگون با فشار 2/5 تور است. پین دیود از نوع PBX-65 است. یکی از کارهای تجربی مورد نظر به دست آوردن شرایط بهینه ایکس نرم در گازهای مختلف است. در نمودار زیر ایکس نرم گاز آرگون با استفاده از فوتودیود در بازه زمانی تشکیل پینچ بررسی شده است. در این نمودار نشان می‌دهد که فیلتر آلومینیوم بیشترین عبوردهی و فیلتر برلیوم 230 میکرومتر کمترین عبوردهی را دارد.



شکل 6. نمودار پرتو ایکس نرم سیستم پلاسما کیلوثول در شات 14 کیلو ولت با استفاده از پین دیود (فیلترهای برلیوم 230 میکرون و آلومینیوم - مایلار 12 میکرون و برلیوم 10 میکرون)

پارامترهای متعددی در سیگنال پاسخ آشکارساز فوتودیود و اندازه‌گیری بازدهی پرتو ایکس دستگاه موثر هستند. این پارامترها عبارتند از: هندسه آشکارساز، بازدهی کوانتومی فوتودیود، فیلترهای جاذب مقابل آشکارساز و طیف پرتوهای ایکس تابش شده از گاز کاری دستگاه.

کم انرژی در آن جلوگیری کنیم. گاز مورد استفاده در این تست‌ها گاز آرگون است. فیلترهای تضعیف کننده برلیوم 230 میکرون و آلومینیوم -مایلر 1 میکرون و برلیوم 10 میکرون هستند. عبوردهی آلومینیوم بالاتر است. تغییرات شدت پرتو ایکس نرم در فشارهای مختلف نشان می‌دهد که در ولتاژ تخلیه 14 کیلو ولت در فشارهای 2 تا 2/5 تور بیشترین مقدار پرتو ایکس نرم در تمام فوتودیودها دیده می‌شود.

الکترومغناطیسی در پلاسمای کانونی متشکل از تابش‌های پلاسمای در حال تعادل حرارتی که ناشی از ساختارهای ماکروسکوپی پلاسمای می‌باشند و تابش‌های مربوط به برخوردهای پرتو الکترونی با هدف‌هایی غیر از پلاسمای و همچنین با ساختارهای پلاسمای سردتر می‌باشند. پرتوهای ایکس نرم از پلاسمای و ایکس سخت از راس الکتروود مرکزی به دلیل برخورد الکترون‌های سریع با آند ساطع می‌شوند. برای گازهای با عدد اتمی بالا، گسیل مشخصه در ناحیه پرتوهای ایکس نرم است. برای اینکه دیودها در ناحیه ایکس نرم کار کنند باید شیشه جلوی آن را بشکنیم که از جذب فوتون‌های

منابع

مد تخلیه تکراری. پایان‌نامه دکتری، حسین جعفری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تابستان 1398.

[3] طراحی، ساخت، نصب و راه‌اندازی دستگاه پلاسمای کانونی مدر و بهینه سازی پرتو ایکس سخت حاصل از این دستگاه در فشارهای مختلف گاز کاری. پایان‌نامه دکتری، مرتضی حبیبی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تابستان 1387.

[1] بررسی گسیل پرتوهای ایکس سخت و نرم و یونها در دستگاه پلاسمای کانونی مدر، پایان‌نامه دکتری، غلامرضا اطاعتی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تابستان 1389.

[2] طراحی و ساخت مولد پلاسمای کانونی مینیاتوری با انرژی حدود 200 ژول، با تغذیه سوئیچینگ ولتاژ بالا و عملکرد در

[4] Bhuyan, H., Mohanty, S. R., Neog, N. K., Bujarbarua, S., & Rout, R. K. Comparative study of soft x-ray emission characteristics in a low energy dense plasma focus device. *Journal of applied physics*, 95(6), 2004. 2975-2981.

[5] Soto, L., Silva, P., Moreno, J., Zambra, M., Kies, W., Mayer, R. E.,... & Huerta, L. Demonstration of neutron production in a table-top pinch plasma focus device operating at only tens of joules. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 41(20), 2008. 205215.

[6] Verri, G., Mezzetti, F., Da Re, A., Rapezzi, L., & Gribkov, V. Fast Neutron Activation Analysis of gold by inelastic scattering, 197Au (n, n'gamma) 197Aum, by means of Plasma Focus device. *Nukleonika*, 45(3), 2000. 189-191.

[7] Dubrovsky, A., Silin, P., Gribkov, V., & Volobuev, I. DPF device application in the material characterization. *Nukleonika*, 45(3), 2000. 185-187.

[8] Ivanov, L. I., Dedyurin, A. I., Borovitskaya, I. V., Krokhin, O. N., Nikulin, V., Polukhin, S. N.,... & Fedotov, A. S. Application of plasma focus installations for a study of the influence of deuterium cumulative flows on materials. *Pramana*, 61(6), 2003. 1179-1185.

[9] Rapezzi, L., Angelone, M., Pillon, M., Rapisarda, M., Rossi, E., Samuelli, M., & Mezzetti, F. Development of a mobile and repetitive plasma focus. *Plasma Sources Science and Technology*, 13(2), 2004. 272.

[10] Sadowski, M., Herold, H., Schmidt, H., & Shakhatre, M. Filamentary structure of the pinch column in plasma focus discharges. *Physics Letters A*, 105(3), 1984. 117-123.

[11] Piitran, A. C. Electron and medium energy X-ray emission from a dense plasma focus (Doctoral dissertation, National Institute of Education), 2002.

[12] Burkhalter, P. G., Mehlman, G., Newman, D. A., Krishnan, M., & Prasad, R. R. Quantitative x-ray emission from a DPF device. *Review of scientific instruments*, 63(10), 1992. 5052-5055.

[13] Hussain S. S., Ahmad, S.; Murtaza, Ghulam, Zakauallah, M. "Effect of anode shape on correlation of neutron emission with pinch energy for a 2.7 kJ Mather-type plasma focus device," *Journal of Applied Physics*, vol. 106, 2009. p. 023311.

[14] D'Arcy, R., Chappell, J., Beinortaite, J., Diederichs, S., Boyle, G., Foster, B., ... & Osterhoff, J. Recovery time of a plasma - wakefield accelerator. *Nature*, 603(7899), 2022. 58-62.

[15] Hahn, E. N., Ghosh, S., Eudave, V., Narkis, J., Angus, J. R., Link, A. J.,... & Beg, F. N. Effect of insulator length and fill pressure on filamentation and neutron production in a 4.6 kJ dense plasma focus. *Physics of Plasmas*, 29(8). 2022.

[16] Mather, J. W., & Bottoms, P. J. Characteristics of the dense plasma focus discharge. *The physics of fluids*, 11(3), 1968. 611-618.

- [17] Polukhin, S. N., Gurei, A. E., Nikulin, V. Y., Peregodova, E. N., & Silin, P. V. Studying How Plasma Jets are Generated in a Plasma Focus. *Plasma Physics Reports*, 46, 2020. 127-137.
- [18] Zakaullah, M., Ahmad, I., Omar, A., Murtaza, G., & Beg, M. M. Effects of anode shape on plasma focus operation with argon. *Plasma Sources Science and Technology*, 5(3), 1996. 544.
- [19] Bernard, A., Cloth, P., Conrads, H., Coudeville, A., Gurlan, G., Jolas, A.,... & Rager, J. P. The dense plasma focus A high intensity neutron source. *Nuclear Instruments and Methods*, 145(1), 1977. 191-218.
- [20] Hassan, S. M., Zhang, T., Patran, A., Rawat, R. S., Springham, S. V., Tan, T. L., ... & Lee, P. Pinching evidences in a miniature plasma focus with fast pseudospark switch. *Plasma Sources Science and Technology*, 15(4), 2006. 614.
- [21] Soto, L., Pavez, C., Moreno, J., Barbaglia, M., & Clausse, A. Nanofocus: an ultra-miniature dense pinch plasma focus device with submillimetric anode operating at 0.1 J. *Plasma Sources Science and Technology*, 18(1), 2008. 015007.
- [22] Verma, R., Rawat, R. S., Lee, P., Krishnan, M., Springham, S. V., & Tan, T. L. Miniature plasma focus device as a compact hard X-ray source for fast radiography applications. *IEEE transactions on plasma science*, 38(4), 2010. 652-657.
- [23] Omrani, M., Habibi, M., Amrollahi, R., & Khosravi, A. Improvement of corrosion and electrical conductivity of 316L stainless steel as bipolar plate by TiN nanoparticle implantation using plasma focus. *International journal of hydrogen energy*, 37(19), 2012. 14676-14686.