

الله أكبر



دانشکده فیزیک

گروه فیزیک اتمی و مولکولی

پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی طول عایقها بر انرژی اشعه ایکس خروجی از دستگاه پلاسمای کانونی

جواد شریف زاده تبریزی

اساتید راهنما

دکتر مهدی مؤمنی

دکتر محمد علی محمدی

شهریور ۱۳۹۴

پیوست شماره ۲

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده: فیزیک

گروه: اتمی-مولکولی

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای جواد شریف زاده تبریزی

تحت عنوان: بررسی طول عایقها بر انرژی اشعه ایکس خروجی از دستگاه پلاسمای کانونی

در تاریخ ۱۳۹۴/۰۶/۲۵ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی :		مهدی مؤمنی
	نام و نام خانوادگی :		محمد علی محمدی

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	سید مجتبی هاشم زاده		سید ایمان حسینی
			سمیه مهربان
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

کریما!

کرفقار آن دردم که تودرمان آنی، بنده آن شنایم که توسنرای آنی، من درتوچه دانم؟
تودانی! توآنی که کفتی من آنم!

وماحصل آموخته‌هایم را تقدیم می‌کنم به:

همسر عزیزم

که مهر آسانی اش، آرام بخش آلام زمینی ام است.

او که استوارترین تکیه گاهم و سبزترین نگاه درزندگیم است.

و هرچه بگویم قطره‌ای از دریای بی‌کران مهربانش را پاس نتوان گویم.

وسپاس...

چگونه شکر تو تو انعم کرد، وقتی شکر گذاری من از تو، خود نیازمند شکر گذاری است؟ هر بار که بگویم تو را سپاس! به خاطر همین سپاس گوینی، بر من واجب می شود که بار دیگر بگویم: تو را سپاس... (امام سجاد (ع))

نخست سپاس و ستایش از آن خداوندی است که بنده ی کوچکش را در میای میگرداند، قطره ای ساخت تا وسعت آن را از دریچه اندیشه های ناب اساتید بزرگ به تماشا نشیند. لذا اکنون که در سایه سار بنده نوازی هایش پایان نامه ی حاضر به انجام رسیده است، بر خود لازم می دانم تا مراتب سپاس را از بزرگوارانی به جای آورم که اگر دست یار میگردان بود، هرگز این پایان نامه به سرانجام نمی رسید.

نخست بر خود واجب می دانم که از اساتید کرامت دارم جناب آقای دکتر مهدی مؤمنی و جناب آقای دکتر محمد علی محمدی که زحمات راهنمایی این پایان نامه را به عمد داشته و نیز باعث ایجاد انگیزه و جسارت برای ادامه ی راه در وجود این جناب می شدند، کمال تشکر را داشته باشم. سپاس دیگر را به مهربان ترین همراهن زندگیم، به پدر و مادر عزیزم و نیز پدر و مادر خانم عزیزم تقدیم می کنم که حضورشان در فضای سبز زندگیم به واقع مصداق بی ریای سخاوت و عطف بوده است.

و از سایر اعضاء خانواده ام که در این راه بسیار یاری ام نمودند، کمال تشکر را دارم.

و از زحمات و راهنمایی های دلسوزانه و از سراسر اخلاص دوست خوبم سرکار خانم مهندس زهرا خدا بخشی نیز کمال تشکر را دارم.

و نیز از زحمات اساتید بزرگوار جناب آقای مهندس عسکری و جناب آقای مهندس شهیدی سپاس گزارم.

و در نهایت از تمامی عزیزانی که در این مدت مراد ستیزیاری نمودند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

و من الله التوفیق...

تعهد نامه

اینجانب جواد شریف زاده تبریزی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته فیزیک اتمی و مولکولی (پلاسما) دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی طول عایقها بر انرژی اشعه ایکس خروجی از دستگاه پلاسمای کانونی تحت راهنمایی دکتر مهدی مؤمنی و دکتر محمد علی محمدی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « SHAHROOD UNIVERSITY OF TECHNOLOGY » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد.

چکیده

دستگاه پلاسمای کانونی قابلیت تولید پلاسمایی به صورت پر چگال ($\sim 10^{26} \text{m}^{-3}$) و با دمای بالا ($\sim 1 \text{KeV}$) را دارد. ستون پلاسمایی ایجاد شده با این شرایط، قادر به گسیل مقدار قابل توجهی اشعه‌ی ایکس نرم بصورت پالسی در یک طیف گسترده می‌باشد. به دلیل پالسی بودن و گستردگی طیف، اشعه ایکس نرم گسیل شده از این دستگاه کاربردهای فراوانی از جمله در پزشکی و لیتوگرافی و... داشته و در کانون توجه بسیاری از دانشمندان قرار گرفته است. در این پایان نامه سعی شده است که با استفاده از دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود (SHUPF) چگونگی تغییرات انرژی اشعه‌ی ایکس نرم گسیل شده از گاز کاری آرگون را در فشارها و ولتاژهای مختلف با استفاده از عایق‌هایی با جنس یکسان و طول متفاوت بررسی کنیم.

در روند انجام آزمایشات برای راهبرد این پایان‌نامه از دیاگنوستیک‌های زیر به منظور آشکارسازی سیگنال‌های مورد نظر استفاده نموده‌ایم. ۱. پیچ‌های رگوفسکی: برای آشکارسازی سیگنال جریان و مشتق جریان به منظور آگاهی از پینچ شدن لایه‌ی جریان. ۲. پروب ولتاژ: برای آشکارسازی سیگنال تغییرات ولتاژ. ۳. آشکارساز BPX-65: برای آشکارسازی سیگنال‌های اشعه‌ی ایکس خروجی از کانال‌های فوتودیود.

بعد از انجام آزمایشات در شرایط یکسان نتیجه گرفتیم که در یک ولتاژ ثابت با افزایش طول عایق میزان انرژی اشعه‌ی ایکس نرم گسیل شده از دستگاه کاهش می‌یابد. همچنین برای یک عایق خاص با افزایش ولتاژ مقدار فشار بهینه برای داشتن مقدار بهینه‌ی انرژی اشعه‌ی ایکس نرم، افزایش می‌یابد. با بررسی نمودارها نیز نتیجه گرفتیم که در تمامی عایق‌ها در یک ولتاژ ثابت، با افزایش فشار کاری دستگاه، میزان انرژی اشعه‌ی ایکس نرم دستگاه به تدریج زیاد شده و در یک فشار به مقدار ماکزیمم خود می‌رسد. بعد از عبور از این فشار بهینه، با افزایش فشار میزان انرژی اشعه‌ی ایکس نرم دستگاه شروع به کاهش می‌نماید.

در روند آزمایشات به پدیده‌ی چند پینچی برخورد کردیم. میزان انرژی اشعه‌ی ایکس نرم گسیل شده از دستگاه را در پینچ دوم اندازه‌گیری نموده و نتیجه گرفتیم که در زمان پینچ دوم مقدار بیشتری اشعه‌ی ایکس نرم از دستگاه پلاسمای کانونی نسبت پینچ اول گسیل می‌شود.

کلید واژه‌ها: لایه‌ی جریان، فوتودیود، اشعه‌ی ایکس نرم، اشعه‌ی ایکس سخت، پینچ، فشار بهینه، دو پینچی

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

تأثیر طول عایق بر زمان شروع گسیل اشعه ایکس نرم با استفاده از آشکار ساز **BPX-65**. کنفرانس مهندسی و فیزیک پلاسما. اردیبهشت ماه ۱۳۹۴. تبریز.

مطالعه‌ی رابطه‌ی میان پینچ‌ها و پیک‌های اشعه‌ی ایکس نرم. کنفرانس فیزیک ایران. شهریور ماه ۱۳۹۴. مشهد-ایران.

فهرست مطالب

فصل اول: معرفی پلاسما و تاریخچه اشعه ایکس.....	۲
۱-۱ مقدمه.....	۲
۲-۱ قابلیت وجود پلاسما در طبیعت.....	۳
۳-۱ پارامترهای پلاسما.....	۴
۱-۳-۱ دما.....	۴
۲-۳-۱ حفاظ دبای.....	۴
۴-۱ مشخصه‌های پلاسما.....	۵
۵-۱ کشف اشعه ایکس.....	۵
۶-۱ خصوصیت‌های اشعه ایکس.....	۶
۷-۱ منابع اشعه ایکس.....	۷
۱-۷-۱ فرایند نشر اشعه ایکس.....	۷
۲-۷-۱ اشعه ایکس گسیل شده از دستگاه پلاسمای کانونی.....	۱۰
فصل دوم: دینامیک پلاسمای کانونی نوع مدر و نشر اشعه ایکس از آن.....	۱۲
۱-۲ مقدمه.....	۱۲
۲-۲ دینامیک دستگاه پلاسمای کانونی نوع مدر.....	۱۴
۱-۲-۲ فاز شکست.....	۱۴
۲-۲-۲ فاز رانش محوری.....	۱۷
۳-۲-۲ فاز شعاعی.....	۱۸
۱-۳-۲-۲ فاز تراکم.....	۱۹
۲-۳-۲-۲ فاز شبه آرام.....	۲۰

- ۲۱.....فاز ناپایدار ۳-۳-۲-۲
- ۲۲.....فاز واپاشی ۴-۳-۲-۲
- ۲۲.....تابش اشعه‌ی ایکس از دستگاه پلاسمای کانونی ۳-۲
- ۲۲.....فرایندهای گسیل اشعه‌ی ایکس از پلاسما ۱-۳-۲
- ۲۲.....مقدمه ۱-۱-۳-۲
- ۲۳.....فرایندهای گسیل ۲-۱-۳-۲
- ۲۴.....گذارهای مقید-مقید ۱-۲-۱-۳-۲
- ۲۴.....گذارهای مقید-آزاد ۲-۲-۱-۳-۲
- ۲۴.....گذارهای آزاد-آزاد ۳-۲-۱-۳-۲
- ۲۵.....تابش سیکلوترونی ۴-۲-۱-۳-۲
- ۲۶.....چشمه‌های پلاسمایی برای اشعه‌ی ایکس ۲-۳-۲
- ۲۶.....دستگاه پلاسمای کانونی بعنوان چشمه‌ی اشعه‌ایکس ۱-۲-۳-۲
- ۲۹.....کاربردهای دستگاه پلاسمای کانونی ۲-۲-۳-۲
- ۳۰.....کاربردهای آموزشی ۱-۲-۲-۳-۲
- ۳۰.....کاربردهای دستگاه پلاسمای کانونی بعنوان چشمه یونی ۲-۲-۲-۳-۲
- ۳۰.....کاربردهای دستگاه پلاسمای کانونی بعنوان چشمه الکترونی ۳-۲-۲-۳-۲
- ۳۰.....کاربردهای دستگاه پلاسمای کانونی بعنوان چشمه اشعه ایکس ۴-۲-۲-۳-۲
- ۳۱.....کاربردهای دستگاه پلاسمای کانونی بعنوان چشمه نوترونی ۵-۲-۲-۳-۲
- ۳۴.....فصل سوم:مدل نظری پلاسمای کانونی و مدل تابشی اشعه‌ی ایکس ۳۴
- ۳۴.....مقدمه ۱-۳
- ۳۵.....خصوصیات الکتریکی و معادلات مدار ۲-۳

- ۳۵.....معادلات مدار معادل.....۱-۲-۳
- ۳۷.....فاز رانش محوری.....۲-۲-۳
- ۳۹.....فاز شعاعی.....۳-۲-۳
- ۴۰.....مدل تابشی پلاسمای کانونی.....۳-۳
- ۴۰.....پارامترهای نشر اشعه‌ی ایکس از دستگاه پلاسمای کانونی.....۱-۳-۳
- ۴۰.....چگالی توان تابشی.....۱-۱-۳-۳
- ۴۲.....نسبت گرمایی ویژه‌ی پلاسمای داغ.....۲-۱-۳-۳
- ۴۳.....محاسبه‌ی دمای الکترون.....۲-۳-۳
- ۴۴.....فصل چهارم:چیدمان آزمایش و تکنیک‌های اندازه‌گیری.....
- ۴۴.....مقدمه.....۱-۴
- ۴۴.....دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود (SHUPF).....۲-۴
- ۴۵.....توصیف ساختار دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود (SHUPF).....۳-۴
- ۴۶.....محفظه‌ی تخلیه‌ی الکتریکی.....۱-۳-۴
- ۴۸.....سیستم تخلیه و تزریق گاز.....۲-۳-۴
- ۵۰.....سیستم منبع تغذیه و کنترل الکترونیکی.....۳-۳-۴
- ۵۰.....سیستم شارژ کردن.....۱-۳-۳-۴
- ۵۰.....بانک خازنی.....۲-۳-۳-۴
- ۵۱.....اسپارک گپ.....۳-۳-۳-۴
- ۵۳.....سیستم تریگر.....۴-۳-۳-۴
- ۵۳.....سیستم اتصال به زمین.....۵-۳-۳-۴
- ۵۴.....سیستم دیاگنوستیک‌ها.....۴-۴

- ۱-۴-۴ سیستم داده‌پردازی..... ۵۵
- ۲-۴-۴ پیچه رگوفسکی..... ۵۵
- ۱-۲-۴-۴ کالیبراسیون پیچه‌ی رگوفسکی..... ۵۷
- ۳-۳-۴ پروب ولتاژ..... ۵۸
- ۴-۴-۴ فوتو دیود BPX-65 بعنوان آشکارساز نیمه رسانای اشعه‌ی ایکس..... ۵۹
- ۱-۴-۴-۴ چیدمان آشکارساز ۵ کاناله‌ی BPX-65..... ۶۴
- ۵-۴ نحوه‌ی اندازه‌گیری اشعه‌ی ایکس نرم با استفاده از آشکارساز BPX-65..... ۶۶
- ۱-۵-۴ آشکارسازی اشعه‌ی ایکس با استفاده از فوتو دیود..... ۶۶
- ۲-۵-۴ روابط محاسبه‌ی انرژی اشعه‌ی ایکس..... ۶۷
- ۶-۴ طریقه‌ی انجام آزمایش..... ۶۸
- فصل پنجم: نتایج و بحث..... ۷۲
- ۱-۵ مقدمه..... ۷۲
- ۲-۵ آزمایشات اولیه به منظور بررسی عملکرد صحیح دستگاه..... ۷۲
- ۳-۵ اندازه‌گیری‌های مربوط به اشعه‌ی ایکس نرم..... ۷۶
- ۱-۳-۵ آشکارسازی اشعه‌ی ایکس نرم با استفاده از فوتودیود..... ۷۶
- ۲-۳-۵ تخمین انرژی اشعه‌ی ایکس نرم با استفاده از فوتودیود..... ۷۶
- ۳-۳-۵ بررسی اثر فشار و ولتاژ بر انرژی اشعه ایکس نرم..... ۷۹
- ۱-۳-۳-۵ عایق شماره یک..... ۷۹
- ۲-۳-۳-۵ عایق شماره دو..... ۸۰
- ۳-۳-۳-۵ عایق شماره سه..... ۸۲
- ۴-۳-۳-۵ نتایج بدست آمده از نمودارهای تغییر مساحت بر حسب فشار در یک ولتاژ..... ۸۳

۴-۳-۵ بررسی اثر طول عایق بر انرژی اشعه‌ی ایکس نرم..... ۸۵

۱-۴-۳-۵ بررسی تغییرات مساحت بر حسب طول عایق..... ۸۵

۲-۴-۳-۵ بررسی تغییرات فشار بهینه بر حسب طول عایق..... ۸۶

۳-۴-۳-۵ بررسی تغییرات مساحت بر حسب ولتاژ..... ۸۷

۴-۵ نتیجه گیری نهایی..... ۸۸

پیشنهادات..... ۸۹

منابع..... ۹۰

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: طیف الکترومغناطیسی..... ۷
- شکل ۲-۱: نمونه‌ای از تابش ترمزی..... ۸
- شکل ۳-۱: نمونه‌ای از تابش سینکروترونی..... ۸
- شکل ۴-۱: نمونه‌ای از برخورد الکترون‌ها به هدف..... ۸
- شکل ۵-۱: نمونه‌ای از اشعه‌ی ایکس گسیل شده از پلاسما..... ۹
- شکل ۱-۲: نمایی شماتیکی از دستگاه پلاسمای کانونی نوع مدر و نوع فیلیپوف..... ۱۳
- شکل ۲-۲: نمونه‌ای از نمودار پروب ولتاژ..... ۱۶
- شکل ۳-۲: گذارهای مقید-مقید، آزاد-مقید، آزاد-آزاد..... ۲۵
- شکل ۱-۳: مراحل دینامیکی پلاسمای کانونی..... ۳۶
- شکل ۲-۳: مدار معادل دستگاه پلاسمای کانونی..... ۳۷
- شکل ۳-۳: منحنی جریان..... ۳۷
- شکل ۱-۴: دیاگرام دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود..... ۴۵
- شکل ۲-۴: محفظه‌ی تخلیه‌ی الکتریکی خلأ..... ۴۶
- شکل ۳-۴: نمایی از آند و کاتد و عایق دستگاه..... ۴۷
- شکل ۴-۴: نحوه‌ی عملکرد پمپ روتاری..... ۴۸
- شکل ۵-۴: نمایی از پمپ روتاری و فشارسنج پیرانی..... ۴۹
- شکل ۶-۴: نمایی از بانک خازنی..... ۵۱
- شکل ۷-۴: اسپارک گپ..... ۵۲
- شکل ۸-۴: نمایی شماتیکی از ساختار داخلی اسپارک گپ..... ۵۳
- شکل ۹-۴: سیستم اتصال به زمین..... ۵۴

- شکل ۴-۱۰: پیچ‌های رگوفسکی..... ۵۵
- شکل ۴-۱۱: مدار معادل پیچ‌های رگوفسکی..... ۵۶
- شکل ۴-۱۲: سیگنال مشتق جریان..... ۵۷
- شکل ۴-۱۳: پروب ولتاژ..... ۵۸
- شکل ۴-۱۴: دیود PIN و مدار بایاس آن..... ۵۹
- شکل ۴-۱۵: مراحل جذب انرژی در لایه‌ها..... ۶۱
- شکل ۴-۱۶: منحنی حساسیت دیود BPX-65..... ۶۲
- شکل ۴-۱۷: آشکارساز ۵ کاناله‌ی BPX-65 مورد استفاده در آزمایشگاه..... ۶۳
- شکل ۴-۱۸: نمایی از باطری ولتاژ معکوس و جایگاه مدار BPX-65 و اسیلوسکوپ..... ۶۴
- شکل ۴-۱۹: آشکارساز ۵ کاناله‌ی BPX-65..... ۶۵
- شکل ۴-۲۰: منحنی حساسیت فوتودیودها با در نظر گرفتن فیلترها..... ۶۶
- شکل ۴-۲۱: نمایی شماتیکی از قرار گرفتن آشکارساز و آند روی دستگاه پلاسمای کانونی..... ۶۷
- شکل ۵-۱: سیگنال حاصله از پروب ولتاژ..... ۷۳
- شکل ۵-۲: نمونه‌ای از سیگنال مشتق جریان..... ۷۵
- شکل ۵-۳: نمونه‌ای از منحنی مشتق جریان نشان دهنده‌ی پدیده‌ی چند پینچی..... ۷۵
- شکل ۵-۴: نمونه‌ای از انطباق نمودار پروب ولتاژ و مشتق جریان..... ۷۵
- شکل ۵-۵: منحنی حساسیت فیلترهای بکار رفته در آشکارساز..... ۷۷
- شکل ۵-۶: نمونه‌ای از سیگنال مشتق جریان و فوتودیودها..... ۷۸
- شکل ۵-۷: تغییرات مساحت بر حسب فشار در ولتاژ ۸kV برای عایق ۱..... ۷۹
- شکل ۵-۸: تغییرات مساحت بر حسب فشار در ولتاژ ۹kV برای عایق ۱..... ۸۰
- شکل ۵-۹: تغییرات مساحت بر حسب فشار در ولتاژ ۸kV برای عایق ۲..... ۸۱

- شکل ۵-۱۰: تغییرات مساحت بر حسب فشار در ولتاژ ۹kV برای عایق ۲..... ۸۱
- شکل ۵-۱۱: تغییرات مساحت بر حسب فشار در ولتاژ ۸kV برای عایق ۳..... ۸۲
- شکل ۵-۱۲: تغییرات مساحت بر حسب فشار در ولتاژ ۹kV برای عایق ۳..... ۸۳
- شکل ۵-۱۳: تغییرات مساحت بر حسب طول عایق در ولتاژ ۸kV و ۹kV..... ۸۵
- شکل ۵-۱۴: تغییرات فشار بهینه بر حسب طول عایق در ولتاژ ۸kV و ۹kV..... ۸۶
- شکل ۵-۱۵: نمودار تغییرات مساحت بر حسب ولتاژ..... ۸۷

فهرست جدول‌ها

جدول ۴-۱: خصوصیات دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود..... ۴۴

جدول ۴-۲: مشخصه‌های BPX-65..... ۶۲

جدول ۴-۳: شرایط مختلف کاری در آزمایش..... ۶۹

فصل اول

معرفی پلاسما و تاریخچه می آشعه می ایس

فصل اول: معرفی پلاسما و تاریخچه‌ی اشعه‌ی ایکس

۱-۱ مقدمه

امروزه با گسترش علم، نیاز بشر به تکنیک‌های جدید برای تحقیق و تفحص افزایش یافته است. یکی از مسایل مهم و روز دنیا، آگاهی از ماهیت و ساختار درونی اجسام و نیز بررسی آن‌ها می‌باشد. اشعه ایکس در این زمینه می‌تواند بعنوان یک ابزار قدرتمند و کاربردی ایفای نقش نماید. از سال ۱۸۹۵ که تابش‌های کوتاهی، صفحه‌ی فسفرسانی را که در گوشه‌ای از آزمایشگاه نیمه تاریک بررسی اشعه‌ی کاتدیک رونتگن^۱ قرار داشت سیاه نمودند، دانشمندان و فیزیکدان‌ها را به تأمل در این خصوص و کاربردهای آن ترغیب و تشویق نمود. حدود دو ماه بعد از این کشف، اولین دستگاه عکسبرداری اشعه‌ی ایکس ساخته شد و اولین عکس گرفته شده مربوط به دست همسر آقای رونتگن است که امروزه در موزه‌ای در مونیخ نگهداری می‌شود. به علت نامعلوم بودن ماهیت این اشعه در آن زمان آن را اشعه ایکس نام‌گذاری نمودند. اکنون می‌دانیم که اشعه ایکس نوعی تابش الکترومغناطیسی با طول موج حدود ۰/۰۱ تا ۲۰ نانومتر می‌باشد که انرژی آن معادل ۱۰۰ الکترون‌ولت تا ۲۰۰ کیلو الکترون‌ولت است. امروزه از اشعه‌ی ایکس در بسیاری از علوم به ویژه پزشکی، مهندسی، نجوم، شیمی و... استفاده می‌شود و به عنوان یکی از روش‌های تست غیر مخرب در تشخیص عیب‌های موجود در اشیاء ساخته شده به شمار می‌آید. منبع استفاده شده برای تولید اشعه ایکس، نقش قابل توجهی در کاربردی کردن این اشعه دارد. یکی از منابعی که برای تولید اشعه ایکس بکار می‌رود دستگاه پلاسمای کانونی می‌باشد. به علت بازده بالا، هزینه کم و نگهداری آسان، توجه بسیاری به این دستگاه در این زمینه شده است. مزیت اصلی این دستگاه در گسیل اشعه ایکس، پالسی بودن آن است که موجب فراوانی کاربردهای آن شده است.

در فصل اول این پایان‌نامه به معرفی پلاسما و بیان تاریخچه‌ای از کشف اشعه ایکس و منابع تولید آن می‌پردازیم. در فصل دوم دستگاه پلاسمای کانونی و دینامیک آن را معرفی کرده و نشر اشعه ایکس از آن را بررسی می‌کنیم. در فصل سوم مدل نظری پلاسمای کانونی و مدل تابشی پلاسمای کانونی را بررسی میکنیم. در فصل چهارم به چیدمان و روش انجام کار، ساختار دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود (SHUPF) و ابزار اندازه‌گیری استفاده شده در آن می‌پردازیم و در نهایت در فصل پنجم این پایان‌نامه به بیان نتایج حاصله از آزمایشات و اندازه‌گیری‌هایمان از دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود (SHUPF) پرداخته و پیشنهادهایی برای کارهای آتی ارائه می‌شود.

¹ Roentgen

۲-۱ قابلیت وجود پلازما در طبیعت

پلازما به عنوان حالت چهارم ماده در واقع گازی شبه خنثی است که رفتار جمعی از خود نشان می‌دهد و تقریباً ۹۹٪ از جهان را احاطه نموده است. وقتی بدانیم که درون ستاره‌ها و جو آنها و فواصل بین آنها توسط ابرهایی گازی پر شده است، در آن صورت این بیان را دور از تصور نمی‌دانیم. به محض خروج از جو زمین با کمربندهای تابشی وان‌آلن^۱ (که تابش مورد بحث از تراکم بالای الکترون‌ها و یون‌هایی با انرژی بالا ناشی می‌شود که در میدان مغناطیسی زمین به دام افتاده‌اند. این کمربندها هلالی شکل و در فاصله‌های ۳۲۰۰ و ۱۶۰۰۰ کیلومتری از سطح زمین واقع شده‌اند [۱]) و بادهای خورشیدی^۲ (جریانی از ذرات یونی پر انرژی که از طرف خورشید در تمامی جهت‌ها ساطع می‌شوند [۲]) مواجه می‌شویم که نمونه‌ای از پلازما می‌باشند. پلازما در زندگی روزمره‌ی ما به چند نمونه محدود می‌شود: آذرخش، شفق‌های شمالی، گاز داخل لامپ فلورسان، یونیدگی مختصری در گاز خروجی موشک به نظر می‌رسد که آن ۱٪ از جهان هستی که پلازما نیست زندگی ما را شامل می‌شود. دلیل این امر را از معادله‌ی ساها^۳ که میزان یونیدگی یک گاز در حال تعادل گرمایی را پیش‌بینی می‌کند می‌توان دریافت:

$$\frac{n_i}{n_n} \approx 2.4 \times 10^{21} \frac{T^{\frac{3}{2}}}{n_i} e^{\frac{-U}{kT}} \quad (1-1)$$

در اینجا n_i و n_n به ترتیب چگالی (تعداد بر m^3) اتم‌های یونیده و اتم‌های خنثی، T دمای گاز بر حسب K ، K ثابت بولتزمن و U انرژی یونش گاز (یعنی انرژی لازم برای جدا کردن بیرونی ترین الکترون از اتم بر حسب erg است) است. یک محاسبه ساده برای هوا در دمای اتاق، میزان یونش نسبی را از مرتبه 10^{-12} نشان می‌دهد که فوق‌العاده کوچک است و لذا پلاسمایی تشکیل نمی‌شود. برای داشتن پلازما باید دما افزایش یابد و این مسأله را تأیید می‌کند که حیات نمی‌تواند با پلازما، لاقط پلاسمایی که مورد نظر ما است وجود داشته باشد. از طرفی می‌دانیم که یک گاز دارای انرژی‌های گرمایی گسترده‌ای می‌باشد و یک اتم هنگامی یونیده می‌شود که بطور تصادفی متحمل برخوردی شود که در آن انرژی به اندازه کافی زیاد باشد که یک الکترون از آن جدا شود. در یک گاز سرد این برخوردها به ندرت اتفاق می‌افتند و از طرفی دیگر وقتی اتمی یونیده می‌شود، تا زمانیکه به الکترونی می‌رسد باردار باقی می‌ماند و سپس به احتمال زیاد با آن ترکیب شده و دوباره خنثی می‌شود. واضح است که آهنگ بازترکیب به

¹ Van Allen radiation belt

² Solar wind

³ SAHA equation

چگالی الکترون‌ها که برابر با n_i است، بستگی دارد. لذا وجود پلاسما در محیط‌های میان ستاره‌ای نسبت به محیط زمین، به علت کم بودن n_i و در نتیجه آهنگ کم بازترکیب، بیشتر است.

۳-۱ پارامترهای پلاسما

هر گاز یونیده‌ای را نمی‌توان پلاسما نامید، البته مقدار کمی یونیدگی در هر گازی وجود دارد. برای اینکه یک گاز را پلاسما بنامیم باید دارای چندین ویژگی خاص باشد که در زیر بیان می‌کنیم.

۱-۳-۱ دما

همانطور که می‌دانیم دما به انرژی جنبشی ذرات و در نتیجه به سرعت آنها وابسته است. از طرفی برای یک گاز در فضایی سه بعدی داریم:

$$E_{av} = \frac{3}{2}KT \quad (۲-۱)$$

چون دما و انرژی رابطه‌ای خطی با یکدیگر دارند لذا در فیزیک پلاسما رایج است که دما را بر حسب انرژی بیان می‌کنند.

$$KT=1eV=1.6 \times 10^{-19}j \quad (۳-۱)$$

$$1eV=11600^\circ k \quad (۴-۱)$$

با این تعریف مشخص است که دمای پلاسما مقدار بالایی می‌باشد ولی این مقدار بالا به تنهایی دلیل بر گرمای بالای آن نیست بلکه باید چگالی را نیز در نظر گرفت. بعنوان مثال اغلب پلاسماهای آزمایشگاهی دمایی از مرتبه‌ی $10^4 eV$ دارند، ولی با چگالی حدود (10^{18} m^{-3}) تا 10^{19} ، گرمایش آنها مسأله‌ای جدی نیست.

۲-۳-۱ حفاظ دبای

یکی از مشخصه‌های اصلی رفتارهای پلاسما که آن را از یک گاز یونیده جدا می‌سازد، توانایی آن برای دفع پتانسیل‌های الکتریکی است که از خارج به آن اعمال می‌شوند. به عنوان مثال اگر یک گلوله باردار را وارد فضای پلاسمایی کنیم، یک ابر باردار با بار مخالف آن را احاطه کرده و اثر آن را خنثی می‌کند. در واقع ضخامت تقریبی این ابر را طول دبای می‌نامند. مقدار این طول از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\lambda_D \equiv \sqrt{\left(\frac{\epsilon_0 KT_e}{ne^2}\right)} \quad (۵-۱)$$

اگر L ابعاد سیستم گازی و یونیده‌ی ما باشد، زمانی این سیستم می‌تواند پلاسما باشد که به قدر کافی چگال باشد که λ_D خیلی کوچکتر از L شود. البته این تعریف زمانی معتبر است که ذرات در ابر باردار به تعداد کافی وجود داشته باشند واضح است که اگر دو یا چند ذره در محیط غلاف وجود داشته باشند حفاظ دبابی از لحاظ آماری مفهوم معتبری نخواهد داشت. با استفاده از رابطه (۵-۱) می‌توان تعداد ذرات را در کره دبابی محاسبه نمود:

$$N_D = n \frac{4}{3} \pi \lambda_D^3 \quad (۶-۱)$$

علاوه بر $L \ll \lambda_D$ ، رفتار جمعی ایجاب می‌کند که:

$$N_D \gg 1 \quad (۷-۱)$$

۴-۱ مشخصه‌های پلاسما

تا کنون دو شرط مبنی بر آنکه بتوان یک گاز یونیده را پلاسما نامید بیان نمودیم. شرط سوم به برخوردها مربوط می‌شود. اگر ω بسامد نوعی نوسان‌های پلاسما و τ زمان متوسط برخورد با اتم‌های خنثی باشد، برای آنکه گاز مانند پلاسما و نه یک گاز خنثی رفتار کند لازم است:

$$\omega \tau > 1 \quad (۸-۱)$$

بنابراین سه شرط مشخص کننده‌ی پلاسما عبارت‌اند از [۳]:

۱. $\lambda_D \ll L$
۲. $N_D \gg 1$
۳. $\omega \tau > 1$

۵-۱ کشف اشعه‌ی ایکس

در سال ۱۸۹۵ دانشمند آلمانی "وکتور ویلهلم کنراد رونتگن"^۱ پرتوهای ایکس را بر حسب تصادف کشف کرد. وی مشغول تکرار آزمایش‌های دانشمندان دیگری بود که در آنها الکتریسیته با ولتاژ زیاد به هوا یا گازهای دیگر که در لامپ نیمه خلایی قرار داشتند، تخلیه می‌شد. از سال ۱۸۵۸ می‌دانستند که در مدت زمان تخلیه الکتریکی، دیواره‌های لامپ فسفرسان می‌درخشند. در سال ۱۸۷۸ آقای "ویلیام

¹ Vector Wilhelm Conrad Roentgen

کروکس^۱ پرتوهای کاتدی این فوسفسانی را به عنوان یک "جریان مولکول‌های در حال پرواز" توصیف نمود. ولی امروزه میدانیم که پرتوهای کاتدی در واقع جریانی از الکترون‌ها است که از آند به کاتد گسیل می‌شوند و ضربه حاصل از برخورد این الکترون‌ها به دیواره لامپ باعث خاصیت فوسفسانی می‌شود. لامپ نئون، لامپ تلویزیون و چراغ‌های مهتابی نمونه‌هایی از کاربردهای این آزمایش هستند. در سال ۱۸۹۲ هاینریش رادولف هرترز^۲ نشان داد که پرتوهای کاتدی از صفحات نازک فلزی عبور می‌کنند. دو سال بعد فلیپ لنارد^۳ لامپ‌های تخلیه‌ای ساخت که منافذ آلومینیومی نازکی داشتند و پرتوهای کاتدی را به بیرون لامپ منتقل می‌کردند و در آنجا بود که می‌توانستند این پرتوها را بر اساس نوری که بر صفحه‌ای از فلورسان ایجاد می‌کردند، مشاهده کنند. معلوم شد که در فشارهای معمولی خارج لامپ، این پرتوها ۲ یا ۳ سانتی‌متر بیشتر دوام نمی‌آورند. رونتگن این آزمایش‌ها را خودش تکرار کرد و با خود اندیشید که آیا می‌شود پرتوهای کاتدی را از یک لامپ تمام شیشه‌ای که کروکس استفاده کرده بود (لامپی که هیچ منفذی نداشته باشد) عبور داد؟ برای پاسخ به این سؤال یک لامپ پرتوی کاتدی را با یک مقوای سیاه رنگ پوشانید و یک صفحه فوسفورسانی را در مقابل آن قرار داد و زمانیکه برای تاریک کردن اتاق رفت بعد از تاریک کردن اتاق درخشش یک نور ضعیف از مقوا نظرش را جلب نمود. او که از صحت مقوا و تاریکی اتاق مطمئن بود به سرعت کبریتی افروخت و منشأ این نور مرموز را در صفحه‌ی فوسفورسانی‌ای مشاهده نمود که در فاصله ۱ متری روی میز و به عنوان آشکارساز می‌خواست بکار ببرد. او پس از چند هفته سکوت و تلاش حاصل کار خود را در تاریخ ۲۸ دسامبر سال ۱۸۹۵ در مقاله‌ای تحت عنوان "مکتوبی اولیه در مورد نوعی پرتوی جدید" در دانشگاه وورتزبرگ^۴ به چاپ رسانید. وی به علت شناخت ناکافی از آن پرتو، آن را "اشعه ایکس"^۵ نامید [۴].

۶-۱ خصوصیت‌های اشعه‌ی ایکس

پرتوهای اشعه‌ی ایکس برخلاف پرتوهای کاتدی تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار نمی‌گیرند. اغلب مواد برای آنها شفاف و قابل عبور است. در واقع پرتوی ایکس یک نوع تابش الکترومغناطیسی است که طول موج آن حدود ۰/۰۱ تا ۲۰ نانومتر می‌باشد که معادل انرژی بین ۱۰۰ الکترون‌ولت تا ۲۰۰ کیلو الکترون‌ولت است. ناحیه‌ی طیفی پرتوی ایکس در طیف الکترومغناطیسی بین محدوده اشعه ۷ و پرتوی فرابنفش قرار دارد. پرتوی ایکس می‌تواند تکفام (یعنی فقط دارای یک طول موج خاص است) و یا پیوسته (یعنی

¹ William Crookes

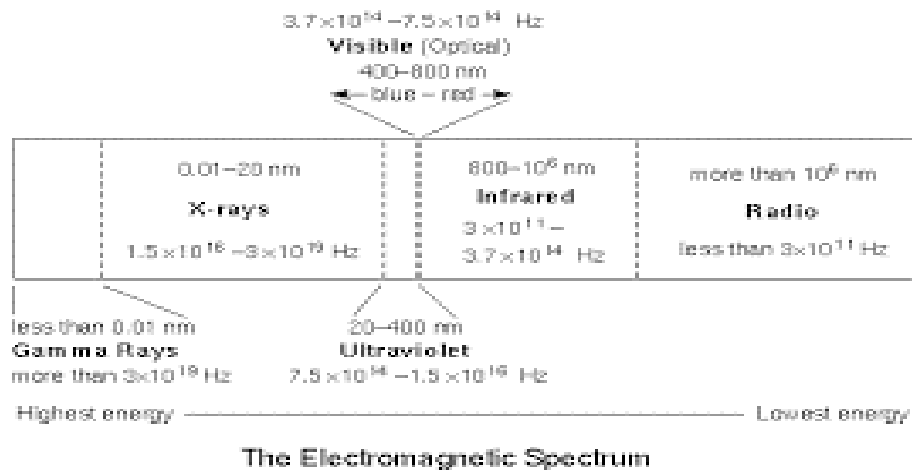
² Heinrich Rudolf Hertz

³ Phillip Lenard

⁴ Würzburg

⁵ X ray

پرتوی ایکسی که تکفام نیست و دارای طول موج بین λ_1 و λ_2 است) باشد. قرار گرفتن محدوده‌ی اشعه ایکس در طیف الکترومغناطیسی را می‌توان در شکل ۱ مشاهده نمود.



شکل ۱-۱: طیف الکترومغناطیسی

۷-۱ منابع اشعه‌ی ایکس

۱-۷-۱ فرایند نشر اشعه‌ی ایکس

پارامتر مهم در مطالعه‌ی اشعه ایکس، منبعی است که آن را بوجود می‌آورد. اخیراً بنا به تقاضای صنعت برای داشتن اشعه‌ی ایکس با انرژی بالاتر به منظور کاربردهای صنعتی، توجهات زیادی روی گسترش منابعی با انرژی بیشتر متمرکز شده است. به طور کلی اشعه ایکس به دو روش اساسی تولید می‌شود [۵]:

(۱) شتاب‌دار کردن ذرات باردار (اغلب الکترون‌ها).

(۲) تغییر تراز اتمی (یا یونی) الکترون‌ها از سطح انرژی بالاتر به سطح انرژی پایین‌تر.

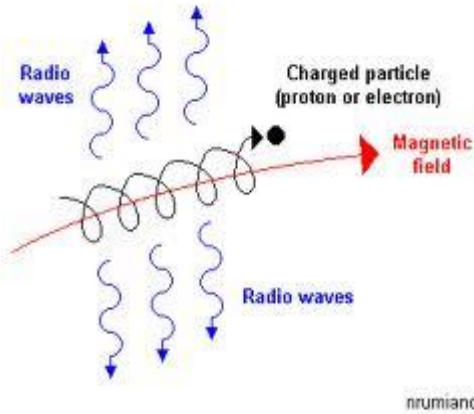
به عنوان مثالی از روش اول می‌توان به تابش ترمزی^۱ (که ناشی از کاهش سرعت الکترون‌ها به علت برخورد با ذرات باردار سنگین است) و تابش‌های سینکروترونی^۲ (که ناشی از حرکت ذرات باردار نسبیتی در مسیرهای دایروی بر اثر میدان مغناطیسی است) اشاره نمود. در این روش یک طیف پیوسته

¹ Bremsstrahlung

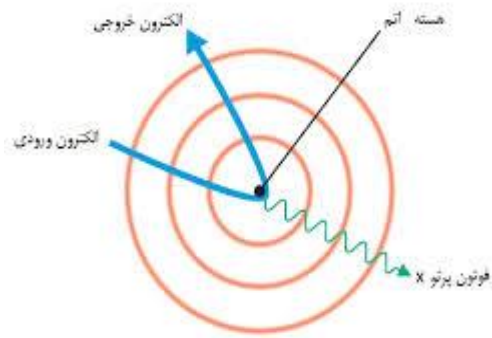
² Synchrotron Radiation

از اشعه ایکس گسیل می‌شود که به آن اشعه‌ی ایکس سفید نیز می‌گویند. هر چند که ممکن است یک سری خطوط تکفام از دستگاه مشاهده نماییم.

در شکل ۲ و ۳ نمونه‌هایی از تابش ترمزی و تابش سینکروترونی ارائه شده است.

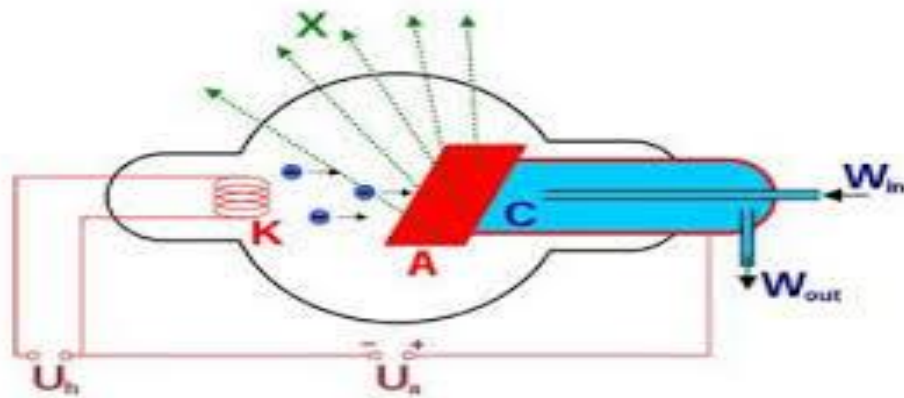


شکل ۱-۳: نمونه‌ای از تابش سینکروترونی

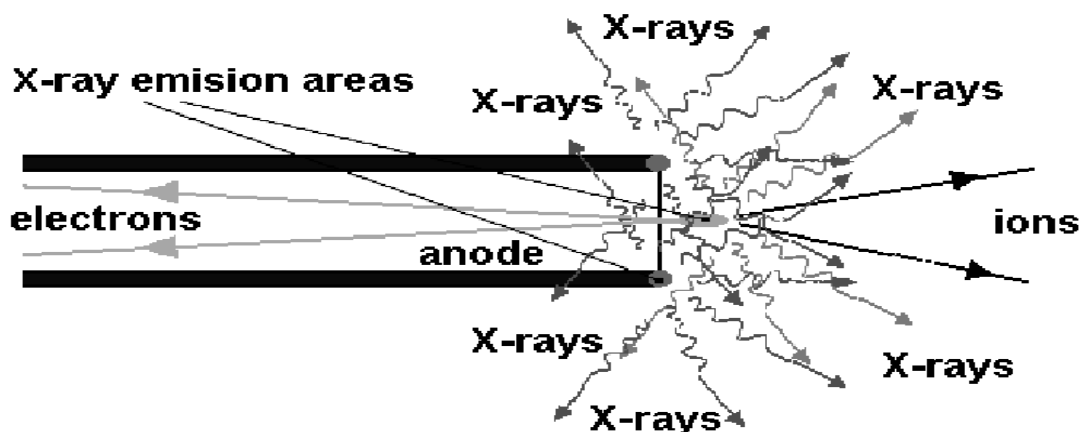


شکل ۱-۲: نمونه‌ای از تابش ترمزی

در روش دوم اشعه‌ی ایکس زمانی گسیل می‌شود که الکترون‌ها یک هدف فلزی با عدد اتمی پایین را بمباران کنند و یا اینکه پلاسما کانونی شده از موادی با عدد اتمی پایین تشکیل شده باشد. که در این صورت یک طیف گسسته از اشعه ایکس را خواهیم داشت. از این روش برای طراحی و نیز ساخت لیزر استفاده می‌کنند. نمونه‌هایی از این روش در شکل ۴ و ۵ ارائه شده است.



شکل ۱-۴: نمونه‌ای از برخورد الکترون‌ها به هدف



شکل ۱-۵: نمونه‌ای از اشعه ایکس گسیل شده از پلاسما

البته از پلاسماهایی که یونیزاسیون آنها در مرتبه‌ی بالایی قرار دارد و اشعه‌ی ایکس گسیلی آنها دارای پیک‌های شاخصی می‌باشد، میتوان برای ساخت لیزرهای پلاسمایی استفاده نمود. فرایندهای دیگری [۶] از قبیل تابش‌های عبوری^۱ (زمانی که یک ذره باردار سطح مشترک دو ماده را طی می‌کند، در زمان عبور از خود اشعه ایکس گسیل می‌کند) و تابش‌های کانالی^۲ (زمانی رخ می‌دهند که یک ذره در امتداد کانال‌های تشکیل شده توسط صفحات در یک کریستال، حرکت کند) می‌توانند اشعه‌ی ایکس از خود گسیل کنند. ولی به علت محدودیت در کاربرد و منبع تولید کننده، خیلی مورد توجه قرار نگرفته‌اند. بطور کلی چشمه‌هایی که می‌توانند از خود اشعه‌ی ایکس گسیل نمایند به چهار گروه اصلی تقسیم می‌شوند:

(۱) منابعی که دارای یک هدف فلزی هستند.

(۲) سینکروترون

(۳) پلاسما

(۴) لیزرهای اشعه ایکس

این منابع دارای قدرت‌ها و خصوصیت‌های متفاوتی در تولید اشعه ایکس هستند که ما در این پایان نامه برای تولید اشعه ایکس از پلاسما بهره برده‌ایم و سعی در مقایسه بین آنها نداریم ولی در منبع [۷] مقایسه‌ای بین آنها صورت گرفته است.

¹Transition radiation

² Channeling radiation

۱-۷-۲ اشعه ایکس گسیل شده از دستگاه پلاسمای کانونی

در سال ۱۹۶۵، در راستای انجام تحقیقات روی همجوشی هسته‌ای به منظور دستیابی به یک منبع انرژی پاک و جدید، "دستگاه پلاسمای کانونی"^۱ ساخته شد. هدف اولیه و اصلی ساختن این دستگاه استفاده از آن به عنوان منبعی برای دسترسی به نوترون‌های سریع و پرانرژی بود(البته در صورت استفاده از گاز کاری دوتریم). بعد از انجام آزمایش‌های مختلف به چند منظوره بودن دستگاه پلاسمای کانونی پی‌برده شد و متوجه شدند که این دستگاه علاوه بر چشمه‌ی نوترونی، می‌تواند اشعه ایکس نرم(پرتویی که طول موج آن بین ۷ تا ۲۰ نانومتر است) و اشعه ایکس سخت (پرتویی که طول موج آن بین ۱ تا ۷ نانومتر است) را از خود گسیل کند و به علت پالسی بودن اشعه‌ی ایکس خروجی از دستگاه، می‌تواند کاربردهای زیادی داشته باشد. بنابراین دستگاه پلاسمای کانونی در کانون توجهات دانشمندان قرار گرفت. کانونی شدن پلاسما حتماً نشر اشعه ایکس نرم را به دنبال خواهد داشت که بازه‌ی زمانی آن می‌تواند حدود چند تا چند صد نانو ثانیه باشد. به طور کلی به منظور کاربردهای زیر، تمایل به توسعه‌ی بازه‌ی زمانی اشعه ایکس نرم داریم:

۱) تولید اشعه ایکس نرم در بازه‌ی بین ۱ تا ۲۰۰ آنگستروم ($h\nu < 12.3 \text{ KeV}$) برای: الف) میکروسکوپ اشعه ایکس [۸] ب) لیتوگرافی اشعه ایکس [۹].

۲) تحقیقات اصلی و بنیادی در طیف سنجی و فیزیک پلاسما [۱۰]

۳) اندازه‌گیری پارمترهای مختلف پلاسما که به طور تجربی بدست آمده‌اند و مقایسه آنها با پارمترهایی که از لحاظ تئوری و با مدل‌سازی پلاسما بدست می‌آیند. [۱۱]

انرژی بر پالس اشعه‌ی ایکس گسیل یافته از دستگاه‌های خانواده‌ی Z پینچ از سایر وسایلی که به عنوان منبع اشعه ایکس به شمار می‌آیند، بیشتر است [۵]. دستگاه پلاسمای کانونی، یک دستگاه از خانواده‌ی Z پینچ‌هاست که ظرفیت تولید پلاسمایی با چگالی $N_e > 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ و دمای $T_e > 500 \text{ eV}$ را دارا است. به علت ساختار ساده، هزینه پایین تولید آن و نگهداری آسان این دستگاه با گاز کاری نجیب به عنوان یک منبع خوب برای تولید اشعه ایکس به حساب می‌آید. آزمایشات نشان می‌دهند که طیف تابشی اشعه‌ی ایکس در دستگاه پلاسمای کانونی طیف وسیعی از انرژی‌ها را از حدود ۱ تا ۵۰۰ کیلو الکترون ولت را پوشش می‌دهد و بازه زمانی نشر آن بین چند تا چند صد نانو ثانیه است [۱۲].

¹ Plasma Focus Device

فصل دوم

دینامیک دستگاه پلاسمای کانونی نوع مدرو نشر اشعه می

ایکس از آن

فصل دوم: دینامیک دستگاه پلاسمای کانونی نوع مدر و نشر اشعه ایکس از آن

۱-۲ مقدمه

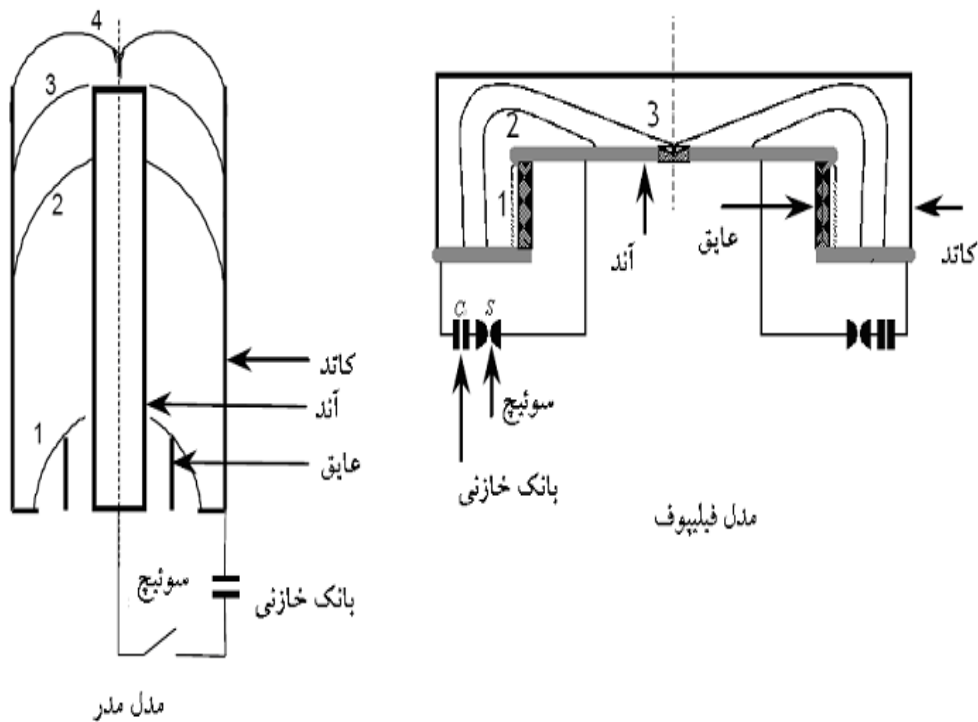
دستگاه پلاسمای کانونی بعنوان سیستمی از خانواده‌های تنگش محوری بشمار می‌آید. در واقع دستگاه پلاسمای کانونی یک شتاب دهنده‌ی مغناطو هیدرو دینامیکی هم محور برای پلاسمای می‌باشد. در این دستگاه پلاسمای در محور و در بالای سطح الکتروود داخلی تشکیل می‌شود. برای اولین بار این دستگاه به طور مستقل و با هندسه‌ای متفاوت در سال ۱۹۶۵ در ایالات متحده آمریکا (USA) توسط مدر^۱ [۱۳] و در اتحاد جماهیر شوروی سابق (USSR) توسط فیلیپوف^۲ [۱۴] ساخته شد. از آن به بعد دستگاه‌های پلاسمای کانونی زیادی توسط مخترعان در تمامی جهان ساخته شده است ولی همه‌ی آن‌ها به گونه‌ای شبیه به یکی از این دو مدلی بودند که توسط فیلیپوف و مدر ساخته شده بودند. بنابراین می‌توان دستگاه‌های پلاسمای کانونی را به دو گروه اصلی مدل مدر و مدل فیلیپوف تقسیم نمود. نمایی شماتیکی از این دو مدل در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. کلیات مربوط به نوع مدر و نوع فیلیپوف در زیر بیان شده است. اصول کلی و اساسی کار دستگاه پلاسمای کانونی در هر دو مورد یکسان می‌باشد. در هر دو مدل، انرژی ذخیره شده در بانک خازنی توسط یک سوئیچ سریع به الکتروود مرکزی انتقال می‌یابد. همان طوری که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است در هر دو مدل فرایند تخلیه‌ی الکتریکی در ابتدا روی سطح خارجی عایق استوانه‌ای شکل الکتروود مرکزی انجام می‌شود و آن را فاز شکست می‌گویند (قسمت ۱ نشان داده شده در شکل (۱-۲)). لایه پلاسمایی ایجاد شده در پیرامون عایق بر اثر وجود نیروی لورنتز از موقعیت ۱ به ترتیب به موقعیت‌های ۲ و ۳ نشان داده شده در شکل ۱-۲ حرکت می‌کند. این مرحله را فاز محوری می‌نامند. در نهایت لایه جریان در فاز شعاعی به محور تقارن دستگاه (موقعیت ۳ در نوع فیلیپوف و ۴ در نوع مدر) می‌رسد. برای بهینه کردن دستگاه باید ابعاد (طول و قطر الکتروودها) را به گونه‌ای انتخاب کرد که در فشار بهینه، زمانی که لایه به محور تقارن دستگاه می‌رسد، جریان لایه، ماکزیمم شود. در این موقعیت رشته‌ای از پلاسمای داغ (تنگیده^۳) در مقابل الکتروود داخلی (معمولا آند) شکل می‌گیرد. بعد از مدت زمان کوتاهی، در طی این فاز تابش‌هایی از قبیل اشعه ایکس نرم و سخت، نوترون

¹ Mather

² Filippove

³ Pinch

های پر انرژی، الکترون‌ها و یون‌های پرانرژی و ... تولید می‌شوند [۱۵-۱۸]. جزئیات مربوط به سایر پارامترهای مختلف پلازما از قبیل زمان بعداً شرح داده خواهند شد.



شکل ۱-۲: نمایی شماتیکی از دستگاه پلاسمای کانونی نوع مدر و نوع فیلیپوف

اختلاف بنیادی و اساسی در دو مدل مدر و فیلیپوف به ابعاد و نسبت ظاهری (طول/قطر) الکترودهای دستگاه مربوط می‌شود. در نوع فیلیپوف این نسبت بزرگتر از ۵ می‌باشد (یعنی قطر آند بیش از ۵ برابر طول آن است) و قطر الکتروود داخلی (معمولاً آند) بین ۵۰ تا ۲۰۰ سانتی‌متر است. نوع مدر دارای نسبتی کوچکتر از ۰/۲۵ می‌باشد (یعنی قطر آند کمتر از ۰/۲۵ طول آن است) و قطر الکتروود داخلی (آند) آن بین ۲ تا ۲۲ سانتی‌متر است. الکترودها را اغلب از مس یا استیل ضد زنگ می‌سازند. الکتروود داخلی می‌تواند استوانه‌ای توپر یا لوله‌ای باشد. البته اگر بخواهند اشعه ایکس سخت را از بین ببرند و الکترون تولید کنند، الکتروود داخلی را لوله‌ای در نظر می‌گیرند [۱۹]. سیستم الکترودها به دو قسمت تقسیم می‌شود. قسمت اول مجموعه الکترودهای بیرونی می‌باشند که اغلب بعنوان کاتد در نظر گرفته می‌شوند و می‌توانند به تعداد ۶ الی ۲۴ میله باشند که روی یک صفحه‌ی هم جنس با آن بطور متقارن قرار می‌گیرند. در قسمت دوم یک الکتروود مرکزی قرار دارد که معمولاً بعنوان آند در نظر گرفته می‌شود و در مرکز الکترودهای کاندی قرار گرفته و توسط یک عایق استوانه‌ای محیط می‌شود. عایقی که اطراف آند

قرار می‌گیرد اغلب از جنس پیرکس یا آلومینیوم و یا سرامیک ساخته می‌شود. شباهت‌های بین این دو مدل در: الف) دینامیک لایه‌ی جریان ب) قوانین مقیاس بندی برای نشر نوترون‌ها [۲۰، ۲۱] و ج) نشر الکترون‌ها و یون‌های پرانرژی، اشعه ایکس و سایر امواج گسیلی است.

۲-۲ دینامیک دستگاه پلاسمای کانونی نوع مدر

دینامیک پلاسمای کانونی در هر دو نوع مدل تقریباً یکسان و مشابه است و فقط در مدل فیلیپوف یک مرحله حذف شده است. در این پایان‌نامه به این علت که در روند آزمایش‌ها از دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود (SHUPF) که یک دستگاه پلاسمای کانونی نوع مدر می‌باشد، استفاده شده است، لذا در این قسمت دینامیک مربوط به دستگاه‌های نوع مدر را تشریح می‌کنیم.

مطالعه دینامیک دستگاه پلاسمای کانونی را می‌توان به سه مرحله مستقل تقسیم نمود که عبارتند از: الف) فاز شکست^۱

ب) فاز شتاب‌گیری محوری^۲

ج) فاز شعاعی^۳

۲-۲-۱ فاز شکست

زمانیکه یک اختلاف پتانسیل خیلی زیاد در یک لحظه به دو سر الکترودهای دستگاه پلاسمای کانونی که توسط گاز کاری (آرگون، نئون، دوتریوم و ...) تا فشار مناسب (معمولاً تا چند میلی بار) پر شده است اعمال شود، تخلیه‌ی الکتریکی با تقارن محوری بین الکترودها و روی سطح خارجی عایق اتفاق می‌افتد. این تخلیه‌ی الکتریکی را فاز شکست می‌نامند که باعث تشکیل پلاسمایی می‌شود که از طریق جریان تخلیه می‌تواند شارش یابد.

بنا بر قانون پاشن^۴ [۲۲] مقادیر ولتاژ تخلیه برای گاز دوتریوم با فشار ۱ تا ۱۰ میلی بار کمتر از ۱ کیلوولت (برای ولتاژ DC) است. این ولتاژ کمتر از ۰/۱ ولتاژ اعمالی توسط بانک خازنی (۱ تا ۱۰ کیلوولت با ولتاژ DC) است. بنابراین در دستگاه پلاسمای کانونی همواره تخلیه الکتریکی (شکست) با ولتاژ بالا اتفاق می‌افتد. ایجاد تخلیه‌ی الکتریکی (شکست) با جریان بالا در دستگاه پلاسمای کانونی اساساً به

¹ Breakdown phase

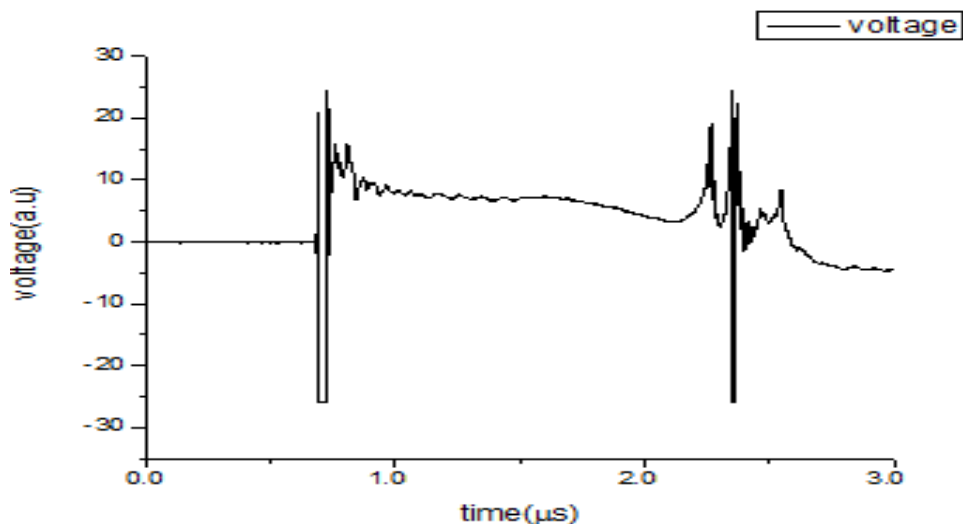
² Axial acceleration phase

³ Radial phase

⁴ Paschen's law

شرایط اولیه گاز [۲۳،۲۴] و پارامترهای هندسی الکترودها [۲۵] و به جنس و طول عایق [۲۳،۲۴،۲۶] وابسته است. همچنین قطبش الکترودها و خیزش اولیه‌ی جریان که به اندوکتانس و ولتاژ شارژ مدار الکتریکی وابسته است، نقش مهمی را بازی می‌کنند.

برای ایجاد شرایط بهینه، ابتدا تخلیه‌ی الکتریکی‌ای را که روی سطح عایق ایجاد می‌شود، بررسی میکنیم. چگونگی تشکیل لایه‌ی جریان در فاز شکست را می‌توان به صورت زیر بیان نمود. بعد از اعمال اختلاف پتانسیل به دو سر الکترودها با یک تأخیر زمانی چند ده نانو ثانیه، فاز شکست روی سطح عایق [۲۷] مشاهده می‌شود. در این بازه الکترون‌های آزادی در اثر نشر میدانی از لبه‌ی فلزات و همچنین یونیزاسیون گاز اطراف ایجاد می‌شوند. این الکترون‌های آزاد در راستای خطوط میدان الکتریکی شتاب گرفته و به سمت سطح عایق یا الکتروود داخلی و یا الکتروود خارجی (بسته به قطبیدگی آنها) حرکت می‌کنند. در دستگاه پلاسمای کانونی معمولاً قطبیدگی الکتروود داخلی مثبت است و در نتیجه الکترون‌ها به سطح عایق می‌چسبند و سطح عایق دارای بار منفی می‌شود. به علت نیروی لورنتس، لایه ایجاد شده به سمت بالا حرکت کرده و وقتی به انتهای عایق می‌رسد دو الکتروود را به هم متصل می‌کند. لایه‌ی ایجاد شده به روش تنگش معکوس از سطح عایق جدا می‌شود. بعد از گذشت زمانی حدود ۵۰ تا ۵۰۰ نانوثانیه رسانش لایه‌ی ایجاد شده به اندازه کافی زیاد شده و در نتیجه تخلیه‌ی الکتریکی اولیه به لایه‌ی پلاسمایی تبدیل می‌شود. در واقع دو لایه جبهه یونیزاسیون و یک پیستون مغناطیسی تشکیل می‌شود [۲۸،۲۹]. در این قسمت مرحله‌ی فاز شکست به اتمام می‌رسد و ساختار پلاسمای کانونی وارد فاز بعدی (فاز محوری) می‌شود. با ملاحظه‌ی ولتاژ مربوط به الکتروودهای دستگاه پلاسمای کانونی می‌توان مشاهده کرد که خیزشی در ولتاژ، در مرحله‌ی شکست مطابق شکل ۲-۲ ایجاد می‌شود. مقدار و شدت این خیزش ولتاژ به پارامترهای مدار الکتریکی دستگاه وابسته می‌باشد.



شکل ۲-۲: نمونه‌ای از نمودار پروب ولتاژ

آقای مدر [۱۳] در گزارشی تأکید کردند که متقارن بودن یونیزاسیون اولیه، برای تشکیل لایه اولیه جریان بسیار ضروری است. همچنین ایشان با استفاده از عکس‌برداری سریع مشاهده نمودند که وقتی عدم تقارن وجود دارد میزان تولید اشعه ایکس و نوترون‌ها در مقایسه با حالت نرمال کاهش می‌یابد. دانگزا^۱ و همکارانش [۲۳] گزارش دادند که وقتی فشار گاز کاری در دستگاه پلاسمای کانونی خیلی پایین (کمتر از ۰/۱ میلی‌بار) باشد، تخلیه الکتریکی در قسمت انتهایی و یا در کل حجم بین الکترودها اتفاق می‌افتد. همچنین وقتی که فشار گاز به اندازه کافی زیاد (بیشتر از ۱۰ میلی‌بار) باشد، یک سری رشته فیلامان‌هایی تمایل دارند که بین الکترودهای هم‌محور اتفاق بیافتند [۲۴]. بروسکی^۲ و همکارانش در گزارشی [۳۰] پیکربندی‌های مختلف الکترودها و عایق را در بهینه کردن دستگاه پلاسمای کانونی ۱۳ کیلوژولی بررسی نمودند. بعد از انجام بررسی‌ها دریافتند که اگر از کاتدهایی با لبه‌ی تیز استفاده کنند شکست خیلی بهتر انجام شده و سیستم دارای قابلیت تکرار پذیری بهتری خواهد شد.

با استفاده از آزمایش‌های انجام شده توسط دستگاه‌های پوسیدان^۳ و پی‌اف [۳۱]^۴ دریافتند که جنس عایق اطراف آند تأثیر خیلی مهمی روی به اشباع رسیدن نوترون‌های تولیدی دارد. به خصوص که اگر آزمایش‌ها در انرژی‌های بالا (چند صد کیلو ژول) صورت پذیرد. در دستگاه پوسیدان وقتی از عایق جنس

¹ Donges

² Borowiecki

³ Poseidon

⁴ PF-360

پیرکس^۱ استفاده نمودند، نوترون‌ها در انرژی ۳۰۰ کیلوژول شروع به اشباع شدن نمودند. با استفاده از عایق سرامیکی وضع به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود یافت.

۲-۲-۲ فاز رانش محوری

مرحله بعدی در تکامل تخلیه پلاسمای کانونی، فاز رانش محوری یا به طور ساده‌تر فاز محوری می‌باشد. در این مرحله به علت وجود میدان مغناطیسی و جریان ناشی از شارش و در نتیجه نیروی لورنتس، لایه جریان به سمت باز الکترودها حرکت می‌کند. در شکل ۲-۱ این موقعیت برای مدل مدر با شماره‌های ۲ و ۳ نمایش داده شده است. همانطور که در قسمت قبل توضیح داده شد در انتهای مرحله‌ی شکست، لایه جریان تشکیل می‌شود. نیروی لورنتس دارای دو مؤلفه‌ی شعاعی (در راستای شعاع آند) و طولی (در راستای طول آند) است. قسمت طولی از طریق نیروی $j \times B$ لایه جریان را به سمت انتهایی بالای الکترودها داخلی، حرکت می‌دهد و قسمت شعاعی نیروی لورنتس، لایه‌ی جریان را به سمت الکترودهای بیرونی سوق می‌دهد. بعلاوه وابستگی چگالی جریان و میدان مغناطیسی B_θ به عکس فاصله از محور، مقدار این نیرو در نزدیک آند قوی‌تر می‌باشد. این عامل باعث می‌شود که سرعت لایه‌ی جریان در نزدیکی سطح الکترودها مرکزی بیشتر شود. نتیجه‌ی این اختلاف سرعت، سهمی شدن شکل لایه‌ی جریان می‌باشد. دو شرط که در زیر مطرح می‌شوند، باعث می‌شوند که فاز محوری برای داشتن یک پلاسمای پرچگال و با دمای بالا مهم باشد. شرط اول ایجاب می‌کند که لایه‌ی جریان بلافاصله، نزدیک به اولین ماکزیمم در منحنی جریان تخلیه، ترجیحاً بلافاصله بعد از ماکزیمم، به محور آند برسد. این شرط برای کلیه‌ی دستگاه‌ها لازم است و نشان می‌دهد که مقدار انرژی بیشتری از بانک خازنی به ناحیه‌ی تنگش^۲ انتقال می‌یابد. برای هر دستگاه پلاسمای کانونی، مطالعات بهینه‌سازی ایجاب می‌کند که اختلاف زمان بین ماکزیمم جریان تخلیه و انتهای مرحله‌ی فاز شتاب محوری باید بر اساس پارامترهای اعمالی بهینه شود. شرط دوم این است که ساختار و شکل لایه‌ی پلاسمای باید دارای مشخصه‌های معینی برای تنگش بهتر باشد. شرط اول یک شرط اساسی و معمول در بهینه‌سازی دستگاه پلاسمای کانونی، برای انتقال هر چه بیشتر انرژی از بانک خازنی به ناحیه تنگش است. شرط دوم ایجاب می‌کند که لایه جریان متقارن بوده و دارای شکلی صاف و بدون پستی و بلندی و دارای یک ساختار یکنواخت و نازک باشد. طول عمر این فاز حدود ۱ تا ۴ میکروثانیه است. برهمکنش مماسی مهمی در طی این فاز وجود ندارد و فقط یک نیروی عمود بر سطح لایه است که در همه جا حضور دارد. مسیر آزاد میانگین برای برخورد میان الکترون‌ها،

¹ Pyrex

² Pinch

یون‌ها و اتم‌ها در این مرحله با فشار گاز پر شده، خیلی کوچکتر از حالت گاز عادی است. ضربه‌ای دینامیکی در اثر حرکت سریع لایه جریان وجود دارد. این ضربه گاز را متراکم و گرم می‌کند. بنابراین ساختار لایه دارای ناحیه‌ای یونیده، متراکم، داغ و پیچیده است [۳۱]. در این مرحله از تکنیک‌های اندازه‌گیری متفاوتی از قبیل پروب مغناطیسی (برای آشکارسازی پیستون مغناطیسی) [۳۲]، روش‌های آشکارسازی اپتیکی و اسپکتروسکوپی از قبیل شلرن^۱، سایه‌نگاری لیزری^۲، روش‌های تداخل سنجی، دوربین‌های تصویر برداری سریع و دیگر سیستم‌های آشکارسازی نوری استفاده می‌شود [۳۳]. سرعت محوری اندازه‌گیری شده برای لایه پلاسمایی در این مرحله حدود $(\frac{cm}{\mu s})$ ۱۵-۱۷ می‌باشد [۳۴].

در دستگاه‌های بزرگ پلاسمای کانونی، کسر قابل ملاحظه‌ای (حدود ۰.۵٪) از جریان که در دستگاه شارش می‌یابد، پشت لایه جریان قرار می‌گیرد. ضخامت لایه‌ی جریان را حدود ۲ تا ۴ سانتی‌متر برآورد کرده‌اند [۳۵]. در پایان این فاز، یک طرف لایه جریان (سمت نزدیک آند) طرف باز آند را جاروب می‌کند. انتهای دیگر لایه‌ی جریان، به طور پیوسته در امتداد کاتدها حرکت می‌کند و به وسیله‌ی آن قسمت بزرگی از پلازما روی هم انباشته شده و در جهت محوری جاروب خواهد شد. تنها کسر کوچکی از لایه‌ی پلازما در انتهای فاز محوری در تنگش‌نهایی تأثیر خواهد داشت.

۲-۳ فاز شعاعی

در انتهای مرحله‌ی شتاب‌گیری محوری، لایه‌ی جریان انتهای الکتروود مرکزی را جاروب نموده و در اثر مؤلفه‌ی شعاعی نیروی $j \times B$ پلازما شروع به تراکم کرده و در بازه‌ی زمانی بین ۵۰ الی ۲۰۰ نانو ثانیه، بسته به مشخصات دستگاه پلازما کانونی، متراکم می‌شود. این وضعیت در موقعیت ۳ و ۴ شکل ۱-۲ نشان داده شده است. این مرحله شبیه به دستگاه تنگش محوری است. البته با این تفاوت که در پلازما کانونی این فرایند سریعتر و با پلاسمایی متراکم‌تر و داغ‌تر اتفاق می‌افتد. فاز شعاعی به علت تشکیل یک پلاسمای داغ و چگال و همچنین مشخصه‌هایی از قبیل گسیل اشعه ایکس، تولید ذرات باردار پر انرژی و همچنین گسیل نوترون‌های پرانرژی (در صورت استفاده از گاز کاری دوتریوم) از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است.

¹ Schlieren

² Shadowgraphy

در طی مرحله شعاعی، تغییرات سریع در اندوکتانس باعث تولید میدان قوی الکتریکی در ستون پلاسما می‌شود. جریان الکتریکی در طی این فاز ثابت باقی می‌ماند و در نتیجه میدان الکتریکی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$E = I \frac{dL}{dt} \quad (1-2)$$

در رابطه‌ی فوق I جریان تخلیه و $\frac{dL}{dt}$ نشان دهنده‌ی تغییرات زمانی اندوکتانس است.

فاز شعاعی را می‌توان به چهار زیر گروه تقسیم نمود:

الف) فاز تراکم^۱، ب) فاز شبه آرام^۲، ج) فاز ناپایدار^۳ و د) فاز واپاشی^۴ [۱۹].

این زیرگروه بندی‌ها بر اساس مشاهدات تجربی می‌باشند. در بخش زیرین این زیر گروه‌ها شرح داده خواهند شد.

۲-۲-۳-۱ فاز تراکم

در انتهای مرحله تراکم، تنگش نقش مهمی را در پلاسمای کانونی بازی می‌کند. فاز تراکم بعنوان اولین قسمت فاز شعاعی، از فروریزش^۵ ناگهانی لایه جریان با تقارن شبه استوانه‌ای (قیفی شکل) به سمت محور الکترودها، بعلت نیروی لورنتس آغاز می‌شود. این حرکت انفجاری وقتیکه شعاع ستون پلاسما به مینیمم مقدار خود و چگالی آن به مقدار ماکزیمم خود (یعنی $n \sim 10^{19} \text{cm}^{-3}$) برسد، پایان می‌یابد. زمان مربوط به اولین تراکم پلاسما در شعاع مینیمم ($r = r_{\min}$) بعنوان مرجع زمانی ($t = 0$) در نظر گرفته می‌شود. سرعت لایه‌ی جریان در فاز فروریزش در محدوده‌ی $(\frac{cm}{\mu s})$ ۶۰-۷ می‌باشد که به شرایط اولیه‌ی آزمایش مانند نوع گاز کاری، شکل هندسی الکترودها، چگالی جریان و ساختار لایه جریان بستگی دارد [۲۹، ۳۶]. مکانیزم اصلی گرمایش پلاسما قبل از آنکه لایه‌ی جریان به محور آند برسد، گرمایش ضربه‌ای است. با در نظر گرفتن این مکانیزم دمای الکترون‌ها در این فرایند به ۱۰۰ eV می‌رسد که در مقایسه با دمای یون‌ها که حدود ۳۰۰ eV است، سرد محسوب می‌شوند [۳۷]. بعد از تبدیل ساختار پلاسمایی به ستون پلاسما، گرمایش ژولی بعنوان مهمترین فرایند گرمایش محسوب می‌شود [۳۱]. ستون پلاسما به صورت بی‌دررو شروع به متراکم شدن می‌کند تا اینکه بصورت تنگیده در می‌آید. پیکوک^۶ [۳۸] و همکارانش

¹Compression phase

²Quiescent phase

³Unstable phase

⁴Decay phase

⁵ Collapse

⁶ Peacock

مشاهده کردند که ناپایداری ریلی تیلور در ۳۰ نانوثانیه قبل از انتهای این مرحله اتفاق می‌افتد. این نوع ناپایداری با کاهش سرعت شعاعی، میرا می‌شود [۳۹]. در پایان این مرحله میدان مغناطیسی به سرعت به ستون پلاسما نفوذ خواهد کرد. پخش سریع میدان مغناطیسی در پلاسما باعث تشکیل مقاومت غیر عادی قوی‌ای در پلاسما خواهد شد [۱۹]. در این وضعیت اندوکتانس (زمانی که جریانی از یک سیم پیچ عبور می‌کند انرژی بصورت میدان مغناطیسی در آن ذخیره می‌شود. زمانیکه شدت جریان تغییر می‌کند میدان مغناطیسی متغیر با زمان، یک ولتاژ را در هادی تولید می‌کند و به تبع آن یک جریان تولید می‌شود و این جریان با تغییرات جریان اصلی مخالفت می‌کند که به این خاصیت مدارها، اندوکتانس یا خودالقایی گفته می‌شود) پلاسما افزایش خواهد یافت [۴۰]. پیک ایجاد شده در منحنی ولتاژ و همچنین فرورفتگی در منحنی مشتق جریان نشان دهنده افزایش امپدانس (مقاومتی ظاهری است که تحت یک اختلاف پتانسیل در برابر یک جریان الکتریکی ظاهر می‌شود، اگر جریان و ولتاژ متناوب باشند امپدانس مقدار مختلط و اگر جریان و ولتاژ مستقیم باشند امپدانس مقداری حقیقی دارد و واحد آن اهم است) پلاسما می‌باشند. نوسانات با فرکانس بالا که در ابتدای نمودار و همچنین در هنگام تنگیدگی مشاهده می‌شود بعلت اتصال خط انتقال بانک خازنی به الکترودها است [۴۱]. دمای نهایی الکترون‌ها در این فاز تا حدود ۱ تا ۲ کیلو الکترون ولت افزایش می‌یابد. مقادیر ماکزیمم چگالی و دمای الکترون و یون را با استفاده از روش‌هایی چون اسپکتروسکوپی [۴۲]، تداخل سنجی [۴۳]، پراکندگی نور لیزر [۳۱] و سایر روش‌ها بدست می‌آورند.

اغلب از رابطه‌ی تعادلی بنت^۱ که در زیر آورده شده است برای تخمین دمای ناحیه‌ی تنگش استفاده می‌کنند. مطابق رابطه‌ی بنت دمای نهایی، تنها به جریان I و چگالی N وابسته است.

$$T \sim \frac{I^2}{N} \quad (2-2)$$

همانطور که از رابطه بالا مشخص است برای یک جریان خاص، دما و چگالی رابطه‌ی عکس دارند. برای بدست آوردن مینیمم شعاع تنگش در این مرحله از مدل‌های کامپیوتری استفاده می‌کنند. البته با نتایج تجربی نیز سازگار است.

۲-۲-۳ فاز شبه آرام

این فاز با آغاز حرکت ستون پلاسمای متراکم شده شروع می‌شود. دمای الکترون‌ها در این فاز تا حدود ۶۰۰ الی ۸۰۰ الکترون ولت کاهش می‌یابد. دمای یون‌ها در حدود ۷۰۰ الکترون ولت برآورد شده است

¹ Bennett

[۳۱]. چگالی پلاسما نیز تا حدود $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ کاهش می‌شود، تعداد نوترون‌ها تا حدود 5×10^5 نوترون بر شات اندازه‌گیری شده است [۳۱] که در مقایسه با کل نوترون‌ها ($\sim 10^9$) که بطور تجربی به دست آمده است، قابل چشم‌پوشی است. در طی این فاز ستون پلاسما در دو جهت شعاعی و محوری گسترش می‌یابد. میزان بسط یافتگی در راستای شعاعی به علت وجود فشار مغناطیسی کمتر می‌باشد. اما پلاسما در جهت محوری بدون هیچگونه مانعی گسترش می‌یابد. بنابراین یک جبهه ضربه^۱ در راستای محوری ایجاد می‌شود.

وقتی که فاز شتاب‌گیری محوری آغاز می‌شود یک تغییر ناگهانی در اندوکتانس پلاسما به وجود خواهد آمد. این تغییرات سریع در اندوکتانس باعث تولید یک میدان الکتریکی قوی در ستون پلاسما می‌شود. این میدان الکتریکی باعث شتاب گرفتن یون‌ها و الکترون‌ها در دو جهت مخالف می‌شود. افزایش شدت میدان الکتریکی باعث افزایش سرعت سوقی نسبی بین الکترون‌ها و یون‌ها می‌شود، این سرعت سوقی تقریباً با سرعت حرارتی الکترون‌ها برابر می‌شود. این موضوع به عنوان شرطی برای آغاز ناپایداری‌های ریز از قبیل ناپایداری سیکلوترونی الکترون و شکل‌های مختلفی از ناپایداری‌های پرتو-پلاسما است. انتهای فاز شبه آرام ناپایداری سوسیسی^۲ ($m=0$) به علت افزایش ناگهانی دمای الکترون‌ها آغاز می‌شود. ستون پلاسما به علت ناپایداری $m=0$ دوباره شروع به تراکم می‌کند.

با استفاده از این نتیجه می‌توان طول عمر تنگش (t_p) را به عنوان زمان بین اولین تراکم و زمان آغاز $m=0$ تعریف نمود. ارتفاع و شعاع پلاسمای تنگیده (پینچ) به شعاع الکتروود مرکزی (آند) وابسته است [۴۴،۴۵].

۲-۲-۳ فاز ناپایدار

این مرحله به خاطر مکانیزم‌هایی مانند اشعه‌ی ایکس نرم و اشعه‌ی ایکس سخت، یون‌ها و الکترون‌های سریع و همچنین گسیل نوترون‌ها و دوترون‌ها در واکنش D-D، به عنوان مهمترین مرحله بشمار می‌رود. به علت رشد ناپایداری $m=0$ میدانی الکتریکی القایی افزایش یافته و در نتیجه باعث شتاب‌گیری الکترون‌ها به سمت آند و یون‌ها به سمت کاتد می‌شود. چگالی پلاسما در ناحیه‌ی تنگش دوباره تا 10^{19}cm^{-3} افزایش می‌یابد. در این فاز با استفاده از تداخل‌سنج تفکیک زمانی، وجود یک موج یونیده‌کننده محوری نیز گزارش شده است [۳۱،۴۶]. این موج به سرعت شتاب گرفته و از جبهه‌ی ضربه‌ی محوری که بعلاوه رشد محوری ستون پلاسما ایجاد شده است، سبقت می‌گیرد. آغاز موج یونیده‌کننده بر آغاز اولین پالس

¹ Shock

² Sausage instability

اشعه ایکس سخت و نوترون‌ها منطبق است. در اثر بمباران آند توسط الکترون‌های گسیل شده، مقدار زیادی ناخالصی وارد فضای پلاسما می‌شود. همچنین بمباران آند توسط الکترون‌های گسیل شده باعث کاهش جریان پیز-برژنسکی^۱ که عامل انفجار ستون پلاسما در نزدیکی آند است، خواهد شد و در نتیجه ستون پلاسما شروع به واپاشی می‌کند [۴۷]. از هم گسیختگی پلاسما تا زمانیکه کل ستون پلاسما از بین برود، ادامه می‌یابد. در طی این روند چگالی پلاسما رفته رفته کمتر می‌شود. با استفاده از چگالی جریان سرعت سوقی الکترون‌ها حدود $2 \times 10^7 \frac{m}{s}$ است که از سرعت حرارتی الکترون‌ها یعنی $6 \times 10^6 \frac{m}{s}$ بیشتر است. با این توصیف انرژی قابل ملاحظه‌ای به داخل پلاسما تزریق شده است که باعث افزایش انرژی درونی پلاسما می‌شود. البته با استفاده از تابش ترمزی می‌توان نتیجه گرفت که دمای الکترون‌ها تا حدود ۴ الی ۵ کیلوالکترون‌ولت افزایش پیدا کرده است.

۲-۲-۳-۴ فاز واپاشی

آخرین مرحله از فاز شعاعی یا به عبارت دیگر آخرین مرحله از دینامیک پلاسمای کانونی فاز واپاشی است. در هنگام تنگش زمانی که چگالی پلاسما به حدود $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ رسید، این مرحله شروع می‌شود. در طی فاز واپاشی به علت از بین رفتن ستون پلاسما یک ابر پلاسمایی نازک، داغ و بزرگ تولید می‌شود. این ابر مقدار زیادی اشعه‌ی ایکس نرم در اثر فرایند تابش ترمزی گسیل می‌کند. اشعه ایکس نرم خیلی سریع در طول این فاز گسیل می‌شود. پیک اشعه‌ی ایکس نرم به عنوان اولین پیک بعد از پیک مربوط به تنگش است که دارای پهنای زمانی حدوداً ۳۰۰ نانو ثانیه است [۴۸]. پالس نوترون‌ها از آغاز فاز ناپایدار شروع شده و پیک آن تا این فاز نیز ادامه دارد.

۲-۳-۳ تابش اشعه ایکس از دستگاه پلاسمای کانونی^۲

۲-۳-۱ فرایندهای گسیل اشعه ایکس از پلاسما

۲-۳-۱-۱ مقدمه

پلاسما در واقع مجموعه‌ای از الکترون‌ها و یون‌هایی است که از یونیزه شدن یک ماده تا دماهای بسیار بالا، تشکیل شده است. دمای مربوط به این فرایند در حدود 10^7K - $5 \times 10^5 \text{K}$ یا 1KeV - 50eV می‌باشد. این چنین دماهایی به طور طبیعی در جو ستارگان وجود دارد. در زمین توسط انفجارهای هسته‌ای و یا

¹ Pease-Braginski

² X ray radiation from plasma focus

به وسیله‌ی استفاده از روش‌های کنترلی از قبیل دستگاه‌های تنگش، توکامک‌ها، اسپارک‌ها و همچنین روش کانونی کردن پرتوی نور لیزر پالسی بر روی مواد جامد و یا گاز، به این دماها می‌توان دست یافت. در دمای T_{eV} (دما بر حسب eV)، طول پیک مربوط به طیف تابشی جسم سیاه را می‌توان از رابطه‌ی

$$\lambda_{peak} = \frac{2500}{T_{eV}} \quad (3-2)$$

بر حسب آنگسترم بدست آورد. رابطه فوق به رابطه‌ی "قانون جابجایی وین"¹ معروف است. برای دماهای ارائه شده در بالا، ناحیه طول موج در محدوده‌ی $\lambda_{peak} \sim 2/5 - 5 \cdot \text{\AA}$ است که نشان دهنده ناحیه‌ی اشعه‌ی ایکس می‌باشد. انتگرال توان تابشی $P(W.m^{-2})$ به صورت زیر می‌باشد:

$$P = 1.03 \times 10^9 T_{eV}^4 \quad (4-2)$$

برای پلاسماهای مفید و کاربردی که ابعاد میکروپینچ‌های جایگزیده‌ی آن‌ها در حدود $10 - 100 \mu m$ می‌باشد، توان منتشر شده در حدود $10^7 - 10^{10} W$ خواهد بود. بنابراین این قبیل پلاسماها می‌توانند به عنوان یک چشمه‌ی خیلی قوی برای اشعه‌ی ایکس محسوب شوند. محاسبات تخمینی که در بالا مطرح شد این ایده را در ذهن ایجاد می‌کنند که پلاسماهای آزمایشگاهی (نباید آن‌ها را بعنوان یک جسم سیاه در نظر بگیریم) در مقایسه با سایر چشمه‌های اشعه ایکس، بیشترین نشر را دارند. این بیان به قانون "کوچک‌وو"² معروف است [۵].

۲-۳-۱-۲ فرایندهای گسیل

فرایندهایی که در طی آن پلاسماها گسیل پیوسته دارند عبارتند از تابش ترمزی (که در اثر برهمکنش کولنی الکترون‌ها و یون‌ها ایجاد می‌شود) و فرایند باز ترکیب (که در آن الکترون‌های آزاد در اثر فرایند باز ترکیب با یون‌ها انرژی خود را از دست می‌دهند). اگر الکترون‌های مقیدی انرژی خود را در اثر گذار از تراز بالا به تراز پایین، از دست بدهند در این صورت تابش را بصورت خطی یا گسسته خواهیم داشت. شدت‌های نسبی مربوط به گسیل‌های پیوسته و گسسته به چگونگی تشکیل پلاسما بستگی دارد. برای پلاسماهایی که از موادی با عدد اتمی بالایی تشکیل شده‌اند، تابش‌های پیوسته غالب هستند در صورتی که برای پلاسماهایی که از موادی با عدد اتمی پایین تشکیل شده‌اند تابش‌های گسسته یا خطی غالب هستند. توان مربوط به این گسیل‌ها با استفاده از روابطی که به شرایط پلاسما بستگی دارد، بدست می‌آید. در زیر فرایندهای گسیلی به صورت کیفی توصیف شده است.

¹ Wien displacement law

² Kochekov law

۲-۳-۱-۲-۱ گذارهای مقید-مقید^۱

زمانیکه یک الکترون در اتم گذاری از تراز با انرژی بالاتر به تراز با انرژی پایین تر انجام دهد، در این صورت یک فوتون گسیل می‌شود. این فرایند در شکل ۲-۳ مشخص شده است. شکل طیفی خطوط به:

(الف) طول عمر تراز با انرژی بالاتر (پهن‌شدگی طبیعی^۲)
(ب) توزیع سرعت یون‌های گسیل کننده (پهن‌شدگی دوپلری^۳)
(ج) اختلالات ایجاد شده توسط برخوردها (پهن‌شدگی برخوردی^۴)
(د) اثرات میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی (اثرات استارک و زیمن^۵)

بستگی دارد. تابش‌های ایجاد شده ممکن است با دیگر مؤلفه‌های پلاسما برهمکنش کرده و یا ممکن است دوباره جذب و یا نشر شود. که این امر باعث تغییر یافتن شکل خطوط طیفی نیز می‌شود. بنابراین با استفاده از نمای این خطوط می‌توان اطلاعات زیادی در مورد پلاسما بدست آورد. در دماهای خیلی بالا مواد به طور کامل یونیده می‌شوند و در نتیجه تابش مقید-مقید کمتر اتفاق می‌افتد.

۲-۳-۱-۲-۲ گذارهای مقید-آزاد^۶

یک الکترون آزاد می‌تواند توسط تراز مقید یونی جذب شود. در نتیجه باعث کاهش بار یون به اندازه‌ی واحد می‌گردد. انرژی اضافی الکترون ممکن است به صورت فوتون‌هایی گسیل شود که ما آن را تابش مقید-آزاد یا تابش باز ترکیبی می‌نامیم. این فرایند در شکل ۲-۳ مشخص شده است. طیف تابشی گذار مقید-آزاد به صورت پیوسته می‌باشد. شکل خطوط طیف به توزیع الکترون‌های آزاد و نیز سطح مقطع جمع آوری الکترون‌ها به درون تراز مقید، وابسته است.

۲-۳-۱-۳-۲ گذارهای آزاد-آزاد^۷

وقتی الکترون آزادی با ذره آزاد دیگری برخورد کند از سرعتش کاسته می‌شود یا به عبارت دیگر انرژی خود را از دست می‌دهد. در نتیجه گذاری به حالت آزاد با انرژی پایین تر انجام می‌دهد. این انرژی اضافی را به صورت پیوسته از خود گسیل می‌کند که تحت عنوان تابش آزاد-آزاد یا تابش ترمزی معروف است.

¹ Bound-Bound transition

² Natural broadening

³ Doppler broadening

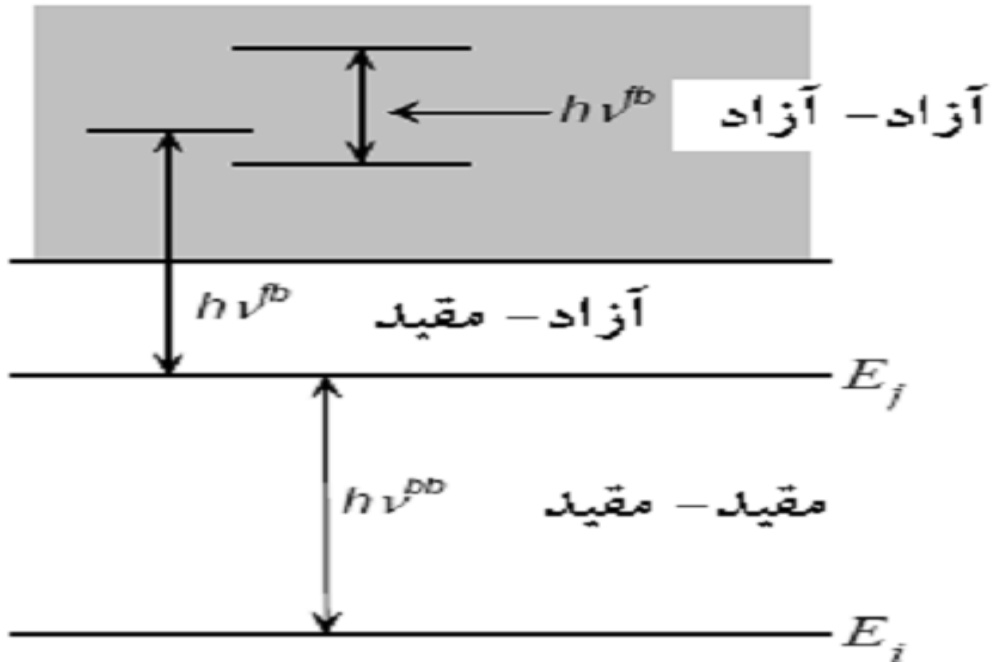
⁴ Collisional broadening

⁵ Stark and Zeeman effects

⁶ Bound-free transition

⁷ Free-Free transition

این فرایند در شکل ۲-۳ مشخص شده است. در پلاسماهایی با یونیزاسیون بالا و عدد اتمی بالا، تابش ترمزی می‌تواند غالب باشد. در این وضعیت ضریب نشر طیفی بر واحد طول موج، در حدود $\frac{6200}{T_{eV}} A^\circ$ است. با کاهش طول موج، گسیل خیلی سریع کاهش می‌یابد.



شکل ۲-۳: گذارهای مقید-مقید، آزاد-مقید، آزاد-آزاد

۲-۳-۱-۴ تابش سیکلوترونی

در پلاسماهایی که باعث تولید میدان مغناطیسی خیلی قوی (به طور مثال پلاسماهای کانونی) می‌شوند نوع دیگری از تابش با عنوان تابش سیکلوترونی وجود دارد. توان منتشر شده از طریق تابش سیکلوترونی (برای پلاسماهای هیدروژن گونه) به صورت زیر است:

$$P_c = 4.4 \times 10^{-28} n_e B^2 T_e \quad (5-2)$$

نسبت توان‌های گسیل شده حاصله از تابش ترمزی به تابش سیکلوترونی، برای پلاسماهای با یون‌های هیدروژن گونه به صورت زیر است:

$$\frac{P_B}{P_c} \approx \frac{\omega_p^4 Z^2 E_H}{\omega_c^4 T_{eV}} \quad (6-2)$$

در رابطه‌ی فوق Z بار روی یون‌ها است و $E_H=13.6 \text{ eV}$ انرژی حالت پایه‌ی اتم هیدروژن می‌باشد. برای پلاسماهای کانونی شده اگر P_C قابل مقایسه با P_B باشد، چگالی شار میدان مغناطیسی باید تقریباً حدود 100 تسلا باشد، که غیر ممکن است. بنابراین نقش تابش سیکلوترونی قابل صرف نظر کردن است.

۲-۳-۲ چشمه‌های پلاسمایی برای اشعه ایکس

تا به امروز چشمه‌های اشعه ایکس پلاسمایی که شناخته شده‌اند عبارتند از:

الف) پلاسمای تولید شده با استفاده از لیزر^۱ (LGPs)

ب) انواع متفاوتی از پلاسمای کانونی.

در پلاسماهای تولید شده با لیزر، نور لیزر بر روی نقطه کوچکی از هدف، کانونی شده و در نتیجه ماده تا دمای خیلی زیاد گرم شده و باعث تولید پلاسمای می‌شود. معمولی‌ترین چشمه‌های پلاسمای تنگیده دستگاه‌های تنگش محوری و پلاسمای کانونی هستند. از برتری‌های پلاسمای حاصله از دستگاه تنگش محوری بر پلاسمای حاصله از لیزر این است که کسر بالایی از انرژی الکتریکی ورودی به اشعه ایکس تبدیل می‌شود. محدود بودن مواد مورد استفاده در دستگاه‌های تنگش محوری (تنها مواد گازی شکل کاربرد دارند) و تکرارپذیری پایین از جمله معایب دستگاه‌های تنگش محوری هستند. دستگاه پلاسمای کانونی شکل خاصی از دستگاه تنگش محوری است. مشخصات آن در بخش‌های قبل توضیح داده شد.

۲-۳-۱ دستگاه پلاسمای کانونی به عنوان چشمه‌ی اشعه‌ی ایکس

برای مدت زمان طولانی بعد از کشف دستگاه پلاسمای کانونی، از آن اکثر به عنوان دستگاهی برای همجواری که از طریق هیدروژن و ایزوتوپ‌های آن کار می‌کرد، استفاده می‌شد و توجه خیلی کمی به آن به عنوان چشمه‌ی اشعه ایکس می‌شد. در طی دهه‌ی اخیر توجه زیادی به پلاسمای کانونی به عنوان چشمه‌ی اشعه ایکس نرم شده است. پلاسمای تنگیده شده با دمای الکترونی از چند صد الکترون ولت تا چند کیلو الکترون ولت و چگالی در حدود 10^{19} cm^{-3} به عنوان یک چشمه‌ی قوی برای نشر اشعه‌ی ایکس بشمار می‌آید. این دستگاه از سه طریق اشعه ایکس گسیل می‌کند که عبارتند از: الف) تابش ترمزی ب) باز ترکیب و ج) باز تحریک. دو فرایند اول باعث گسیل طیف پیوسته و فرایند سوم باعث گسیل گسسته‌ی اشعه‌ی ایکس از پلاسمای می‌شود. طیف تابشی انرژی در پلاسمای کانونی در ناحیه‌ی اشعه‌ی ایکس گسترده‌ی وسیعی را از حدود 1 KeV تا 500 KeV را شامل می‌شود و طول عمر اشعه ایکس از

¹ Laser-generated plasma

چند نانو ثانیه تا چند صد نانو ثانیه به طول می‌انجامد. انتگرال انرژی نشان می‌دهد که کسر قابل توجهی از انرژی الکترومغناطیسی، در بانک خازنی دستگاه پلاسمای کانونی ذخیره می‌شود. فرایندهای تابشی الکترومغناطیسی در دستگاه پلاسمای کانونی عبارتند از: "تابش‌های گرمایی شبه تعادلی"^۱ از پلاسمای ماکروسکوپی و تابش‌های مربوط به برهمکنش بین پرتوهای الکترونی با یک هدف غیر پلاسمایی (یعنی الکترودها) و یا با چگالی الکترون‌هایی که بطور تناوبی در حال حرکت هستند [۴۹]. برخورد پرتوهای الکترونی با انرژی غیر گرمایی بالا به سطح الکتروود مرکزی (آند) باعث گسیل اشعه‌ی ایکس سخت می‌شود. تابش اشعه‌ی ایکس سخت با تولید نوترون، زمانیکه از گاز کاری دوتریوم استفاده می‌کنیم رابطه‌ی مستقیم دارد، به گونه‌ای که هرچه تابش اشعه‌ی ایکس سخت بیشتر باشد مقدار نوترون بیشتری بدست می‌آید [۵۰].

مدت زمان زیادی است که اشعه‌ی ایکس نرم گسیل شده از دستگاه پلاسمای کانونی مورد مطالعه قرار گرفته است و در این مدت از روش‌های اندازه‌گیری زیادی برای بررسی اشعه‌ی ایکس نرم استفاده شده است.

از این وسایل اندازه‌گیری می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱) دوربین‌های روزنه سوزنی^۲ (با یک یا چند روزنه و فیلترهای مناسب) برای ثبت ناحیه گسیل و توزیع طیف اشعه ایکس نرم استفاده می‌شود.

۲) صفحات میکرو کانالی^۳ قرار گرفته شده در یک پیوندگاه که با همراهی دوربین‌های روزنه‌ی سوزنی، برای بررسی توزیع فضایی اشعه ایکس نرم استفاده می‌شود.

۳) آشکارسازهای نیمه رسانا^۴ که با استفاده از فیلترهای مناسب برای اندازه‌گیری توزیع فضایی اشعه‌ی ایکس نرم مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۴) طیف نگار کریستالی اشعه ایکس^۵ که از آن برای تحلیل خطوط طیفی اشعه ایکس استفاده می‌کنند.

۵) عکسبرداری سریع از اشعه ایکس^۶ که از آن برای تعیین توزیع گرمایی اشعه‌ی ایکس در فضای یک بعدی (شعاعی یا محوری) استفاده می‌شود.

¹ Quasi-equilibrium thermal radiation

² Pinhole cameras

³ Micro channel plates

⁴ Semiconductor detectors

⁵ Cristal x-ray spectrographs

⁶ X-ray streak photography

۶) فیلم های اشعه ای ایکس، عایق های اشعه ای ایکس و گرماسنج های پالسی اشعه ای ایکس که تنها برای اندازه گیری اشعه ایکس نرم کاربرد دارند.

مطالعات روی محورهای الکترودی در دستگاه پلاسمای کانونی نشان داده است که محل شروع گسیل اشعه ایکس نرم (یعنی آن اشعه ای ایکسی که انرژی آن کمتر از 10 KeV باشد) در قسمت انتهایی و باز الکترودها و در مجاورت سطح الکتروود مرکزی است. عکس های انتگرال زمانی از این ناحیه، تقریباً یک شکل استوانه ای را نشان می دهند. قطر این استوانه می تواند از حدود 1 mm تا 10 mm باشد که تقریباً از مرتبه شعاع آند است و ارتفاع آن می تواند بین چند میلی متر تا چند سانتی متر متغیر باشد. عکس های فیلتر شده اشعه ای ایکس یک ساختار مشخصی از یک تابش کوچک و با شدت بالا را نشان می دهند که اغلب پژوهشگران آن را با عنوان نقطه ای داغ^۱، دانه ای پلاسما^۲، نقطه ای روشن^۳ و میکروپینچ^۴ می شناسند [۵].

چویی^۵ و همکارانش [۵۱] گزارش دادند که ابعاد نقطه ای داغ پلاسما در حدود $100\text{ }\mu\text{m}$ می باشد و 5 nm ثانیه قبل از تنگش رخ می دهد. آن ها نتیجه گرفتند زمانیکه ناپایداری $m=0$ شروع به از بین بردن ستون پلاسما می نماید، دیگر نقطه ای داغ مشاهده نمی شود.

تحلیل جزییات فاصله ای بین سطوح عکس های اشعه ای ایکس [۵۲] حضور یک ساختار مارپیچی با توان گسیل بالا را در مرکز این عکس ها نشان می دهند که می توانند به ما در توضیح تولید میدان مغناطیسی محوری و آرامش ستون پلاسما در دستگاه پلاسمای کانونی کمک کنند.

برای دستگاه های پلاسمای کانونی با انرژی پایین، که با گاز کاری دوتریم و فشار مناسب پر شده است، مدت زمان گسیل اشعه ای ایکس بین 60 تا 70 ns ثانیه می باشد و نمودار گسیل دارای سه پیک است. اولین پیک مربوط به گسیل اشعه ایکس از ستون پلاسمای چگال و تنگیده (پینچ) در انتهای فاز تراکم است. دومین پیک مربوط به ستون پلاسمای ناپایدار است و سومین پیک به نشر اشعه ای ایکس از سطح الکتروود داخلی (آند) مربوط می شود [۵۳].

محمدی و همکارانش [۵۴] گزارش دادند که میزان نشر اشعه ای ایکس نرم از دستگاه پلاسمای کانونی

¹ Hot spot

² Plasma beads

³ Bright spot

⁴ Micro pinches

⁵ Choi

به شکل آند به کار رفته در دستگاه بستگی دارد. همچنین ایشان نشان دادند که بیشترین نشر مربوط به آند با سطح مسطح است و بعد از آن سطح سوزنی شکل و سپس سطح کروی شکل می‌باشد.

فاور^۱ و همکارانش خصوصیات دمایی و فضایی نشر اشعه‌ی ایکس نرم را در دستگاه پلاسمای کانونی با انرژی سه کیلو ژول و گاز کاری مخلوط هیدروژن و آرگون، مورد بررسی قرار دادند. ایشان از وجود دو دوره‌ی اصلی نشر اشعه‌ی ایکس نرم که مربوط به تنگش‌های متوالی در فرایند کانونی شدن است، خبر دادند.

جزئیات نشر اشعه ایکس به شدت، به پارامترهای دستگاه پلاسمای کانونی از جمله: فشار و ترکیب گاز کاری، انرژی ذخیره شده در بانک خازنی، جریان تخلیه، امپدانس دستگاه، جنس و هندسه‌ی الکترودها، ساختار و قطبیدگی الکتروود داخلی و ... بستگی دارد. در این میان ترکیب و فشار گاز کاری در دستگاه، بیشترین تأثیر را در گسیل اشعه ایکس دارد. زمانیکه از گاز کاری دوتریوم استفاده می‌شود، فشار بهینه برای بدست آوردن بیشترین نشر اشعه ایکس با فشار بهینه برای بدست آوردن بیشترین نوترون گسیل شده، یکی نیست [۱۵۵].

به منظور بهینه سازی دستگاه پلاسمای کانونی برای نشر اشعه‌ی ایکس، رابطه‌ی مقدار اشعه‌ی ایکس خروجی Y_x را بر حسب پیک جریان تخلیه I_{max} و شعاع تنگش r ، می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$Y_x = \frac{I_{max}^4}{r^2} \quad (۷-۲)$$

به هر حال مکانیسم دقیقی که توسط آن بتوان شدت اشعه‌ی ایکس نرم خروجی از دستگاه پلاسمای کانونی را محاسبه کرد، موضوعی بحث برانگیز می‌باشد و هنوز مورد مطالعه و بررسی پژوهشگران است.

۲-۲-۳-۲ کاربردهای دستگاه پلاسمای کانونی

همانطور که اشاره شد، دستگاه پلاسمای کانونی یک چشمه‌ی قوی برای نوترون، الکترون، یون، اشعه‌ی ایکس نرم و اشعه ایکس سخت می‌باشد. لذا از این دستگاه در زمینه‌هایی چون آموزشی، کاربردی و صنعتی می‌توان استفاده نمود.

¹ Favre

۲-۳-۲-۱ کاربردهای آموزشی

این دستگاه در زمینه‌های مختلف فیزیک مانند پلاسما، ترمودینامیک، الکترومغناطیس، اسپکتروسکوپی و فیزیک اتمی و هسته‌ای کاربردهای آموزشی فراوانی دارد و مراحل مختلف شکل‌گیری پلاسما و پینچ شدگی آن و انواع تابش‌های آن در مقاطع مختلف تحصیلی مورد تحقیق دانشجویان قرار گرفته است.

۲-۳-۲-۲ کاربردهای دستگاه پلاسما کانونی بعنوان چشمه‌ی یونی

همانطور که می‌دانیم دستگاه پلاسمای کانونی به عنوان یک چشمه‌ی قوی برای یون‌های پر انرژی بشمار می‌رود. این یون‌ها و یا به عبارت دیگر پروتون‌های سریع، دارای انرژی بیشتر از 3 MeV [۵۶] هستند. از این یون‌ها برای کاشت یونی و همچنین تهیه فیلم‌های نازک بر روی زیر لایه‌ها استفاده می‌شود [۵۷]. همچنین از این خصوصیت برای آمورفیزه کردن کریستال سیلیکون نیز استفاده می‌شود [۵۸].

۲-۳-۲-۳ کاربردهای دستگاه پلاسما کانونی بعنوان چشمه الکترونی

از خروجی‌های دیگر دستگاه پلاسما کانونی، الکترون‌های پر انرژی هستند. از این الکترون‌های پر انرژی برای لیتوگرافی استفاده می‌شود. از اشعه‌ی فرابنفش گسیل یافته از دستگاه پلاسمای کانونی برای لیتوگرافی نیز می‌توان استفاده نمود [۵۸].

۲-۳-۲-۴ کاربردهای دستگاه پلاسمای کانونی بعنوان چشمه اشعه

ایکس

یکی دیگر از کاربردهای دستگاه پلاسمای کانونی، استفاده از اشعه‌ی ایکس گسیل یافته‌ی آن است. از اشعه‌ی ایکس خروجی می‌توان برای رادیوگرافی و همچنین در میکروماشین‌های صنعتی استفاده نمود. چون دستگاه پلاسمای کانونی چشمه‌ی پالسی اشعه‌ی ایکس است لذا از این دستگاه می‌توان برای عیب شناسی اجسام سریع نیز استفاده نمود.

¹ Defectoscopy

۲-۳-۲-۵ کاربردهای دستگاه پلازما کانونی بعنوان چشمه نوترونی

همانطوریکه بیان شد، در صورتیکه از گاز کاری دوتریوم استفاده نماییم، یکی از خروجی‌های دستگاه پلاسمای کانونی نوترون می‌باشد. از این نوترون‌ها می‌توان در فعال‌سازی نوترونی در آنالیز مواد و تولید رادیوایزوتوپ‌ها استفاده نمود.

فصل سوم

مدل نظری پلاسمای کانونی و مدل تابشی اشعه ایکس

فصل سوم: مدل نظری پلاسمای کانونی و مدل تابشی اشعه ایکس

۱-۳ مقدمه

این فصل در مورد مدل فیزیکی پلاسمای کانونی، البته با در نظر گرفتن اثرات تابشی روی آن، بحث می‌نماییم. برای مطالعه‌ی دقیق پلاسمای کانونی و برای توصیف پدیده‌هایی که در این قبیل پلاسماهای داغ، پرچگال و مغناطیده تولید میشوند، دانستن مدل نظری آن ضروری است. مراحل دینامیک پلاسمای کانونی همانطور که در فصل دوم بیان شد به سه قسمت اصلی فاز شکست، فاز رانش محوری و فاز شعاعی تقسیم می‌شود. فاز شعاعی خود شامل چهار قسمت می‌باشد که عبارتند از: فاز تراکم، فاز شبه ایستا، فاز ناپایدار و فاز واپاشی. اولین بار مدل مربوط به پلاسمای کانونی توسط پروفیسور سینگ لی^۱ [۵۹] ارائه شد. این مدل در ابتدا یک کد مگنتوهیدرودینامیکی ساده بود که بعداً توسط لیو ما^۲ [۵] و شان بینگ^۳ [۶۰] کامل شد. آخرین ویرایش مدل نه تنها چگونگی شکل و شتاب گرفتن پلازما را توضیح می‌دهد، بلکه پدیده‌هایی که در فاز شعاعی رخ می‌دهند مانند گسیل اشعه‌ی ایکس از ستون پلازما، را توضیح می‌دهد. مدل ارائه شده توسط لی دارای چهار زیربخش است که در زیر بیان شده است: الف) فاز محوری بعد از فاز شکست آغاز می‌شود. در این مرحله لایه‌ی پلازما به صورت یک لایه‌ی رسانای تخت است که آند را به کاتد وصل می‌نماید (قسمت a از شکل ۱-۳). مطابق شکل لایه‌ی جریان کسری از مولکول‌های برخوردی (f_{m1}) را از پایین آند تا بالای آن جاروب می‌کند. لایه در موقعیت مکانی-محوری Z قرار دارد و فاز محوری از $Z=0$ شروع می‌شود و تا $Z=Z_0$ یعنی انتهای آند ادامه می‌یابد. بنابراین جرم لایه‌ی پلازما را در Z به صورت زیر می‌توان نوشت که در آن n_0 چگالی تعداد اتم‌ها و m_i جرم اتمی گاز کاری است:

$$f_{m1} = n_0 m_i z \pi (b^2 - a^2) \quad (۱-۳)$$

فاز شعاعی به سه زیر مرحله تقسیم می‌شود که عبارتند از: مرحله‌ی ضربه‌ی شعاعی فرودی، مرحله‌ی ضربه‌ی شعاعی منعکسه و مرحله‌ی تراکم آرام.

ب) مرحله‌ی ضربه‌ی شعاعی فرودی اولین مرحله از فاز شعاعی است. در این مرحله پلازما به صورت لوحه‌ای با شعاع بیرونی r_p (موقعیت پیستون) و شعاع درونی r_s (جبهه‌ی ضربه) و طول Z_f در نظر گرفته می‌شود. لوحه بصورت شعاعی و به کمک پیستون مغناطیسی متراکم شده و کسر f_{m2} از گاز را که در

¹ Sing Lee

² Liu Mahe

³ Shan Bing

مسیر است، جمع‌آوری می‌کند. فاز ضربه‌ی درونی در $r_p=r_s=a$ آغاز شده و وقتی جبهه‌ی موج ضربه به محور آند ($r_s=0$) رسید، تمام می‌شود.

ج) وقتی جبهه‌ی موج ضربه به محور مرکزی رسید، انرژی جنبشی ذرات در لوحه (E_k) به انرژی درونی پلاسما تبدیل می‌شود. این ضربه باعث افزایش دما و چگالی پلاسما در مرکز خواهد شد. این مرحله را فاز ضربه‌ی منعکسه می‌نامند. پلاسما در این مرحله به دو قسمت تقسیم می‌شود که عبارتند از: قسمت مرکزی (نسبتاً ساکن و یک ستون پلاسمایی داغ و پر چگال است) و قسمت بیرونی (که خیلی سریع متراکم می‌شود). در قسمت بیرونی دما و چگالی پلاسما کمتر است. مرزی که ستون مرکزی پرچگال و داغ را از پلاسمای بیرونی جدا می‌کند جبهه‌ی ضربه‌ی منعکسه نام دارد. زمانیکه تمامی ذرات به ستون پلاسمای مرکزی پیوستند، جبهه‌ی منعکسه و پیستون مغناطیسی همدیگر را در موقعیت شعاعی $r_p=r_r$ ملاقات می‌کنند.

د) بعد از فاز ضربه‌ی منعکسه، مرحله‌ی تراکم آغاز می‌شود. در این مرحله ستون پلاسما شروع به تراکم می‌کند تا زمانیکه در اثر ناپایداری‌ها از هم می‌پاشد.

۲-۳ خصوصیات الکتریکی و معادلات مدار

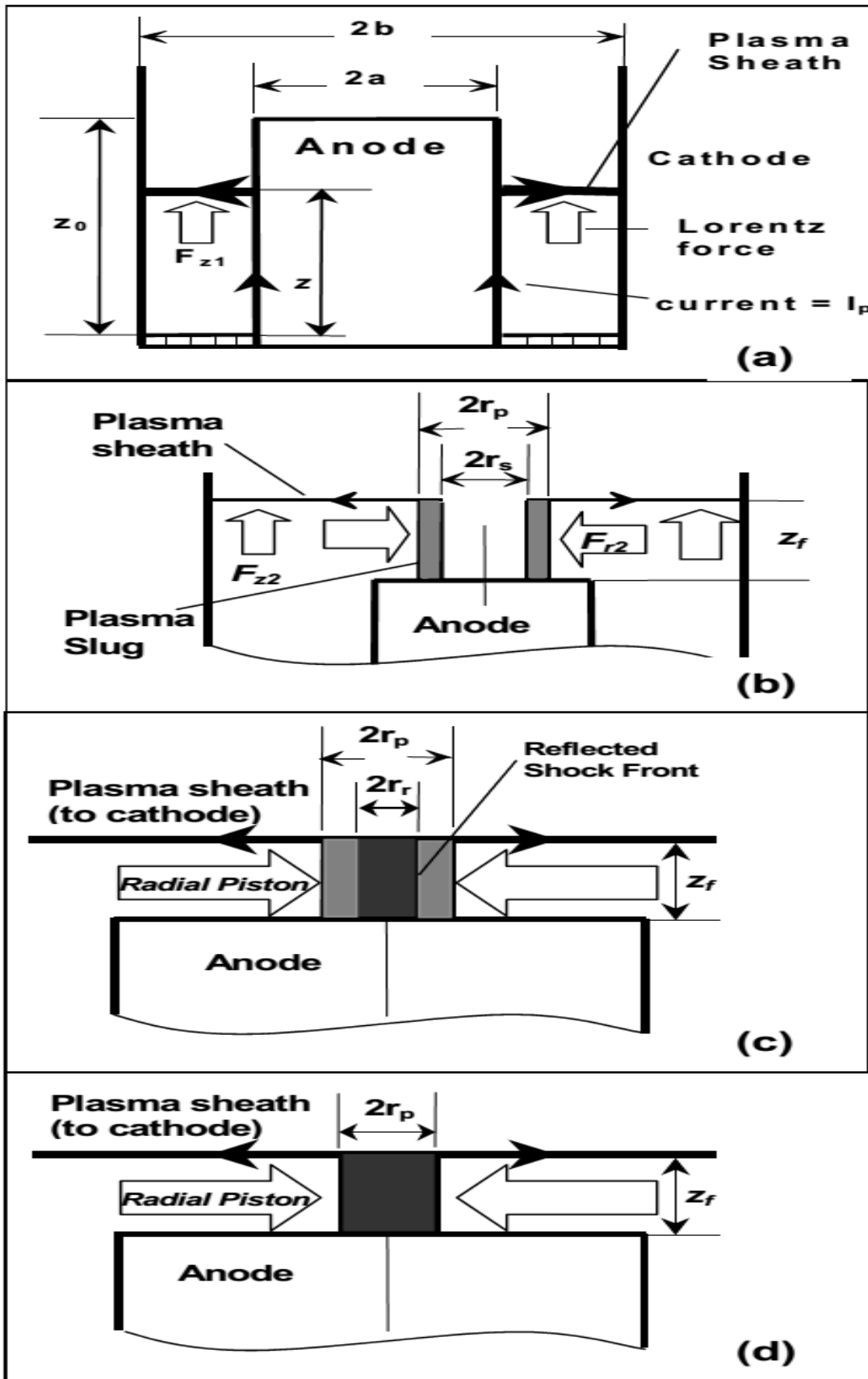
۱-۲-۳ معادلات مدار معادل

در مرحله‌ی تخلیه‌ی الکتریکی، پلاسمای کانونی را می‌توان بعنوان مؤلفه‌ای از مدار الکتریکی معادل در نظر گرفت. مدار الکتریکی معادل پلاسمای کانونی را بصورت شماتیکی در شکل (۲-۳) نشان داده‌ایم. مدار حلقه‌ی تخلیه‌ی الکتریکی بصورت یک مدار استاندارد RLC در نظر گرفته می‌شود. در این شکل R_p ، R_s ، C_0 بترتیب ظرفیت بانک خازنی، مقاومت مدار و مقاومت پلاسما می‌باشند. اندوکتانس سیستم به دو قسمت L_0 مربوط به مدار و L_p مربوط به ستون پلاسما، نشان داده شده است. h_L مقاومت نشتی در ستون پلاسما است که نشان دهنده‌ی نشتی در طول سطح عایق می‌باشد. در طی فرایند بانک خازنی تا ولتاژ V_0 شارژ می‌شود. بنا به قانون کیر شیف، معادله مربوط به مدار را می‌توان بصورت زیر نوشت:

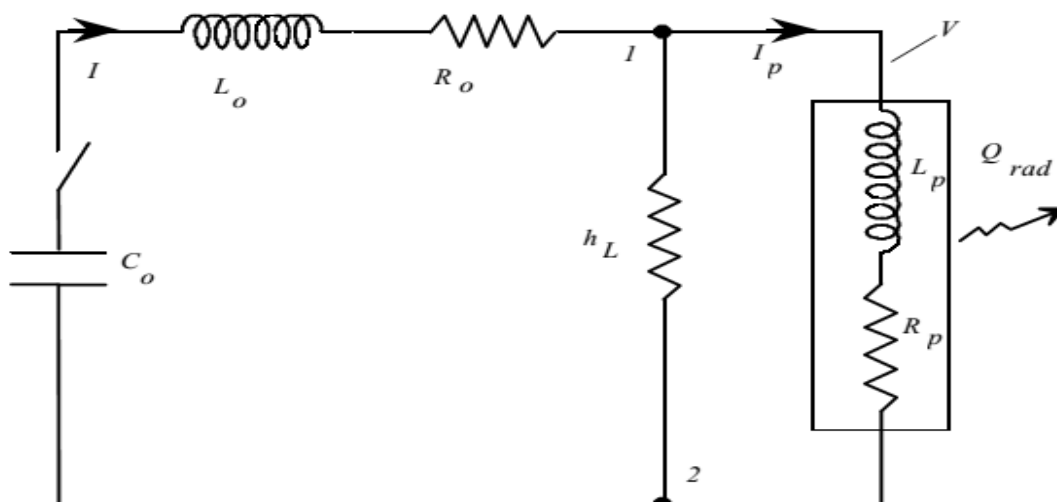
$$\frac{1}{C_0} \int_0^t Idt - R_0 I + \frac{d}{dt} (L_0 I) + R_p I_p + \frac{d}{dt} (L_p I_p) = 0 \quad (2-3)$$

و همچنین ولتاژ تیوپ (ولتاژ بین نقاط ۱ و ۲ در شکل ۲-۳) بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$V = V_0 - \frac{1}{C_0} \int_0^t Idt - R_0 I - \frac{d}{dt} (L_0 I) = R_p I_p + \frac{d}{dt} (L_p I_p) = 0 \quad (3-3)$$

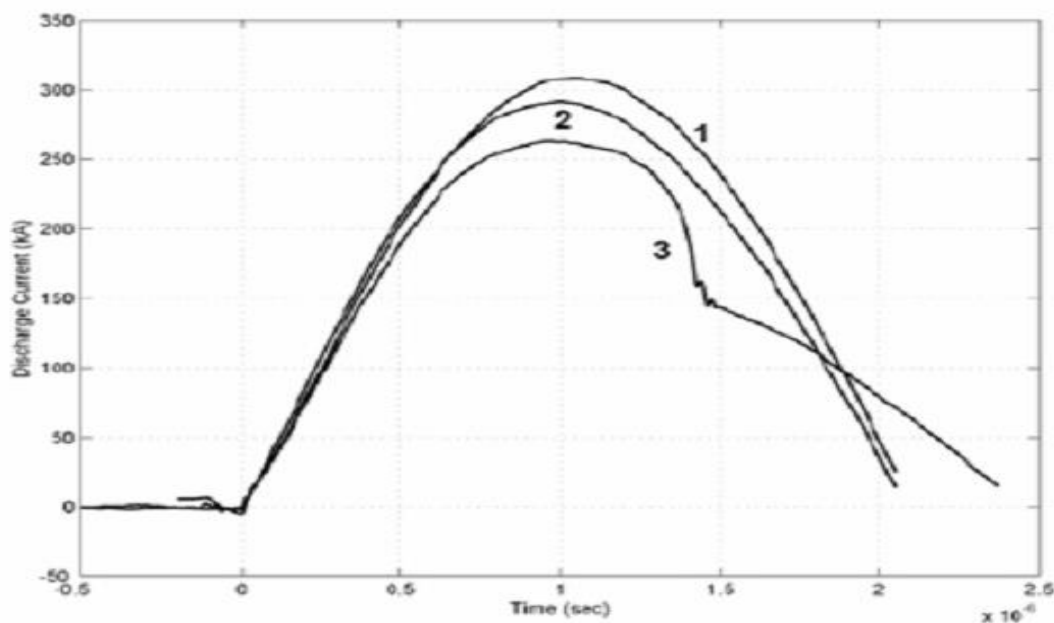


شکل ۱-۳: مراحل دینامیکی پلاسمای کانونی [۵۹]



شکل ۲-۳: مدار معادل دستگاه پلاسمای کانونی

در آزمایشگاه جریان الکتریکی دستگاه توسط پیچهای رگوفسکی اندازه‌گیری می‌شود که بعنوان یکی از مشخصه‌های پلاسمای کانونی بشمار می‌رود. نمونه‌ای از منحنی‌های جریان در شکل (۳-۳) نشان داده شده است.



شکل ۳-۳: منحنی جریان

سه منحنی به صورت زیر توضیح داده می‌شوند. منحنی اول زمانی رخ می‌دهد که نقاط ۱ و ۲ در شکل (۲-۳) به هم اتصال کوتاه شوند. در این حالت L_p و R_p از مدار خارج شده و جریان تخلیه بیشترین مقدار خود را دارد. منحنی دوم مربوط به جریانی است که در آن گازی با فشار بالا داخل تیوپ پلاسمای قرار دارد. در این حالت به علت بالا بودن جرم گاز جمع شده در لایه‌ی جریان، لایه‌ی جریان تا قسمتی

از طول آند حرکت می‌کند ولی تا انتهای آند پیش نمی‌رود تا تبدیل به ستون پلاسما (پینچ) شود. در این وضعیت R_P و L_P کوچک هستند. منحنی سوم مربوط به حالتی است که ستون پلاسما تنگیده می‌شود و یا به عبارت دیگر پلاسما روی محور مرکزی کانونی می‌شود. در این حالت یک فروافت در منحنی جریان دیده می‌شود که بیانگر افزایش در R_P و L_P می‌باشد که به علت تراکم شعاعی پلاسما صورت می‌گیرد.

۳-۲-۲ فاز رانش محوری

در فاز محوری ساختار لایه‌ی پلاسمایی به طور ساده و شماتیکی در قسمت a شکل (۳-۱) ترسیم شده است. در این مرحله لایه‌ی جریان از میان الکترودها به سمت انتهایی و باز آنها حرکت می‌کند. سیستم الکتریکی از دو گروه الکتروود استوانه‌ای و هم محور با ارتفاع z ، شعاع بیرونی b و شعاع درونی a تشکیل شده است. میدان مغناطیسی حاصل از جریان I_P به صورت زیر می‌باشد:

$$B_{\theta} = \frac{\mu}{2\pi} \times \frac{I_P}{r} \quad (۳-۴)$$

که r فاصله از محور مرکزی می‌باشد. در این عبارت I_P مقدار جریانی است که از پلاسما شارش می‌شود و از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$I_P = f_c I \quad (۳-۵)$$

در این عبارت f_c را ضریب اتلاف می‌نامند. در این فرایند نیروی لورنتس باعث حرکت رو به بالای لایه‌ی پلاسمایی می‌شود. F_{z1} همان نیروی لورنتس است و حاصله از پیستون مغناطیسی که باعث حرکت رو به بالای لایه می‌شود:

$$F_{z1} = \int_a^b I_P \times \frac{\mu I_P}{2\pi} dr = \frac{\mu I_P^2}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad (۳-۶)$$

اندوکتانس لایه‌ی پلاسما را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

$$L_{P1} = \frac{\mu}{2\pi} z \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad (۳-۷)$$

با قرار دادن این عبارت در معادله‌ی (۳-۲)، برای مشتق جریان خواهیم داشت:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{V_0 - \frac{1}{C} \int_0^t I dt - (R_0 + f_c I_P) I - \frac{\mu}{2\pi} f_c I \ln\left(\frac{b}{a}\right) \frac{dz}{dt}}{z_0 + \frac{\mu}{2\pi} f_c z \ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad (۳-۸)$$

۳-۲-۳ فاز شعاعی

در این مرحله همانطور که در قسمت b شکل (۳-۱) مشخص است، آند با شعاع a و ارتفاع Z_0 و لوحه‌ی پلاسما با شعاع r_p و ارتفاع Z_f و لایه‌ی پلاسمایی در موقعیت Z_f و کاتد با شعاع b قرار گرفته‌اند. در این حالت نیز میدان مغناطیسی القا شده را می‌توان از رابطه‌ی (۳-۴) بدست آورد. نیروی اعمال شده بر روی لوحه‌ی پلاسما، در واقع قسمت شعاعی نیروی لورنتس است که بصورت زیر می‌باشد:

$$F_{rz} = \int_0^{z_f} I_p \times \frac{\mu I_p}{2\pi r_p} dz = \frac{\mu I_p^2 Z_f}{2\pi r_p} \quad (۹-۳)$$

عبارت فوق نیروی حاصله از میدان مغناطیسی است که باعث می‌شود لوحه‌ی پلاسما متراکم شود. نیروی اعمال شده بر لایه‌ی جریان که باعث ارتباط قسمت بالای لوحه به کاتد می‌شود و جهت آن به سمت بالای محور می‌باشد بصورت زیر است:

$$F_{z2} = \int_{r_p}^b I_p \times \frac{\mu I_p}{2\pi r} dr = \frac{\mu I_p^2}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{r_p}\right) \quad (۱۰-۳)$$

اندوکتانس کل پلاسما از دو قسمت تشکیل شده است. یک قسمت مربوط سهم الکترودهایی است که بصورت استوانه‌ای رسانا و با ارتفاع Z_0 می‌باشند و دیگری مربوط به لوحه‌ی پلاسما است که با ارتفاع Z_f و شعاع خارجی r_p است. این اندوکتانس بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$L_{p2} = \frac{\mu}{2\pi} \left(z_0 \ln\left(\frac{b}{a}\right) + z_f \ln\left(\frac{b}{r_p}\right) \right) \quad (۱۱-۳)$$

با در نظر گرفتن این عبارت و معادله‌ی (۳-۲) معادله‌ی اصلی مدار بصورت زیر در می‌آید:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{V_0 - \frac{1}{C} \int_0^t I dt - (R_0 + f_c R_p) I + \frac{\mu}{2\pi} f_c I \left(\frac{z_f}{r_p} \frac{dr_p}{dt} - \ln\left(\frac{b}{r_p}\right) \frac{dz_f}{dt} \right)}{L_0 + \frac{\mu}{2\pi} f_c \left(z_0 \ln\left(\frac{b}{a}\right) + z_f \ln\left(\frac{b}{r_p}\right) \right)} \quad (۱۲-۳)$$

مشق جریان با استفاده از پیچ‌های رگوفسکی اندازه‌گیری می‌شود. خروجی پیچ‌های رگوفسکی بر حسب ولتاژ می‌باشد که اساس کار آن با استفاده از قانون القای فاراده است.

۳-۳ مدل تابشی پلاسمای کانونی

بر اساس آخرین آزمایش‌ها، یک مدل تابشی برای پلاسمای کانونی توسط آقای لی ارایه شده است که در واقع نسبت به مدل قبلی دارای قسمتی اضافه بعنوان فاز تابشی (تراکم آرام) است که تحت عنوان مدل تابشی پلاسمای یاد می‌شود [۵]. در این قسمت یک فاز ضربه‌ای منعکسه برای شروع آرامش نسبی ستون پلاسمای در شعاع مینیمم نیز تعریف می‌شود.

۳-۳-۱ پارامترهای نشر اشعه‌ی ایکس از دستگاه پلاسمای کانونی

فرایندهای گسیل اشعه‌ی ایکس از دستگاه پلاسمای کانونی را در فصل گذشته به طور کیفی مورد بررسی قرار دادیم. با توجه به دما و چگالی بالای الکترون‌ها در دستگاه پلاسمای کانونی، از مدل‌های تعادلی پلاسمای برای محاسبه‌ی پارامترهای تابشی پلاسمای می‌توان استفاده نمود. برای سادگی مدل در اینجا ما فقط تابش کل را در نظر می‌گیریم. در دستگاه پلاسمای کانونی دما و چگالی الکترون‌ها به شدت به پارامترهای دستگاه از قبیل هندسه‌ی الکترودها، فشار و نوع گاز کاری و غیره بستگی دارد. ارتفاع و طول عمر ستون پلاسمای به شدت در میزان اشعه ایکس خروجی از دستگاه تأثیرگذار است. البته ناپایداری‌ها در طول عمر ستون پلاسمای نقش مهمی را ایفا می‌کنند.

۳-۳-۱-۱ چگالی توان تابشی

همانطور که در فصل گذشته اشاره شد عمده‌ی تابش‌ها در دستگاه پلاسمای کانونی از طریق تابش ترمزی، باز ترکیب و باز تحریک رخ می‌دهند. در اینجا آن‌ها را بترتیب با P_b ، P_r و P_1 نشان می‌دهیم. قبل از ارایه‌ی فرمول‌ها و روابط، عبارات زیر را با نمادهای گفته شده معرفی می‌نماییم.

N_e	چگالی تعداد الکترون‌های پلاسمای (m^{-3})
N_i	چگالی تعداد یون‌های پلاسمای (m^{-3})
N	چگالی تعداد کل (m^{-3})
Z	تعداد بار یون‌ها
Z_{eff}	تعداد بارهای مؤثر
N_z	چگالی تعداد یون‌ها در Z مین حالت یونیزه شده (m^{-3})
$N_{z,n}$	چگالی تعداد یون‌ها در n مین حالت برانگیخته‌ی Z مین حالت یونیزه شده (m^{-3})
X_z	انرژی پتانسیل یونش Z مین یون (eV)

X_{mn} انرژی لازم برای انتقال از حالت برانگیخته‌ی m به n
 E_H انرژی یونش هیدروژن (۱۳,۶ eV)
 Z_n عدد اتمی
 T_e دمای الکترون (فرض می‌شود با دمای یون برابر است) ($^{\circ}K$)
 T_{Ev} دمای الکترون (فرض می‌شود با دمای یون برابر است) (eV)
 تمامی کمیت‌های بالا در طی پایان نامه بر حسب واحد‌های اشاره شده در بالا هستند، مگر اینکه غیر از آن بیان شود. چگالی توان تابشی، تابش ترمزی $P_{b,\nu}$ ، باز ترکیب $P_{r,\nu}$ و باز تحریک $P_{l,\nu}$ بصورت تابعی از انرژی فوتون ($h\nu$) یا فرکانس (ν) می‌باشد که به صورت زیر محاسبه می‌شود (بر حسب $W.m^3.Hz^{-1}$):

$$\begin{aligned}
 P_{b,\nu} &= 8\pi^2 \frac{16(\alpha a_0)^3}{32\pi^2} g_{ff} N_e N_z Z^2 E_H \left(\frac{E_H}{kT_e}\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{h\nu}{kT_e}\right) & (13-3) \\
 &= 6.37 \times 10^{-53} N_e N_z \frac{Z^2}{T_{ev}^{\frac{1}{2}}} \exp\left(-\frac{h\nu}{kT_{ev}}\right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{r,\nu} &= 8\pi^2 \frac{32(\alpha a_0)^3}{32\pi^2 n^3} g_{fb} N_e N_z Z^4 E_H \left(\frac{E_H}{kT_e}\right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{h\nu}{kT_e}\right) & (14-3) \\
 &= 1.73 \times 10^{-51} N_e N_z \frac{Z^4}{T_{ev}^{\frac{3}{2}} n^3} \exp\left(-\frac{h\nu - \chi_z}{kT_{ev}}\right)
 \end{aligned}$$

$$P_{l,\nu} = h\nu N_{z,n} A_{n,m} \quad (W.m^3) \quad (15-3)$$

$$\begin{aligned}
 A_{m,n} &= \frac{2\pi e^2 \chi_{mn}^2 [J]}{\epsilon_0 m_e h^2 c^3} \times \frac{g_m}{g_n} f_{mn} & (16-3) \\
 &= 6.67 \times 10^{-5} \frac{g_m}{g_n} f_{mn} \frac{1}{\lambda^2} \quad (s^{-1})
 \end{aligned}$$

که در اینجا $g_{m,n}$ وزن آماری کوانتومی حالت m و n است و $f_{m,n}$ میزان سختی نوسانگر را نشان می‌دهد. همچنین چگالی توان را بر حسب ($W.m^3$) برای سه گونه تابش می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$P_b = \int P_{b,\nu} d\nu \quad (17-3)$$

$$= 1.69 \times 10^{-38} N_e T_{ev}^{\frac{1}{2}} \sum_Z (N_Z Z^2)$$

$$P_r = \int P_{r,\nu} d\nu \quad (18-3)$$

$$= 5.5 \times 10^{-37} N_e T_{ev}^{-\frac{1}{2}} \sum_Z (N_Z Z^4)$$

$$P_l = \sum_v P_{l,v} \quad (19-3)$$

$$= 3.95 \times 10^{-35} \frac{Z_n^4}{T_{ev}} N_e N_i$$

که چگالی تابشی P_{rad} کل مجموع سه عبارت بالا می‌باشد:

$$P_{rad} = (P_b + P_r + P_l) \quad (20-3)$$

و تابش کل از رابطه‌ی زیر بدست خواهد آمد:

$$Y = \int_0^{t_p} \left(\int_0^{V_p} dV \times P_{rad} \right) dt \quad (21-3)$$

که در اینجا V_p ولتاژ پلاسما و t_p طول عمر ستون پلاسما است. باید توجه داشت که Y میزان تابش در تمامی باند طیفی را شامل می‌شود. با توجه به روابط بالا برای یک پلاسمای خاص که X_Z و Z_n مشخص است P_{rad} تابعی از $N_e, T_e, Z_{eff}, Z, N_Z, N_{Z,n}, N_i$ می‌باشد. با استفاده از مدل‌های تعادلی پلاسما مانند مدل کرونا^۱ یا مدل تابشی-برخوردی^۲ با دانستن T_e و N_i می‌توان $N_e, Z_{eff}, Z, N_Z, N_{Z,n}$ را بدست آورد. لذا P_{rad} را می‌توان در واقع تابعی از T_e و N_i دانست. بنابراین Y در واقع توسط T_e و N_i و V_p و t_p محاسبه می‌شود. طول عمر پینچ‌شدگی به شدت به پارامترهایی از قبیل انواع ناپایداری‌ها بستگی دارد که به آسانی قابل محاسبه نیستند.

۳-۱-۲-۳ نسبت گرمایی ویژه پلاسماهای داغ

نسبت گرمایی ویژه پلاسماهای داغ را که با γ نشان می‌دهند به عنوان یکی از مهمترین پارامترهای تبدیل انرژی به حساب می‌آید. آقای لی یک روش بسیار آسان برای محاسبه‌ی نسبت گرمایی ویژه ارایه داد که در آن γ تابعی از دما می‌باشد [۶۱]. مطابق با این تئوری که بر پایه‌ی تعادل انرژی استوار است نسبت شعاعی $\frac{r_p}{r_0}$ جریان ثابت پلاسمای پینچ شده به مقدار γ پلاسمای پینچ شده بستگی دارد. مقدار γ را می‌توان بر حسب آنتالپی بر واحد جرم (h) تعریف کرد:

$$h = \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{k_B T D}{m_i} \quad (22-3)$$

و ضریب جابه‌جایی را نیز می‌توان به صورت زیر تعریف نمود:

$$D = 1 + Z_{eff} = 1 + \sum_{z=1}^{Z_n} (z \cdot \alpha_z) \quad (23-3)$$

¹ Corona model

² Radiative collisional model

که در اینجا k_B ثابت بولتزمن و m_i جرم اتم یا یون و T دما و α_z شکست پلاسما از حالت پایه تا Z زمین حالت یونیزه شده است. آنتالپی پلاسما را بر حسب انرژی‌های یونش و برانگیختگی آن می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$h = \frac{5}{2} \left(\frac{R_0}{M} \right) TD + m_i^{-1} \sum_{z=1}^{Z_n} (\alpha_z \cdot I_z) + m_i^{-1} \sum_{z=1}^{Z_n} (\alpha_z \cdot E_z) \quad (24-3)$$

در اینجا I_z انرژی کل لازم برای یونش از یک حالت یونیزه تا Z زمین حالت یونیزه می‌باشد و E_z مقدار میانگین انرژی برانگیختگی بر انرژی Z زمین حالت یونیزه است. حال با استفاده از معادلات ۲۲ و ۲۴ می‌توان γ را محاسبه نمود:

$$\frac{\gamma}{\gamma-1} = \frac{5}{2} + \left(\sum_{z=1}^{Z_n} (\alpha_z \cdot I_z) + \sum_{z=1}^{Z_n} (\alpha_z \cdot E_z) \right) \cdot \frac{1}{k_B T_e D} \quad (25-3)$$

که با استفاده از مدل‌های تعادلی پلاسمایی و با داشتن دمای پلاسما می‌توان α_z را محاسبه نمود.

۳-۳-۲ محاسبه‌ی دمای الکترون

برای یک پلاسما با اندوکتانس L_p و مقاومت R_p و با نرخ تابش $\frac{dQ}{dt}$ ، توان کل ورودی باعث تولید یک ولتاژ و در نتیجه یک جریان عبوری از لایه‌ی پلاسما می‌شود:

$$\begin{aligned} P_T = I_p \cdot V &= I_p \cdot \left(\frac{d}{dt} (L_p I_p) + I_p R_p \right) \\ &= I_p^2 L_p + I_p L_p \dot{I}_p + R_p I_p^2 \end{aligned} \quad (26-3)$$

و نرخ انرژی ذخیره شده در اندوکتانس از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$P_{L_p} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L_p I_p^2 \right) = \frac{1}{2} L_p \dot{I}_p^2 + L_p I_p \dot{I}_p \quad (27-3)$$

با استفاده از این دو معادله نرخ تبدیل انرژی به انرژی پلاسما را با احتساب تابش می‌توان بصورت زیر محاسبه نمود:

$$\begin{aligned} P_p &= P_T - P_{L_p} - \frac{dQ_{rad}}{dt} \\ &= \frac{1}{2} I_p^2 L_p + I_p^2 R_p - \frac{dQ_{rad}}{dt} \\ &= \frac{1}{2} I_p^2 L_p + \frac{dQ_{joul}}{dt} - \frac{dQ_{rad}}{dt} = \frac{1}{2} I_p^2 L_p + \frac{dQ}{dt} \end{aligned} \quad (28-3)$$

که در اینجا $Q = Q_{joul} - Q_{rad}$ و نشان دهنده‌ی مقدار انرژی گرمایی کل جذب شده توسط پلاسما است. لذا انرژی پلاسما بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$E_p = \int P_p dt = \int \frac{1}{2} I_p^2 L_p dt + Q \quad (29-3)$$

از عبارت بالا اینگونه استنباط می‌شود که ترم اول می‌تواند کار انجام شده توسط سیستم روی پلاسما باشد. یعنی:

$$W = \int \frac{1}{2} I_p^2 L_p dt \quad (30-3)$$

انرژی کل پلاسما مجموع انرژی‌های پتانسیل و جنبشی در پلاسما است، یعنی:

$$E_p = \int P_p dt = E_K + U \quad (31-3)$$

با استفاده از معادلات ۲۹ و ۳۰ و ۳۱ می‌توان رابطه‌ی زیر را نوشت:

$$U = W + Q - E_K \quad (32-3)$$

بعد از محاسبه‌ی انرژی درونی، دمای پلاسما را می‌توان به طریق زیر محاسبه نمود:

$$T_e = \frac{(\gamma-1).U}{N_{ion}k(1+z_{eff})} \quad (33-3)$$

که در اینجا $N_{ion} = N_i \cdot V_p$ نشان دهنده‌ی تعداد ذرات کل در حجم پلاسما می‌باشد.

فصل چهارم

چیدمان آزمایش و تکنیک های اندازه گیری

فصل چهارم: چیدمان آزمایش و تکنیک‌های اندازه‌گیری

۱-۴ مقدمه

در روند این پایان‌نامه برای مطالعه‌ی اشعه‌ی ایکس نرم از دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود (SHUPF) که یک دستگاه پلاسمای کانونی نوع مدر با انرژی پایین است، استفاده شده است. برای آشکارسازی اشعه ایکس نرم به منظور محاسبه انرژی آن از آشکارساز ۵ کاناله دیودی با دیودهای BPX-65 استفاده شده است. در این بخش جزئیات مربوط به دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود و آشکارساز BPX-65 و نیز چیدمان آزمایش، توضیح داده خواهد شد.

۲-۴ دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود (SHUPF)

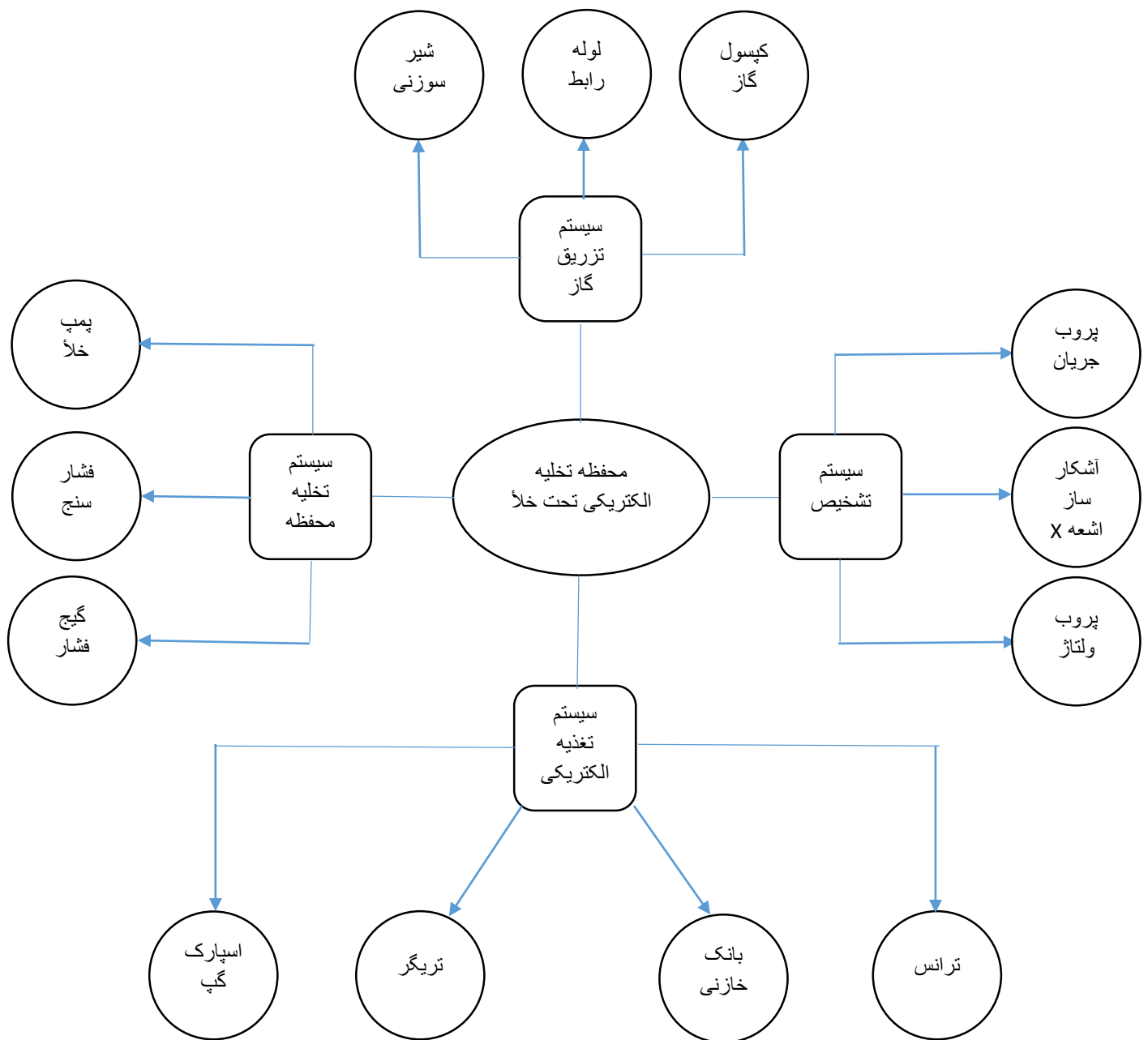
دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود یک دستگاه پلاسمای کانونی از نوع مدل مدر می‌باشد. مشخصات اصلی این دستگاه در جدول ۱-۴ بیان شده است.

جدول ۱-۴: خصوصیات دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود

پارامترها	مقادیر
ظرفیت خازن	$C_0 = 16\mu f$
اندوکتانس	$Z_0 = \sqrt{L_0/C_0} = 4m\Omega$
ماکزیمم ولتاژ	$V_0 = 12kV$
ماکزیمم انرژی ذخیره شده در بانک خازنی	$1.15 kJ$
شعاع آند	$10 mm$
شعاع کاتد	$5 mm$
طول آند	$60 mm$
طول کاتد	$60 mm$
ضخامت عایق	$2 mm$

۳-۴ توصیف ساختار دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود (SHUPF)

ساختار کلی دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود شامل هفت بخش اصلی می‌باشد که در شکل ۱-۴ به صورت شماتیکی نمایش داده شده است. البته شایان به ذکر است که سیستم‌های تشخیصی مورد استفاده در دستگاه توسط هدف آزمایش تعیین خواهند شد و قابلیت تعمیم دارند.



شکل ۱-۴: دیاگرام دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود

۴-۳-۱ محفظه‌ی تخلیه‌ی الکتریکی

محفظه‌ی تخلیه‌ی الکتریکی که به آن محفظه‌ی خلأ نیز می‌گویند به عنوان یکی از مهمترین قسمت های دستگاه پلاسمای کانونی به شمار می‌آید. داخل این محفظه، پلاسمایی با دمای بالا و چگالی بسیار زیاد و البته بسیار جایگزیده تشکیل می‌شود. شکل ۴-۲ نمایی از محفظه‌ی تخلیه الکتریکی دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود را نشان می‌دهد.

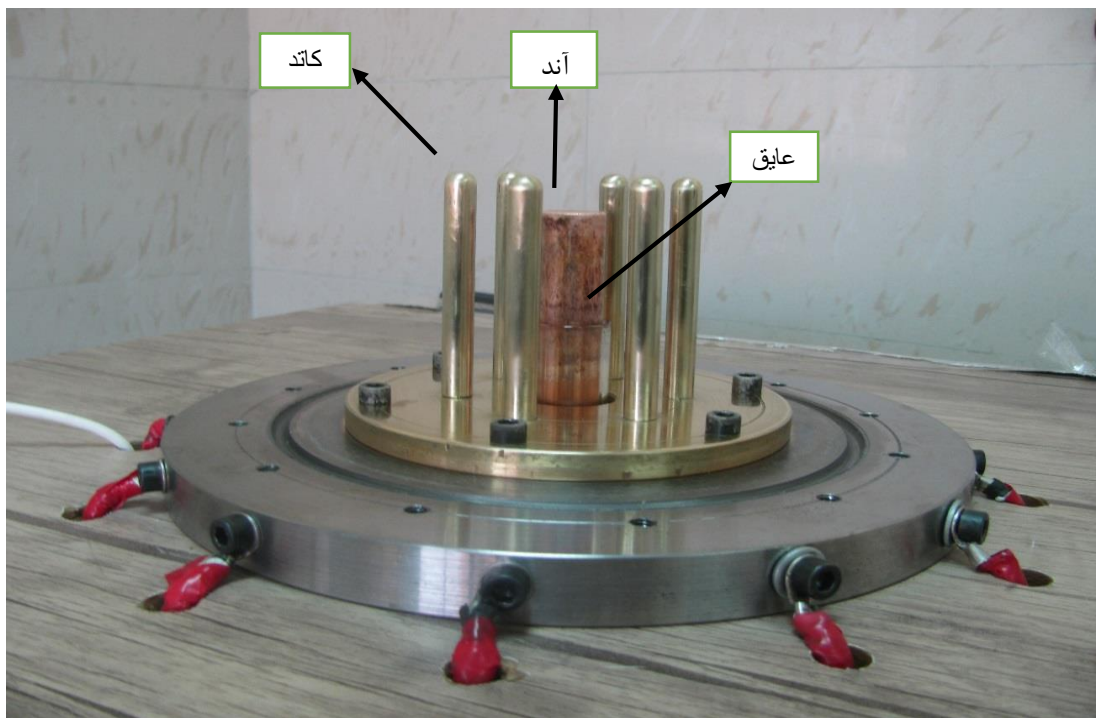


شکل ۴-۲: محفظه‌ی تخلیه‌ی الکتریکی

همانطور که از شکل مشخص است این محفظه دارای یک استوانه مرکزی است که الکترودها را پوشش می‌دهد و همچنین دارای چهار بازو است که بطور متقارن و دو به دو روبروی یکدیگر قرار گرفته‌اند. از این بازوها در سیستم سایه نگاری لیزری و همچنین اندازه‌گیری انرژی اشعه‌ی ایکس و بطور کلی برای آشکارسازی و اندازه‌گیری انواع محصولات این دستگاه می‌توان استفاده نمود. بدنه‌ی اصلی محفظه خلأ استوانه‌ای از جنس "فولاد زنگ نزن"^۱ به ارتفاع ۲۵۰ میلیمتر و شعاع ۸۰ میلیمتر می‌باشد. از آنجاییکه تخلیه الکتریکی در خلأ انجام می‌شود لذا الکترودها در داخل استوانه قرار گرفته‌اند. به علت وجود اختلاف

¹ Stain steel

فشار میان فضای داخل و خارج محفظه خلأ، باید قطر فلز به کار رفته در ساخت این محفظه به گونه‌ای انتخاب شود که بتواند نیروی ناشی از این اختلاف فشار را تحمل نماید. به همین منظور از فولادی با ضخامت ۴ میلیمتر استفاده شده است. در قسمت انتهایی استوانه‌ی مرکزی دو دهانه‌ی استوانه‌ای شکل وجود دارد که از آنها برای ورود و خروج گاز کاری استفاده می‌شود. برای اندازه‌گیری فشار داخل محفظه خلأ از یک فشار سنج پیرانی استفاده می‌شود که هد این فشار سنج از طریق یک سه راهی به محفظه متصل می‌شود. همانطور که در شکل ۴-۲ نیز مشخص است قسمت پایینی محفظه از طریق ۱۲ عدد کابل هم‌محور به قطب منفی خازن (زمین) متصل شده است. بعبارت دیگر بدنه‌ی محفظه‌ی خلأ به زمین وصل می‌باشد. در داخل محفظه خلأ و در قسمت مرکزی آن، آند دستگاه تعبیه شده است. آند دستگاه استوانه‌ای توپر از جنس مس می‌باشد که دارای سطح مقطعی دایره‌ای شکل به شعاع ۹/۵ میلی‌متر و ارتفاع ۶۰ میلی‌متر است. آند دستگاه قابلیت تعویض را دارد. در اطراف آند یک عدد عایق استوانه‌ای شکل از جنس پیرکس که توسط لایه پلاستیکی بطور محکم حول آند نگه داشته می‌شود، قرار می‌گیرد. طول و جنس این عایق قابل تعویض می‌باشد. شش عدد میله برنجی به طول ۶۰ میلیمتر و شعاع ۵ میلیمتر بر روی یک صفحه‌ی دایروی شکل از جنس برنج قرار گرفته و آند و عایق در بر دارنده‌ی آن را محیط می‌کنند. این صفحه به بدنه اصلی متصل می‌شود و از آنجاییکه بدنه به قطب منفی خازن متصل است لذا این صفحه نیز دارای بار منفی می‌باشد و نقش کاتد را ایفا می‌کند. در شکل ۴-۳ نمایی از آند و کاتد و عایق دستگاه به وضوح قابل مشاهده است.



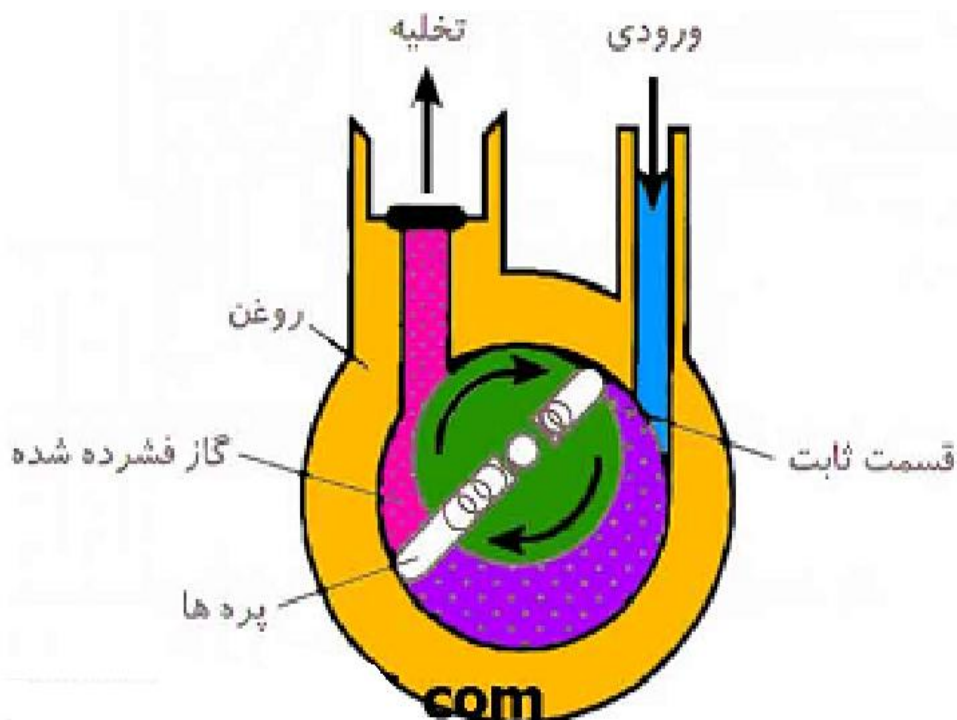
شکل ۴-۳: نمایی از آند، کاتد و عایق دستگاه

قسمت دیگر آند در خارج از محفظه‌ی خلأ قرار دارد که توسط پلاستیک‌هایی عایق بندی شده و از طریق ۱۲ عدد کابل به اسپارک گپ متصل شده است.

۲-۳-۴ سیستم تخلیه و تزریق گاز

دستگاه پلاسمای کانونی در فشار های پایین (حدود چند تور) کار می کند و لذا داشتن سیستم تخلیه گاز و رسیدن به فشار مطلوب بسیار حائز اهمیت می باشد. محفظه خلأ دستگاه توسط یک پمپ روتاری دو مرحله‌ای مدل N280VE تخلیه می شود. پمپ توسط برق شهر تغذیه شده و آهنگ تخلیه‌ی آن حدود $\frac{L}{min} 226$ است. با این نرخ تخلیه می توان به خلأیی در حدود 10^{-2} Torr رسید.

پمپ‌های چرخشی (پمپ‌های روتاری) که به آنها پمپ‌های پره‌ای نیز می گویند با اعمال فشار روغن بر یک پره‌ی خارج از مرکز کار می کند. با چرخش پره‌ی مذکور جابجایی ساده‌ی هوا انجام می گیرد. بدلیل چرخش خارج از مرکز پره، یک مسیر هلالی شکل غیر متقارن برای گاز ایجاد می شود که بخشی از گاز مکش یافته و متراکم می شود و بخشی دیگر به خارج از محفظه هدایت می شود. بنابراین کار تخلیه در سه مرحله‌ی مکش، تراکم و دمش گاز انجام می گیرد. نحوه عملکرد این پمپ در شکل ۴-۴ نشان داده شده است.



شکل ۴-۴: نحوه عملکرد پمپ روتاری

فشار داخل را می توان توسط یک فشار سنج پیرانی اندازه گیری نمود. در شکل ۴-۵ نمایی از این وسایل نشان داده شده است.



شکل ۴-۵: نمایی از پمپ روتاری و فشار سنج پیرانی

در دستگاه پلاسمای کانونی از گازهایی چون آرگون، نئون، دوتریم و ... استفاده می‌شود. در این پژوهش از گاز کاری آرگون با خلوص ۹۹/۹۹٪ استفاده شده است.

سیستم تزریق گاز شامل یک کپسول گاز، یک شیر فشار شکن و یک شیر سوزنی مدل swage lock است. میزان گاز ورودی به محفظه توسط شیر سوزنی کنترل می‌شود.

۳-۳-۴ سیستم منبع تغذیه و کنترل الکترونیکی

با استفاده از این سیستم انرژی الکتریکی دستگاه پلاسمای کانونی تأمین می‌شود. مهمترین بخش این قسمت شارژ کردن بانک خازنی و انتقال این انرژی از طریق اسپارک گپ به محفظه‌ی خلأ می‌باشد. این سیستم شامل قسمت‌هایی است که در زیر به ترتیب معرفی خواهند شد.

۳-۳-۴-۱ سیستم شارژ کردن خازن

سیستم شارژ کردن خازن دستگاه از یک سیم پیچ ولتاژ بالا و یکسو کننده‌هایی تشکیل شده است که برق متناوب ۲۲۰ ولت شهر را به برق مستقیم ۱۲ کیلو ولت تبدیل می‌کنند. این ولتاژ خروجی قابل تغییر می‌باشد. ترانس استفاده شده در این سیستم همواره در داخل روغن مخصوص ولتاژ بالا نگهداری می‌شود.

۳-۳-۴-۲ بانک خازنی

خازن دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود یک خازن ولتاژ بالا با ظرفیت $16 \mu f$ و ماکزیمم ولتاژ اعمالی 12 KV می‌باشد. با توجه به رابطه‌ی $E = \frac{1}{2} CV^2$ ، مقدار انرژی مربوط به این دستگاه $1/15 \text{ kJ}$ بدست می‌آید. این خازن توسط برق شهر شارژ می‌شود. در شکل ۴-۶ نمایی از بانک خازنی بکار رفته در دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود را نشان داده‌ایم.

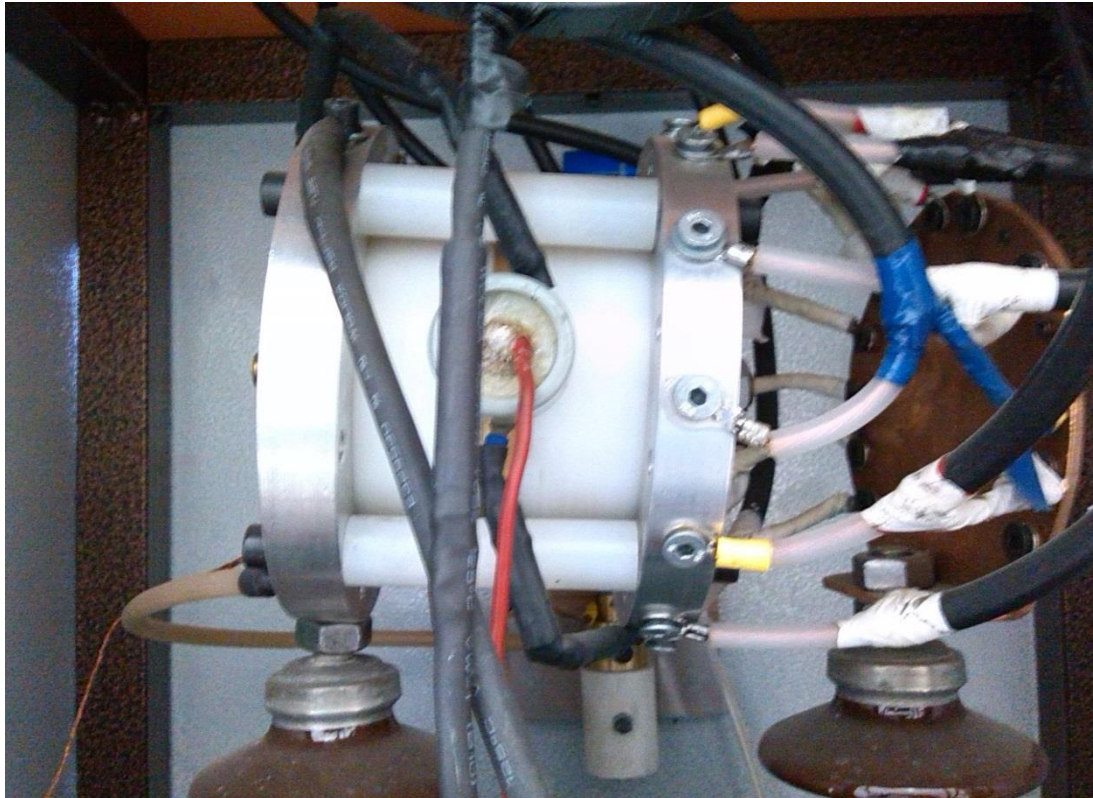


شکل ۴-۶: نمایی از بانک خازنی

۳-۳-۳-۴ اسپارک گپ

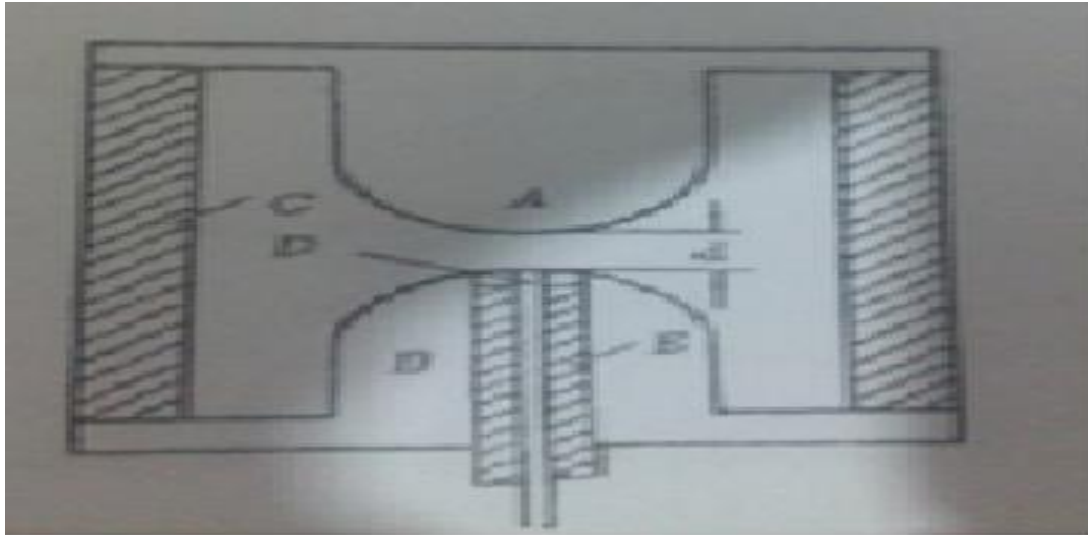
اسپارک گپ (سوئیچ سریع) به منظور انتقال سریع و متقارن انرژی ذخیره شده در بانک خازنی، در یک لحظه به دو سر آند و کاتد، استفاده می‌شود. در واقع سیستم اسپارک گپ از دو صفحه‌ی موازی که برای انتقال جریان بالا با اندوکتانس پایین استفاده می‌شود، تشکیل شده است. در اسپارک گپ جریان اعمالی از طریق یونیزه شدن هوای بین دو صفحه، در داخل آن برقرار می‌شود. نمایی از اسپارک گپ بکار رفته در دستگاه پلاسمای کانونی در شکل ۴-۷ نشان داده شده است. اسپارک گپ بکار رفته شده در دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود از نوع تریگاترون می‌باشد. این نوع اسپارک گپ شامل دو الکتروود A و B است که در فاصله d از یکدیگر قرار گرفته‌اند. این الکتروودها یا بوسیله پوشش C که از یک ماده عایق مانند تفلون ساخته شده است در یک محفظه D بسته نگه داشته می‌شوند و یا بدون محافظ قرار می‌گیرند.

الکتروود سوم D، تریگر است. محل قرار گرفتن آن به طراحی اسپارک گپ بستگی دارد و نقش آن ایجاد شکست در هوای بین الکتروودها و شروع تخلیه است. ولتاژ لازم به وسیله سیستم تریگر به الکتروود D اعمال می‌شود. به این ترتیب فاصله d باید به گونه‌ای انتخاب شود که قبل از رسیدن شارژ خازن به مقدار مورد نظر، شکست رخ ندهد و عمل تخلیه الکتریکی به طور کامل کنترل شده آغاز شود.



شکل ۴-۷: اسپارک گپ

در ساختار اسپارک گپ تریگاترون، الکتروود تریگر در داخل یکی از الکتروودها قرار می‌گیرد و توسط عایق E از آن جدا می‌شود. نمایی شماتیک از ساختار داخلی اسپارک گپ را در شکل ۴-۸ نشان داده شده است.



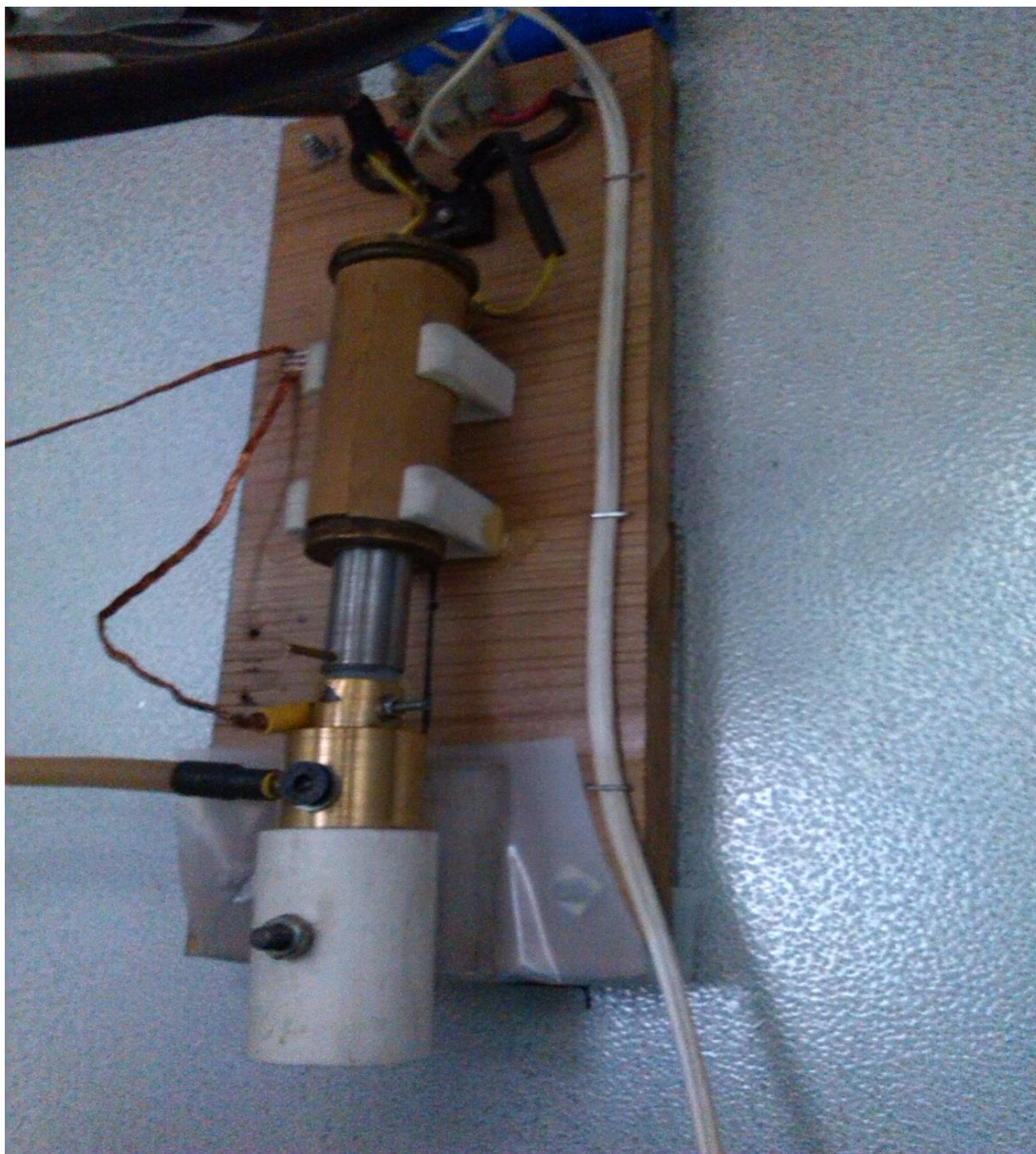
شکل ۴-۸:نمایی شماتیک از ساختار داخلی اسپارک گپ

۴-۳-۳-۴ سیستم تریگر

برای انتقال جریان با ولتاژ بالا در بین دو قطب اسپارک گپ از سیستم تریگر استفاده می‌شود. با استفاده از تریگر یک پالس منفی (در حدود ۴۰ KV) به الکترود میانی (D) اسپارک گپ اعمال می‌شود. تریگر به دو طریق دستی و اتوماتیک کار می‌کند. به این علت که خازن باید بعد از مدتی شارژ و دشارژ شود و از طرفی باید بین هر دو تخلیه الکتریکی زمانی را برای تخلیه‌ی دستگاه در نظر بگیریم، لذا بهتر است که برای تریگ کردن از مد دستی دستگاه استفاده شود.

۴-۳-۳-۵ سیستم اتصال به زمین

این سیستم به واقع بعد از عمل تریگ و تخلیه الکتریکی، دو سر خازن را به هم وصل می‌نماید و باقیمانده انرژی ذخیره شده در خازن را تخلیه می‌کند و بعد از آن خازن به طور کامل تخلیه می‌شود. نمایی از این سیستم را در شکل ۴-۹ نشان داده‌ایم. این سیستم از یک آهنربا تشکیل شده است که با اعمال ولتاژ، دو سر خازن را از هم جدا می‌کند. در هنگام شارژ کردن خازن باید این سیستم روشن باشد تا خازن با اعمال ولتاژ شارژ شود. پس از عمل تریگ و دشارژ خازن باید بلافاصله این سیستم را خاموش نمود تا باقیمانده انرژی ذخیره شده در آن تخلیه شود. در غیر این صورت خازن دچار آسیب می‌شود.



شکل ۴-۹: سیستم اتصال به زمین

۴-۴ سیستم دیاگنوستیک‌ها

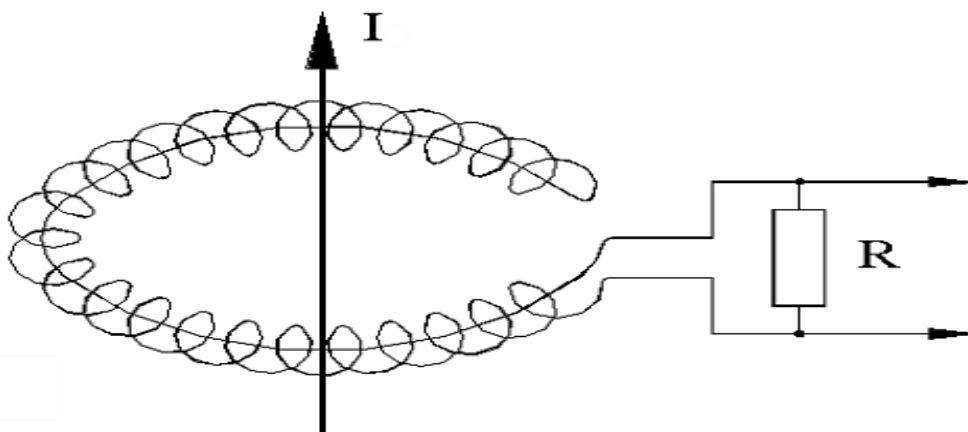
با استفاده از این سیستم می‌توان پارامترهای تخلیه‌ی الکتریکی و تابش‌های حاصله از ذرات و امواج الکترومغناطیسی را آشکارسازی نمود. این سیستم شامل قسمت‌هایی است که نسبت به میدان‌های الکترومغناطیسی حساس می‌باشند و همچنین سیستم‌هایی که این پارامترها را به سیگنال‌های الکتریکی تبدیل می‌کنند. دیاگنوستیک‌های بکار رفته در دستگاه پلاسما کانونی شاهرود عبارتند از: ۱. پیچ‌های رگوفسکی ۲. پروب ولتاژ ۳. آشکار ساز نیمه رسانا ۴. سیستم داده پردازی.

۴-۴-۱ سیستم داده پردازی^۱

با استفاده از این سیستم می توان سیگنال های آنالوگ خارج شده از دستگاه را به سیگنال های دیجیتال تبدیل و سپس بصورت گراف و داده در کامپیوتر ذخیره نمود. این قسمت شامل یک سیستم تبدیل آنالوگ به دیجیتال و یک اسیلوسکوپ دیجیتال است که به طور مستقیم به کامپیوتر متصل شده است.

۴-۴-۲ پیچهی رگوفسکی^۲

پیچهی رگوفسکی به صورت یک سیم پیچ چمبره ای می باشد که دارای یک سطح مقطع دایروی شکل است. پیچهی رگوفسکی برای اندازه گیری جریان انتقال یافته به ستون پلاسما و همچنین مشتق جریان الکتریکی به کار می رود. شکل ۴-۱۰ نمایی از پیچهی رگوفسکی را نشان می دهد. همانطور که در شکل مشخص است پیچه یک سیم پیچ چمبره ای است که به شکل یک حلقه در می آید و سیم برگشتی از مرکز آن عبور می کند. جریان گذرا از سیم برگشتی که در مرکز سیم پیچ است باعث از بین رفتن نویز ایجاد شده می شود و تغییرات جریان را نیز اندازه گیری می کند. پیچه رگوفسکی استفاده شده در دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود دارای قطر اصلی ۱۶ cm و قطر فرعی ۱ cm می باشد. قطر سیم به کار رفته شده در این پیچه ۱/۵ mm و تعداد دورهای آن ۲۸۰ می باشد. در این حالت ضریب کالیبراسیون ولتاژ نشان داده شده در اسیلوسکوپ $U = 1/4 \frac{V}{kA}$ است. به بیان دیگر ماکزیمم دامنه در خروجی اسیلوسکوپ را باید در عدد ۰/۲۵ ضرب نمود تا جریان عبوری از پلاسما بر حسب کیلو آمپر به دست آید. پیچهی رگوفسکی به دور یکی از سیم های متصل به آند قرار گرفته است.



شکل ۴-۱۰: پیچه رگوفسکی [۱۹]

¹ Data acquisition system

² Rogowski coil

در شکل ۱۱-۴ نمایی از مدار پیچ‌های رگوفسکی نشان داده شده است. در این شکل R_c و L به ترتیب مقاومت و اندوکتانس سیم پیچ می‌باشند. I و i نیز به ترتیب جریان تخلیه و جریانی که از سیم پیچ می‌گذرند، هستند. بنابراین معادله‌ی مدار به صورت زیر است:

$$L \frac{di}{dt} + (R_{sh} + R_c)i = k \frac{dI}{dt} \quad (۱-۴)$$

الف) حال اگر $L \frac{di}{dt} \gg (R_{sh} + R_c)i$ در این صورت از معادله‌ی ۱-۴ مشخص است که:

$$i = \left(\frac{k}{L_c}\right) \times I \quad (۲-۴)$$

در اینجا k ضریب کالیبراسیون می‌باشد. بنابراین ولتاژ خروجی با I متناسب است. پس خواهیم داشت:

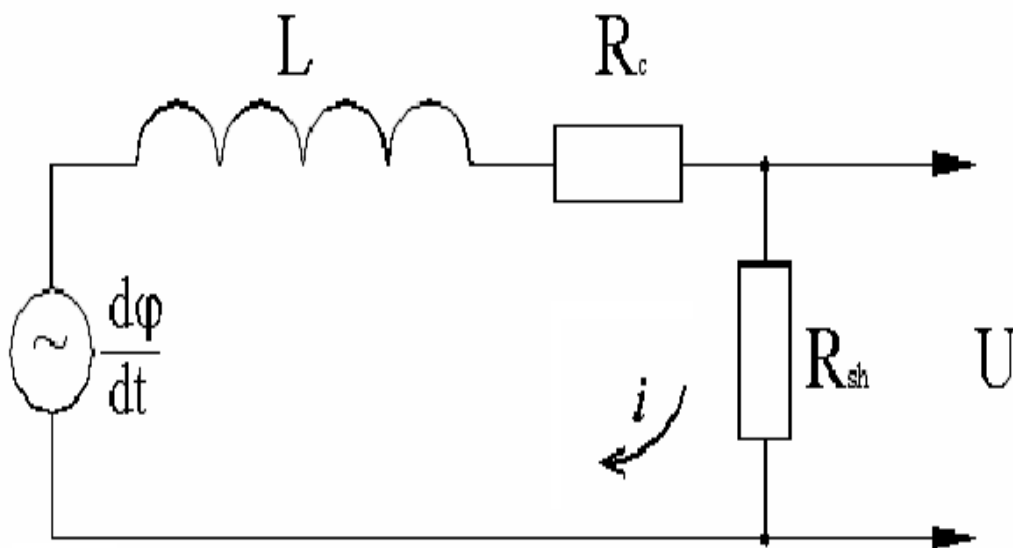
$$V_0 = R_{sh}i = \frac{R_{sh}k}{L_c} I \quad (۳-۴)$$

در این حالت پیچ‌های رگوفسکی به عنوان پروب اندازه‌گیری جریان کاربرد دارد.

ب) حال اگر $(R_{sh} + R_c)i \gg L \frac{di}{dt}$ در این صورت با استفاده از معادله ۱-۴ خروجی پیچ‌ها به صورت زیر خواهد بود:

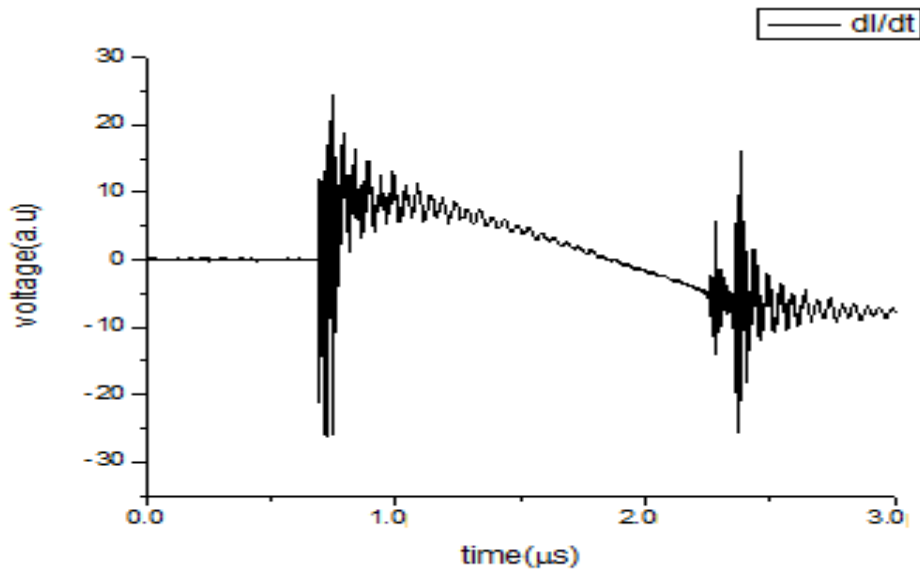
$$V_0 = R_{sh}i = \left(\frac{R_{sh}k}{R_{sh}+R_c}\right) \frac{dI}{dt} \quad (۴-۴)$$

در این شرایط پیچ‌های رگوفسکی به عنوان پروب اندازه‌گیری مشتق جریان $\left(\frac{dI}{dt}\right)$ بکار می‌رود.



شکل ۱۱-۴: مدار معادل پیچ‌های رگوفسکی [۱۹]

یکی از منحنی‌هایی که در تحلیل داده‌ها خیلی مهم می‌باشد، منحنی مربوط به مشتق جریان است که از آن برای تعیین زمان و تأیید پینچ شدگی استفاده می‌شود. نمونه‌ای از سیگنال مشتق جریان که پینچ شدگی را نیز نشان می‌دهد را در شکل ۴-۱۲ نشان داده‌ایم.



شکل ۴-۱۲: سیگنال مشتق جریان

۴-۲-۱-۱ کالیبراسیون پیچ‌های رگوفسکی

برای یک پیچ‌های رگوفسکی تعیین ضریب کالیبراسیون پارامتری مهم محسوب می‌شود. برای محاسبه‌ی این ضریب از رابطه‌ی زیر استفاده می‌شود:

$$I_1 = \frac{\pi C_0 V_0 (1+f)}{T} \quad (۵-۴)$$

در رابطه‌ی فوق C_0 ظرفیت بانک خازنی، T دوره‌ی تناوب سیگنال جریان، V_0 ولتاژ شارژ و f نیز نسبت عکس^۱ می‌باشد که مقدار آن از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$f = \frac{1}{4} \left(\frac{V_5}{V_4} + \frac{V_4}{V_3} + \frac{V_3}{V_2} + \frac{V_2}{V_1} \right) \quad (۶-۴)$$

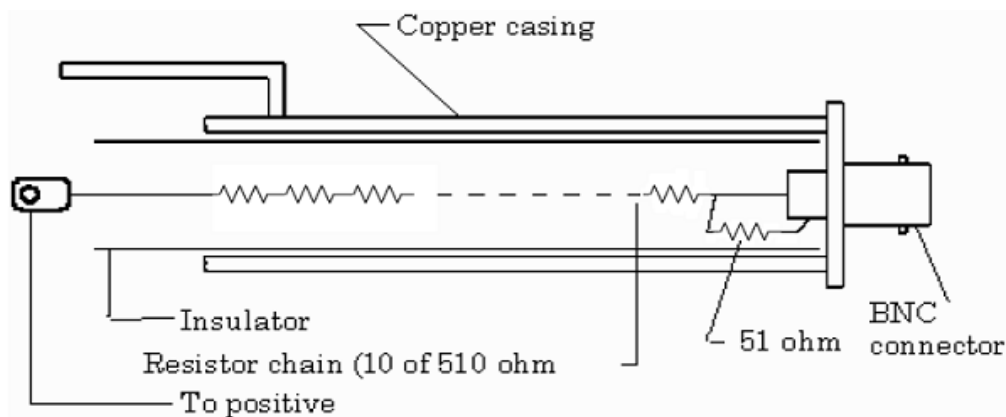
¹ Reversal ratio

در این رابطه V_i مقادیر واقعی دامنه‌های متوالی نصف سیگنال پروب پیچ‌های رگوفسکی می‌باشند. I_1 مقدار اولین پیک جریان تخلیه می‌باشد. با استفاده از مقادیر موجود اسیلوسکوپ برای f و T می‌توان مقدار I_1 را محاسبه نمود. بنابراین فاکتور مربوط به کالیبراسیون سیم پیچ از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$k_1 = \frac{I_1}{V_1} (A/volt) \quad (7-4)$$

۳-۴-۴ پروب ولتاژ^۱

با استفاده از پروب ولتاژ می‌توان مقدار اختلاف پتانسیل بین دو قسمت ولتاژ بالای دستگاهی پلاسمای کانونی (آند) و زمین (کاتد) را اندازه‌گیری نمود. پروب ولتاژ به صورت تقسیم‌کننده ولتاژ از نوع مقاومتی^۲ می‌باشد. در شکل ۴-۱۳ نمایی شماتیک از آن نشان داده شده است. در این شکل اجزای تشکیل‌دهنده پروب، یعنی ۱۰ عدد مقاومت ۵۱۰ اهمی که به صورت سری به هم بسته شده‌اند با یک مقاومت شنت^۳ ۵۱ اهمی نشان داده شده است. با استفاده از این پروب مقدار ولتاژ را تا ۱۰۰ برابر می‌توان کاهش داد. این تقسیم‌کننده با یک لوله‌ی مسی پوشش داده شده است. البته این لوله به عنوان کاهنده‌ی نویز نیز کاربرد دارد.



شکل ۴-۱۳: پروب ولتاژ [۱۹]

سیگنال‌های به دست آمده از پروب ولتاژ در بررسی و تحلیل داده‌ها بسیار مهم و مفید می‌باشند. نمونه‌ای از این سیگنال‌ها را در شکل ۲-۲ نشان داده‌ایم. پروب ولتاژ مستقیماً به آند دستگاه متصل می‌شود.

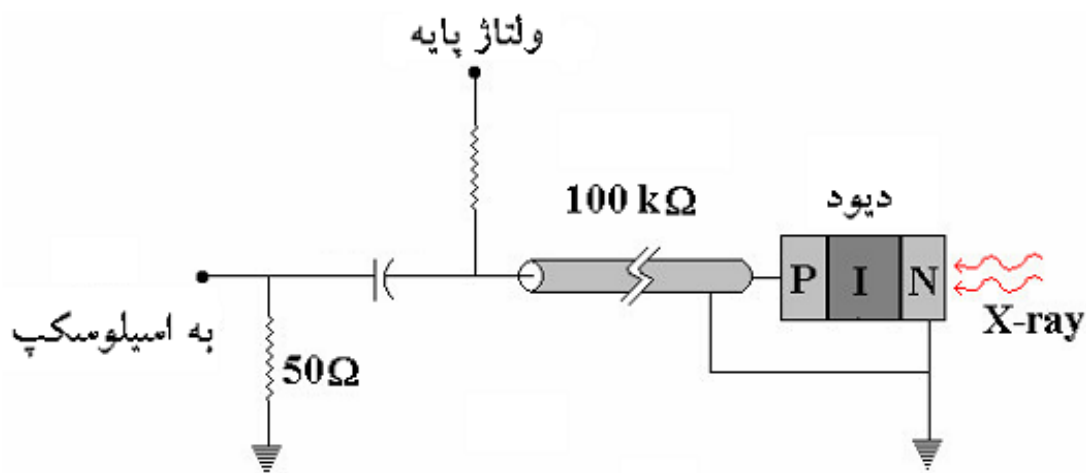
¹ Voltage probe

² Resistive voltage divider

³ Shunt

۴-۴-۴ فوتو دیود BPX-65 بعنوان آشکارساز نیمه رسانای اشعه ایکس

PIN دیودهای سیلیکونی کاربردهای مختلفی برای آشکارسازی اشعه‌ی ایکس در زمینه‌های مختلفی چون پلاسما دارند. این دیودها دارای ساختاری ساده و پاسخ دهی سریع و حساسیت بالایی هستند که این خواص باعث می‌شوند که از آنها برای اندازه‌گیری تابش‌های پالسی بین ۱ تا ۲۰ KeV استفاده شود. دیود PIN اساساً از یک سیلیکون (نوع I) تشکیل شده است که بین لایه‌ای از نوع P و N قرار گرفته است. از لایه N اغلب بعنوان لایه‌ی مرده^۱ یاد می‌شود. این لایه که به پتانسیل زمین وصل است، بعنوان پنجره ورودی دیود تلقی می‌شود. لایه‌ی P به یک پتانسیل منفی بایاس می‌شود. شکل ۴-۱۴ نمایشی شماتیک از PIN دیود و مدار بایاس متصل به آن را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۴: دیود PIN و مدار بایاس آن [۱۹]

همان طور که در شکل بالا مشخص است دیود به یک ولتاژ بایاس ۴۵- متصل می‌باشد که این ولتاژ را می‌توان از دو عدد باطری که به صورت سری به هم متصل شده‌اند ایجاد کرد. حساسیت دیود به جذب فوتون‌های اشعه ایکس وابسته است که پس از عبور از لایه‌ی مرده کاهش می‌یابند. پس از جذب فوتون‌های با انرژی برابر یا بزرگتر از انرژی لازم برای تولید جفت الکترون-حفره در سیلیکون، جریان باری به صورت پالسی در خروجی دیود ظاهر می‌شود. این جریان را با استفاده از مقاومت 50Ω می‌توان اندازه گرفت. وقتی نیمه رسانا فوتون مربوط به اشعه‌ی ایکس با انرژی $h\nu$ را جذب می‌کند، به اندازه‌ی $\frac{h\nu}{\omega}$ تا جفت الکترون-حفره تولید می‌شود. در رابطه‌ی فوق ω انرژی لازم برای تولید یک جفت الکترون-حفره

¹ Dead layer

است. بار جمع شده با انرژی فوتون متناسب می‌باشد. برای سیلیکون در دمای اتاق $\omega = 3/62 \text{ eV}$ است. بازدهی کوانتومی آشکارساز را می‌توان از رابطه‌ی ۴-۸ بدست آورد:

$$Q = \frac{h\nu}{\omega} \exp(-\mu_d t_d) [1 - \exp(-\mu_s t_s)] \quad (۸-۴)$$

در این رابطه جمله‌ی اول مربوط به لایه‌ی مرده با ضخامت t_d می‌باشد که در سطح فوقانی دیود قرار گرفته است. جمله‌ی دوم مربوط به بازدهی ناحیه‌ی حساس به اشعه‌ی ایکس می‌باشد که ضخامت آن t_s است. در اینجا μ_d و μ_s به ترتیب ضریب جذب جرمی اشعه‌ی ایکس ناحیه‌های حساس و مرده هستند. محدوده‌ی انرژی به نوع نیمه رسانایی که از آن استفاده می‌شود، بستگی دارد. حد پایین انرژی با جذب در ناحیه مرده و حد بالا توسط جذب ناکامل تعیین می‌شود. برای آشکارسازی انرژی‌های پایین تر اشعه‌ی ایکس می‌توان لایه‌ی مرده را نازک تر نمود. از آنجاییکه زوج الکترون-حفره دارای قابلیت تحرک بالایی هستند و فاصله‌ی آنها از یکدیگر کم است، در این صورت زمان پاسخ دهی دیود نیز کم می‌باشد. این مشخصه به عنوان مهمترین خصوصیت دیودهای PIN می‌باشد که آنها را برای آشکارسازی اشعه‌ی ایکس چشمه‌های پالسی مناسب ساخته است.

فوتون‌های گسیل شده از ستون پلاسما دارای انرژی E_0 می‌باشند که از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$E_0 = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad (۹-۴)$$

انرژی این فوتون پس از عبور از فیلتر دیود با ضخامت t_f و ضریب جذب جرمی $\mu \equiv \frac{1}{a_f(\lambda)}$ به مقدار E_1 کاهش می‌یابد که می‌توان آن را از رابطه‌ی زیر بدست آورد:

$$E_1 = E_0 \exp\left(-\frac{t_f}{a_f(\lambda)}\right) \quad (۱۰-۴)$$

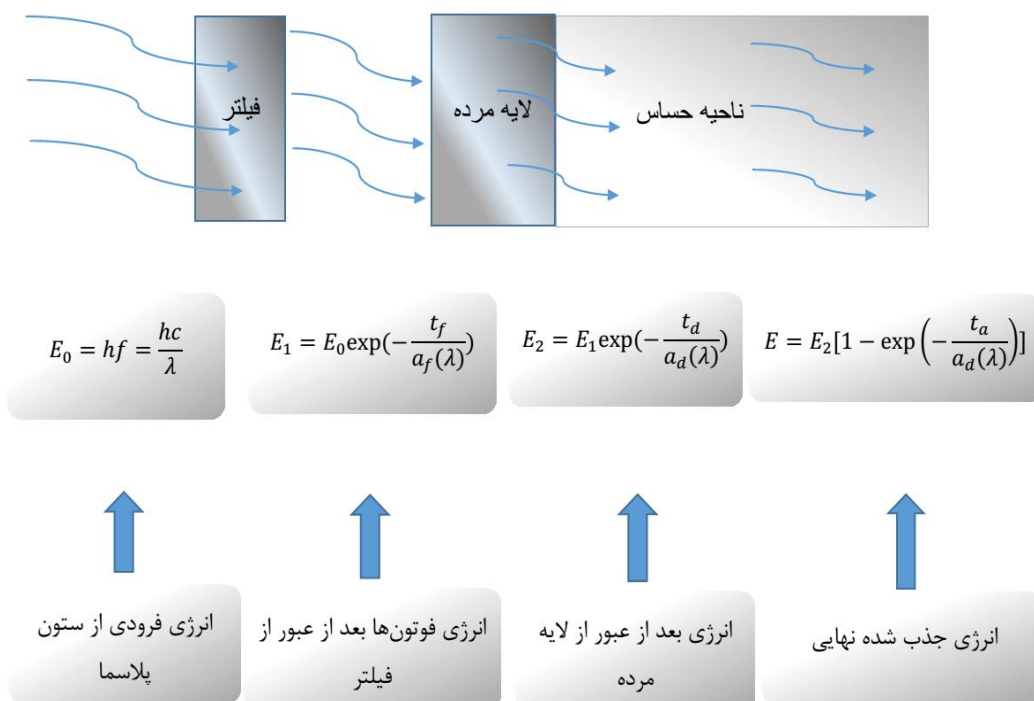
این فوتون سپس به ناحیه‌ی مرده برخورد می‌کند که ضخامت آن t_d و ضریب جذب جرمی آن $\frac{1}{a_d(\lambda)}$ می‌باشد. در اینجا انرژی به مقدار E_2 کاهش می‌یابد. این مقدار را می‌توان از رابطه‌ی زیر بدست آورد:

$$E_2 = E_1 \exp\left(-\frac{t_d}{a_d(\lambda)}\right) \quad (۱۱-۴)$$

و در نهایت فوتون پس از عبور از ناحیه‌ی مرده به ناحیه‌ی حساس می‌رسد که ضخامت آن t_a و ضریب جرمی آن با ضریب جرمی لایه مرده یکی است. در اینجا مقدار نهایی انرژی E است. این مقدار از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$E = E_2[1 - \exp(-\frac{t_a}{a_d(\lambda)})] \quad (۱۲-۴)$$

جذب انرژی فوتون‌های ساطع شده از ستون پلاسمایی در گذار از لایه‌های متفاوت فوتودیود و کاهش انرژی آنها، تا اینکه به ناحیه‌ی جذب نهایی برسند را در شکل ۴-۱۵ نشان داده‌ایم.



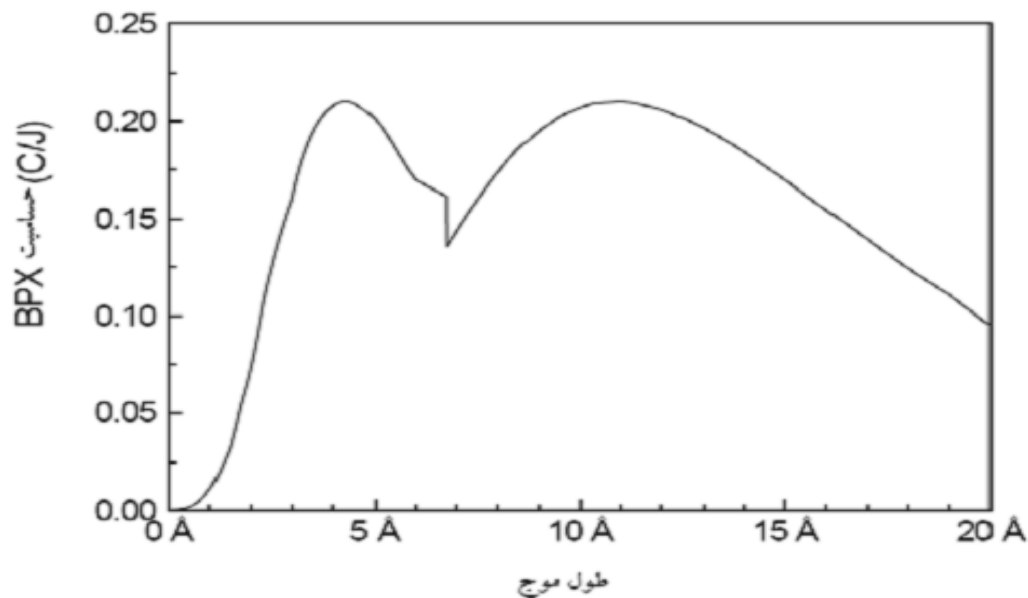
شکل ۴-۱۵: مراحل جذب انرژی در لایه‌ها

دیود BPX-65 به علت زمان پاسخ دهی کوتاه و جریان تاریک پایین و ابعاد مناسب برای آزمایشات ما با دستگاه پلاسما کانونی انتخاب شده است. برخی از پارامترهای این دیود در جدول ۴-۲ نشان داده شده است.

جدول ۴-۲: مشخصه‌های BPX-65 [۱۹]

ناحیه‌ی حساس به تابش ^۱	1mm^2
ضخامت ویفر سیلیکونی ذاتی ^۲	$10\mu\text{m}$
ضخامت لایه‌ی مرده ^۳	$0.5\mu\text{m}$
زمان خیزش ^۴	0.5ns
جریان تاریک ^۵	$<5\text{nA}$

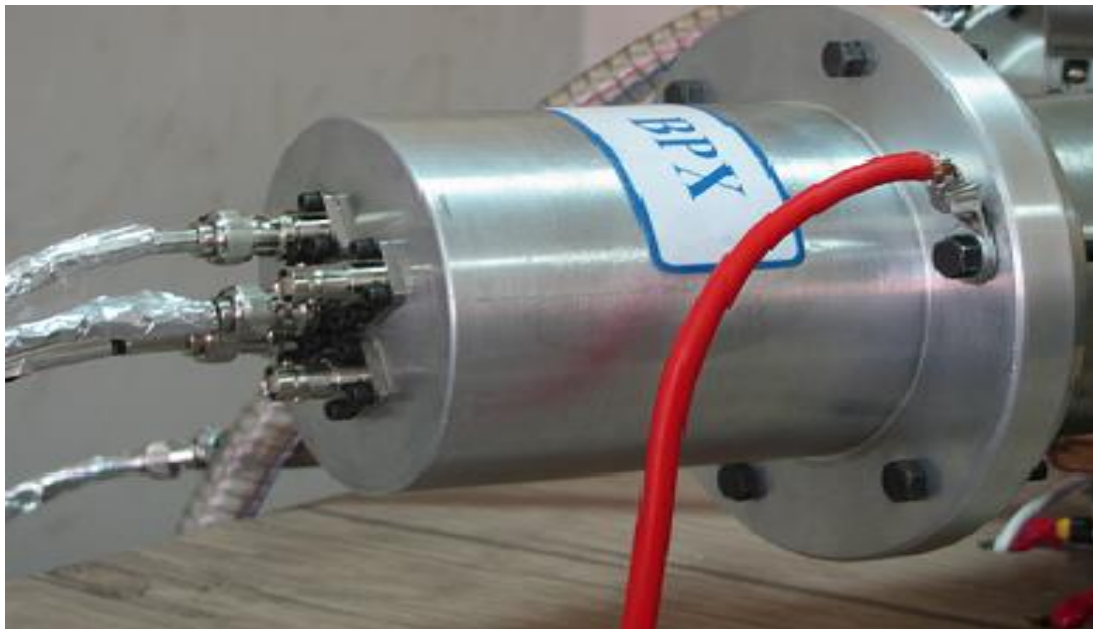
از آنجاییکه ضخامت لایه‌ی مرده $0.5\mu\text{m}$ است، لذا با کوچکترین کاهش در انرژی می‌توان اشعه ایکس نرم را آشکارسازی نمود. در شکل ۴-۱۶ با استفاده از رابطه‌ی ۴-۵ منحنی حساسیت دیود BPX-65 را رسم نموده‌ایم. تکنیکی ایجاد شده در طول موج $6/8 \text{ \AA}$ مربوط به لبه جذب K سیلیکون است که در آن مقداری از انرژی جذب شده است.



شکل ۴-۱۵: منحنی حساسیت دیود BPX-65

-
- ¹ Radiant sensitive area
 - ² Intrinsic silicon wafer thickness
 - ³ Dead layer thickness
 - ⁴ Rise time
 - ⁵ Dark current

همانطور که در بالا اشاره شد یکی از روش‌هایی که با استفاده از آن می‌توان انرژی اشعه‌ی ایکس را اندازه‌گیری نمود، استفاده از روش اسپکتروسکوپی دیودی ۵ کاناله^۱ است. در روند این آزمایش‌ها از آشکارساز *BPX-65* با نمای زیر که در شکل ۴-۱۷ نشان داده شده است استفاده نموده‌ایم.



شکل ۴-۱۷: آشکارساز *BPX-65*

در شکل ۴-۱۸ نمایی از باطری موجود در مدار که ولتاژ معکوس $V -45$ را برای ما فراهم می‌کند و قطعه‌ای دیگر در کنار باطری که سیگنال‌های ورودی از آشکارساز در ابتدا وارد آن شده و نیز مقاومت 50Ω که به زمین متصل است، در آن حضور دارد، نشان داده شده است. سیگنال‌های خروجی از هر کدام از کانال‌های آشکارساز، به یک کانال از این قطعه متصل می‌شوند که در هر کدام از کانال‌های این قطعه یک ولتاژ معکوس $V -45$ و مقاومت 50Ω وجود دارد. سیگنال‌ها پس از عبور از این مدار وارد اسیلوسکپ نشان داده شده در شکل می‌شوند و به صورت دیجیتال نمایش داده خواهند شد. همچنین از این اسیلوسکپ که به طور مستقیم به یک کامپیوتر متصل است برای ثبت و ذخیره سازی این سیگنال‌ها استفاده شده است.

¹ Five channel diode X-ray spectrometer



شکل ۴-۱۸: نمایشی از باتری ولتاژ معکوس و جایگاه مدار BPX-65 و اسیلوسکوپ

۴-۴-۱-۴ چیدمان آشکارساز ۵ کاناله‌ی BPX-65

دیود BPX-65 مورد استفاده در این آزمایش دارای ۵ کانال می‌باشد که به صورت ضربدری کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. بنا به ضرورت برای اندازه‌گیری و آشکارسازی اشعه‌ی ایکس نرم دستگاه فقط از دو کانال آن استفاده می‌نماییم. این دو کانال را با در نظر گرفتن محدوده‌ی انرژی، با فیلترهای متفاوت به منظور تفکیک اشعه‌ی ایکس نرم از اشعه‌ی ایکس سخت، که در زیر بیان شده است، پوشانده‌ایم.

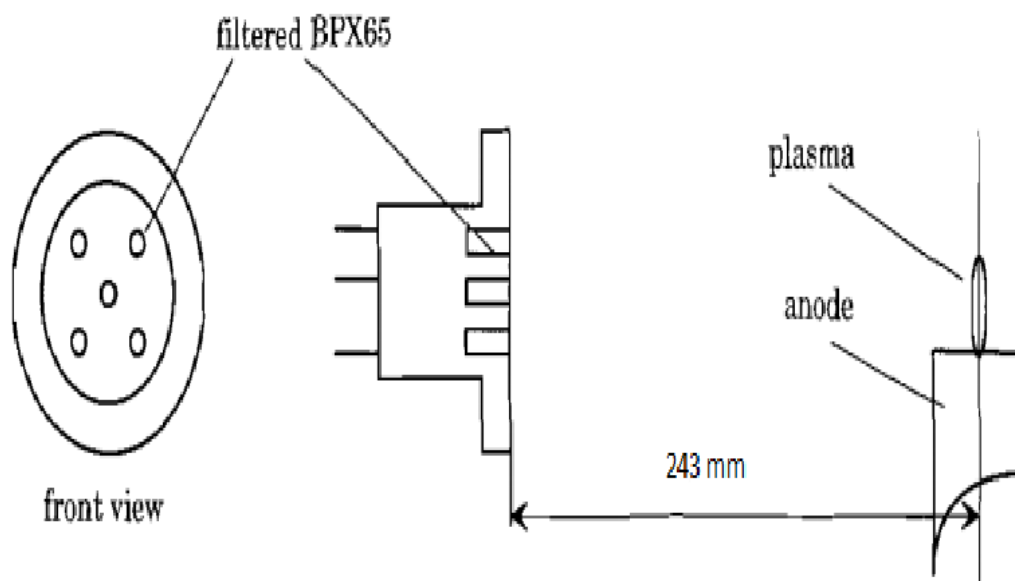
X₁ (کانال ۱): ۲۰ μm Al.....

X₂ (کانال ۲): ۱۰ μm Al + ۱۲۵ μm Mylar

همانطور که در قسمت بعد توضیح داده خواهد شد کانال ۲ بنا به منحنی حساسیتش قادر به آشکارسازی اشعه ایکس نرم نمی‌باشد و در این ناحیه هیچگونه پیکی را نشان نمی‌دهد و فقط اشعه‌ی ایکس سخت را آشکارسازی می‌نماید. ولی کانال ۱ به خاطر منحنی حساسیتش می‌تواند اشعه‌ی ایکس نرم را نیز آشکار کرده و در ناحیه‌ی اشعه‌ی ایکس سخت عینا مانند کانال ۲ عمل می‌نماید. لذا از این دو کانال می‌توان برای تفکیک اشعه‌ی ایکس نرم و سخت استفاده نمود. دیود را به منظور آشکارسازی اشعه ایکس

روی یکی از بازوهای دستگاه در فاصله ۲۴۳ میلیمتری آند (محل تشکیل ستون پلاسمایی) قرار داده ایم. نمایی شماتیکی از محل قرارگیری دیود در دستگاه در شکل ۴-۱۹ نمایان است.

برای کاهش نویزهای ایجاد شده در سیگنال‌های حاصله از دستگاه پلاسمای کانونی، آن را مستقیماً به زمین وصل نموده‌ایم. برای آشکارسازی اشعه‌ی ایکس از دو کانالی استفاده نموده‌ایم که در یک راستای قطری نباشند. دلیل عمده‌ی این کار جذب گسترده‌تری از طیف گسیلی اشعه‌ی ایکس می‌باشد که در تمامی جهات گسیل می‌شود.



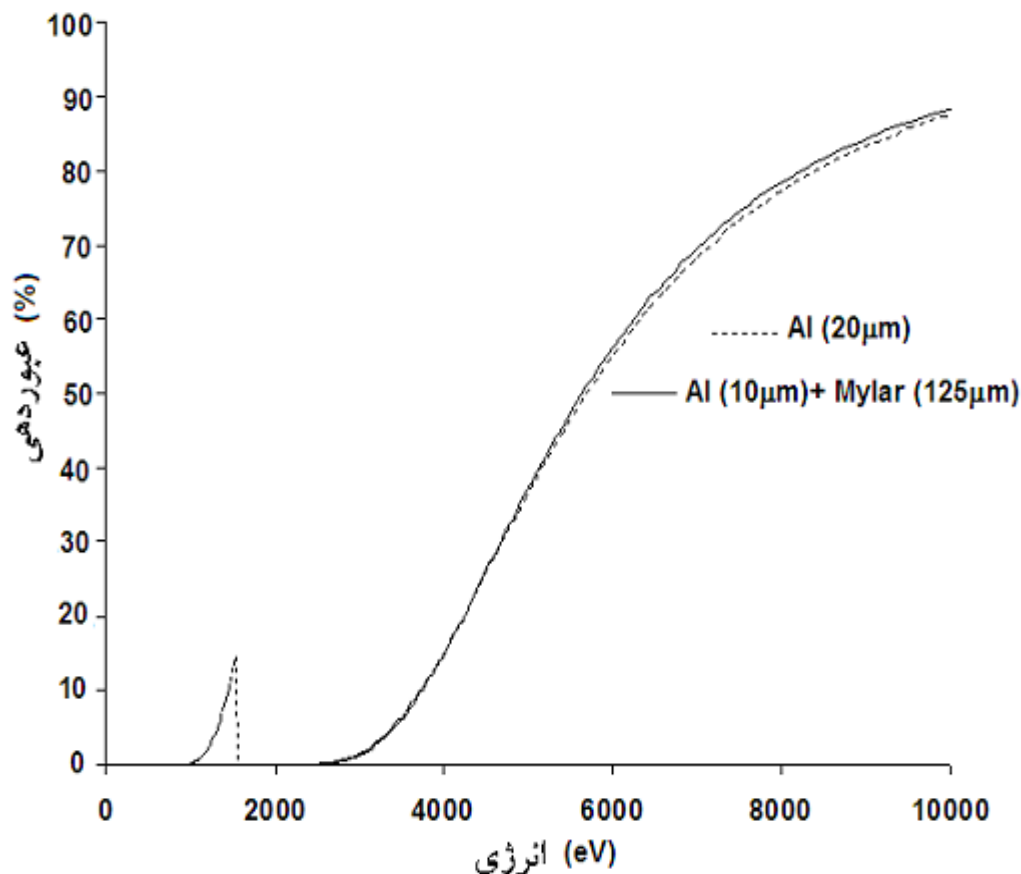
شکل ۴-۱۹: آشکارساز ۵ کاناله BPX-65

۴-۵ نحوه‌ی اندازه‌گیری انرژی اشعه‌ی ایکس نرم با استفاده از آشکارساز BPX-65

۴-۵-۱ آشکارسازی اشعه‌ی ایکس با استفاده از فوتودیود

همانطور که در بخش‌های پیشین توضیح داده شد برای آشکارسازی اشعه‌ی ایکس از آرایه‌ی فوتودیود های BPX-65 استفاده شده است. این دیودها دارای زمان پاسخ دهی بسیار کوتاه و جریان تاریک پایین هستند. جزییات مربوط به این فوتودیودها در بخش‌های پیشین توضیح داده شده است.

برای پیدا کردن انرژی اشعه ایکس و همچنین توزیع زمانی آن‌ها از این فوتودیودها با ترکیب فیلترهای مختلف استفاده می‌کنند. در انتخاب این فیلترها باید محدوده‌ی انرژی مورد نظر را مشخص نماییم. برای این منظور از فیلترهای آلومینیوم ۲۰ میکرومتر و آلومینیوم ۱۰ میکرومتر به همراه مایلار ۱۲۵ میکرومتر استفاده نموده‌ایم. ضریب عبور این فیلترها همراه با حساسیت دیودها در شکل ۴-۲۰ نشان داده شده است.



شکل ۴-۲۰: منحنی حساسیت فوتودیودها با در نظر گرفتن فیلترها

برای محاسبه انرژی اشعه‌ی ایکس از این دو کانال با فیلترهای بیان شده استفاده کردیم. با توجه کردن به این منحنی مشخص می‌شود که در فیلتر پوشیده شده با آلومینیم ۱۰ میکرومتری به همراه مایلار ۱۲۵ میکرومتری، در محدوده‌ی اشعه‌ی ایکس نرم (۹۰۰-۱۵۵۰ eV) هیچ گونه عبوردهی دیده نمی‌شود. پیک‌هایی که این کانال نشان می‌دهند فقط محدوده‌ی اشعه‌ی ایکس سخت را شامل می‌شود. فیلتر پوشیده شده توسط آلومینوم ۲۰ میکرومتری محدوده‌ی اشعه ایکس نرم را نیز شامل می‌شود، لذا در این ناحیه نیز پیک نشان می‌دهد. همانطور که از شکل ۴-۲۰ مشاهده می‌کنیم دو منحنی به غیر از ناحیه اشعه‌ی ایکس نرم در بقیه‌ی جاها عینا روی هم افتاده‌اند. به عبارت دیگر با این فیلترها می‌توان انرژی اشعه‌ی ایکس نرم را مشخص نمود.

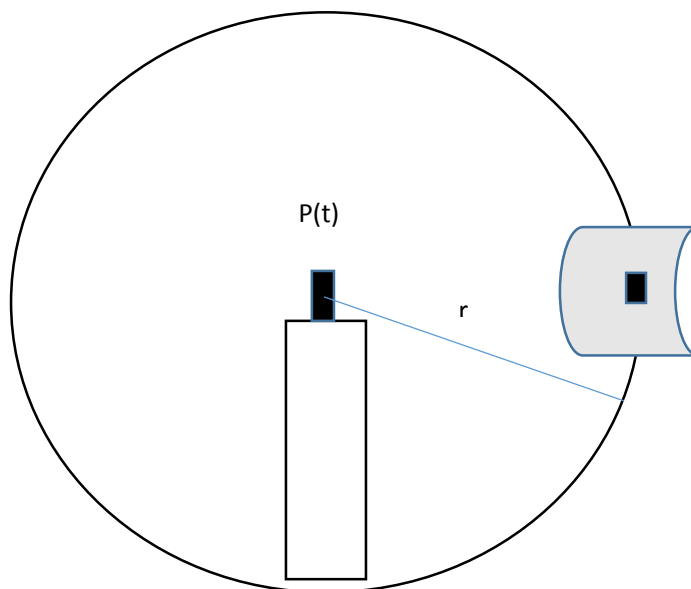
۴-۵-۲ روابط محاسبه‌ی انرژی اشعه‌ی ایکس

برای محاسبه‌ی انرژی اشعه ایکس توسط آشکارساز BPX-65 ابتدا توسط توان اشعه‌ی ایکس در محل آشکارساز، ولتاژ خروجی از آشکارساز را محاسبه می‌نماییم. با استفاده از این ولتاژ می‌توان انرژی اشعه‌ی ایکس آشکارسازی شده توسط آن کانال را محاسبه نمود.

ابتدا توان اشعه ایکس را در محل آشکارساز توسط رابطه‌ی زیر به دست می‌آوریم:

$$(P_{ab}) = P(t) \times \frac{A}{4\pi r^2} \quad (۴-۱۳)$$

در شکل ۴-۲۱ نمایی شماتیک از محل قرار گرفتن آشکارساز روی بدنه‌ی دستگاه پلاسمای کانونی و مکان آند در آن نشان داده شده است.



شکل ۴-۲۱: نمایی شماتیک از محل قرار گرفتن آشکارساز و آند روی دستگاه پلاسمای کانونی

در رابطه‌ی بالا $P(t)$ توان اشعه‌ی ایکس در محل ستون پلاسما و A مساحت ناحیه‌ی حساس به تابش در آشکارساز و r نیز فاصله‌ی مرکز آند تا مرکز آشکارساز می‌باشد. با استفاده از رابطه زیر می‌توان ولتاژ سیگنال خروجی توسط آشکارساز را اندازه‌گیری نمود:

$$V(t) = P_{ab} \times F_{psw} \times R \quad (14-4)$$

که در این رابطه R مقاومت آشکارساز و F_{psw} ضریب "عبور طیف جرمی نسبی"^۱ می‌باشد که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$F_{psw} = \frac{\sum F(\epsilon_i) \times S(\epsilon_i)}{\sum S(\epsilon_i)} \quad (15-4)$$

در این رابطه $F(\epsilon_i)$ ضریب عبور فیلتر بر حسب انرژی می‌باشد و $S(\epsilon_i)$ طیف جرمی پیک‌ها می‌باشد. حال با استفاده از رابطه ۱۳-۴ و ۱۴-۴ می‌توان رابطه‌ی زیر را بدست آورد:

$$V(t) = P(t) \times \frac{A}{4\pi r^2} \times F_{psw} \times R \quad (16-4)$$

اکنون می‌توان توان ستون پلاسما را در محل آند برای تولید اشعه ایکس بر حسب ولتاژ سیگنال خروجی از آشکارساز بدست آورد. لذا داریم:

$$P(t) = \left(\frac{4\pi r^2}{A \times F_{psw} \times R} \right) \times V(t) \quad (17-4)$$

و اکنون با استفاده از رابطه‌ی انرژی که در زیر بیان شده است می‌توان رابطه‌ی نهایی محاسبه‌ی انرژی اشعه‌ی ایکس را به دست آورد:

$$E = \int P(t) dt = \left(\frac{4\pi r^2}{A \times F_{psw} \times R} \right) \int V(t) dt \quad (18-4)$$

۴-۶ طریقه‌ی انجام آزمایش

بعد از جایگذاری صحیح عایق مورد نظر در دستگاه، پمپ تخلیه را روشن و دستگاه را تخلیه می‌کنیم. در شرایط صحیح آزمایش محفظه‌ی خلأ تا مرتبه‌ی ۰/۰۰۱ تور تخلیه می‌شود. سپس با تزریق گاز در محفظه و باز بودن شیر پمپ به میزان اندک، یک جریان منظمی از گاز را داخل محفظه‌ی خلأ در حال شارش خواهیم داشت. حال با تغییر ولتاژ اعمالی به دو سر آند-کاتد و نیز تغییر فشار گاز داخل محفظه شرایط آزمایش را تغییر داده و تخلیه الکتریکی را انجام می‌دهیم. برای هر کدام از شرایط کار تعداد ۱۵

¹ Partially Weighted Spectral Transmission

مرتبہ تخلیہی الکتریکی انجام داده و اطلاعات بدست آمده را ثبت نمودیم. جدول ۳-۴ تغییرات شرایط کاری در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۳-۴: شرایط مختلف کاری در آزمایش

ولتاژ بیشینه	ولتاژ کمینه	فشار بیشینه	فشار کمینه	طول عایق
$9kV$	$8kV$	$1/1\text{ torr}$	$0/5\text{ torr}$	4 cm
$9kV$	$8kV$	$1/2\text{ torr}$	$0/6\text{ torr}$	$4/5\text{ cm}$
$9kV$	$8kV$	$1/3\text{ torr}$	$0/8\text{ torr}$	5 cm

فصل پنجم

نتیجہ و بحث

فصل پنجم: نتایج و بحث

۵-۱ مقدمه

در این فصل مشاهدات آزمایشگاهی از دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود (*SHUPF*) و نیز تحلیل داده‌های بدست آمده، شرح داده شده است. این آزمایشات در شرایط کاری متفاوتی از قبیل فشارها و ولتاژهای مختلف و همچنین با عایق‌هایی با جنس یکسان و طول متفاوت صورت گرفته است. در بخش اول از آزمایشات، آزمایش‌های اولیه در جهت بررسی عملکرد صحیح دستگاه پلاسمای کانونی بیان شده است و در بخش دوم از آزمایشات، از ولتاژ کاری ۸ کیلو ولت و ۹ کیلو ولت در فشارهای مختلف و عایق‌هایی با طول متفاوت و گاز کاری آرگون برای تخمین انرژی اشعه‌ی ایکس نرم استفاده شده است و همچنین نمودارهای آن مورد بررسی قرار گرفته شده است. در این آزمایش‌ها از آشکارسازهای زیر استفاده شده است:

۱. پیچ‌های رگوفسکی

۲. اسپکترومتر پنج کاناله‌ی اشعه‌ی ایکس نرم

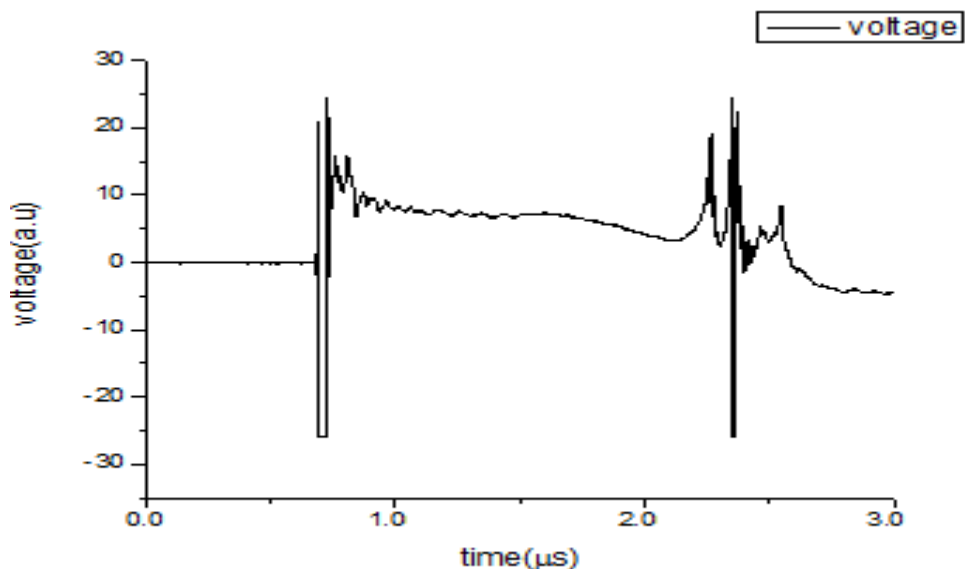
۳. پروب ولتاژ

با استفاده از این آشکارسازها می‌توان جریان، مشتق جریان، اشعه‌ی ایکس نرم و اشعه‌ی ایکس سخت و نیز تغییرات ولتاژ را مطالعه نمود. در این سری از آزمایشات از پیچ‌های رگوفسکی و پروب ولتاژ برای مطالعه‌ی پهنج شدگی در لایه‌ی پلازما و از اسپکترومتر پنج کاناله‌ی اشعه‌ی ایکس نرم به منظور آشکارسازی و اندازه‌گیری انرژی اشعه‌ی ایکس نرم استفاده شده است. در این پایان نامه هدف مطالعه‌ی تغییرات انرژی اشعه‌ی ایکس نرم خروجی از دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود در اثر تغییر طول عایق دستگاه می‌باشد.

۵-۲ آزمایشات اولیه به منظور بررسی عملکرد صحیح دستگاه

به منظور بررسی عملکرد صحیح دستگاه پلاسمای کانونی، بعد از چیدمان صحیح آن و اعمال شرایط مطلوب آزمایشگاهی، تعدادی تخلیه‌ی الکتریکی در ولتاژها و فشارهای متعارف انجام می‌دهیم. با ثبت سیگنال‌ها از دیاگنوستیک‌های موجود می‌توان اطلاعات زیاد و مفیدی را از دینامیک لایه‌ی پلازما بدست آورد. همچنین می‌توان از وجود تنگش در لایه‌ی پلاسمایی که مطلوب ما برای اندازه‌گیری انرژی اشعه‌ی ایکس نرم است مطلع شد. یکی از این سیگنال‌های مهم، سیگنال حاصله از پروب ولتاژ است.

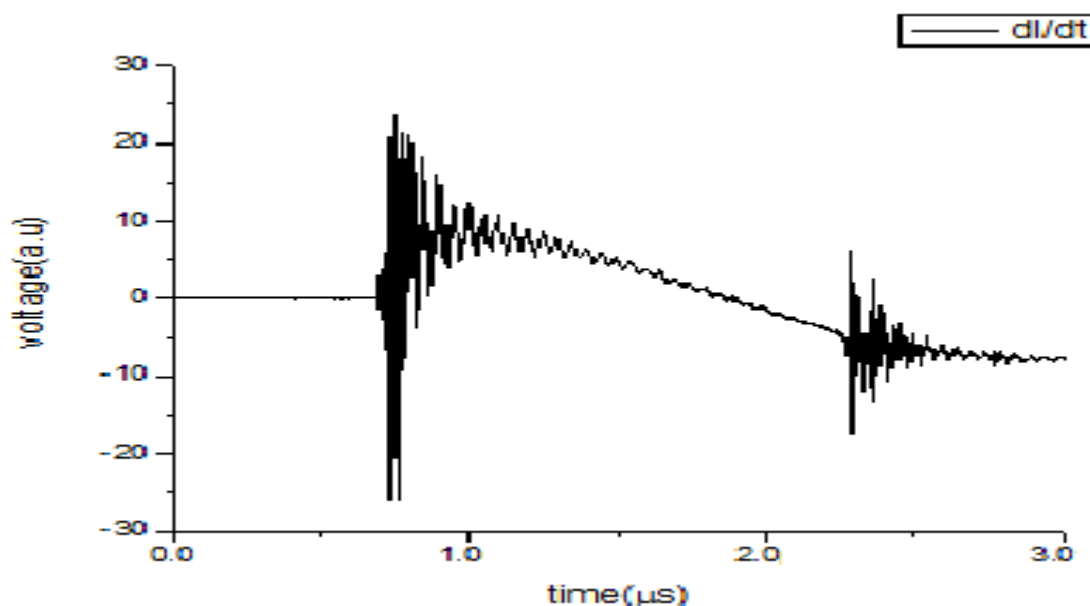
جزئیات مربوط به این دیاگنوستیک در فصل‌های پیشین توضیح داده شده است. پروب ولتاژ مستقیماً به دو سر آند و کاتد متصل می‌شود. نمونه‌ای از این سیگنال که در دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود بدست آمده است در شکل ۵-۱ نشان داده شده است. با استفاده از این سیگنال می‌توان بازه‌ی زمانی بین حرکت لایه‌ی جریان را در دو فاز محوری و شعاعی به دست آورد.



شکل ۵-۱: سیگنال حاصله از پروب ولتاژ

پیک شماره‌ی ۱ نشان دهنده‌ی شروع فاز شکست روی سطح عایق می‌باشد. پیک شماره‌ی ۲ نشان دهنده‌ی فاز محوری می‌باشد. بعد از پیک شماره ۲ فاز شعاعی به سرعت شروع شده و لایه‌ی پلازما به ستون پلاسمایی تبدیل می‌شود. این ستون ایجاد شده بر اثر وجود ناپایداری‌هایی از قبیل سوسیسی و تاب‌ی از بین می‌رود. فاصله‌ی زمانی میان این دو پیک را به عنوان زمان پینچ شدگی معرفی و در نظر می‌گیرند. گاهی بعد از پیک ۲ یک یا دو پیک دیگر به فاصله‌ی زمانی کوتاهی وجود دارد که تقریباً از لحاظ ارتفاع با پیک ۲ برابر است. این پیک‌ها بیانگر این موضوع می‌باشند که فرایند چند پینچی اتفاق افتاده است. این پدیده هنگامی اتفاق می‌افتد که تمامی گاز موجود در محفظه در کانونی شدن لایه‌ی جریان شرکت نمی‌کنند و اندکی از آن در روی سطح و اطراف باقی می‌مانند. این مقدار گاز باقی مانده بعد از تنگش اول به بالای سطح آند رسیده و تنگش دوم و سوم را تشکیل می‌دهند.

یکی دیگر از منحنی‌هایی که در سیستم پلاسمای کانونی از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است، منحنی مشتق جریان می‌باشد. در شکل ۲-۵ نمونه‌ای از این منحنی که با استفاده از دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود بدست آمده است، نشان داده شده است. با استفاده از منحنی مشتق جریان می‌توان به زمان تنگش پی برد. در آزمایشات انجام گرفته برای راهبرد این پایان نامه از نمودارهای مشتق جریان به منظور آگاهی از تنگش استفاده نموده‌ایم.

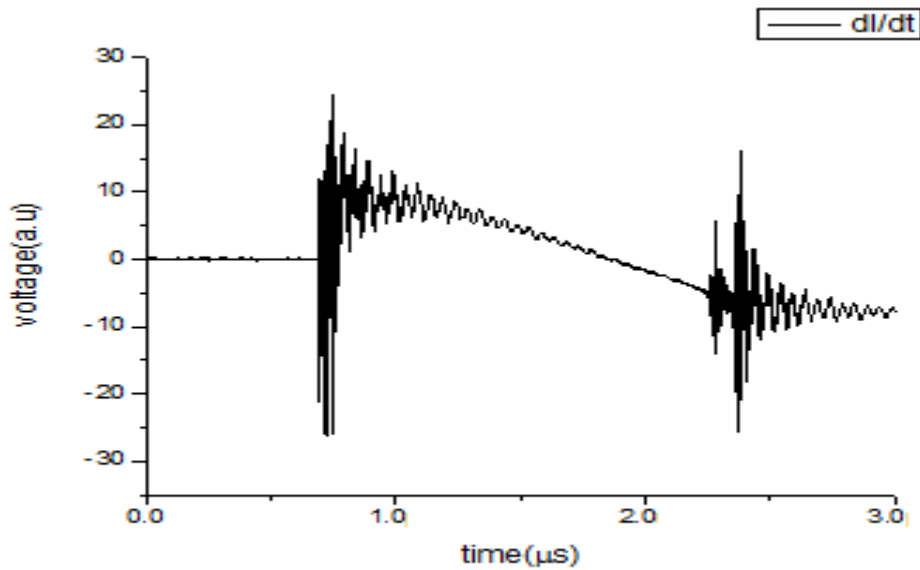


شکل ۲-۵: نمونه‌ای از سیگنال مشتق جریان

در شکل ۲-۵ افت شدید در منحنی مشتق جریان بیانگر تشکیل ستون پلاسما می‌باشد. در این حالت پلاسمایی با دمای حدود یک کیلو الکترون ولت و چگالی در حدود $10^{26} \text{ (m}^{-3}\text{)}$ تشکیل می‌شود. همانطور که در فصل‌های گذشته شرح داده شد این فرو افت شدید به علت تغییرات سریع در اندوکتانس پلاسما می‌باشد که بنابر رابطه‌ی ۳-۱۲ باعث افت سریع منحنی مشتق جریان می‌شود. فاصله‌ی زمانی میان خیزش اولیه‌ی جریان و نقطه‌ی فروافت شدید را به عنوان زمان تنگش تعریف می‌کنند. زمان تنگش با ولتاژ کاری ارتباط معکوس دارد.

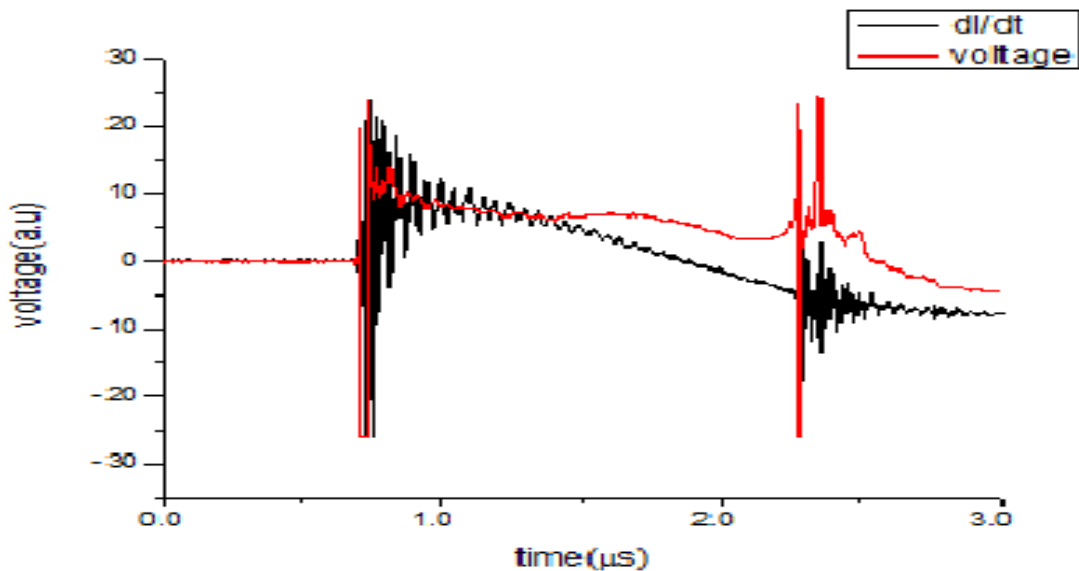
گاهی اوقات در نمودار مشتق جریان دو یا سه فروافت دیده می‌شود که نمایانگر پدیده‌ی چند پینچی می‌باشد که در بالا توضیح داده شده است. هر کدام از این فرو افت‌ها به ترتیب تنگش اول، دوم و سوم

را نشان می‌دهند. در شکل ۳-۵ نمونه‌ای از منحنی مشتق جریان را برای پدیده‌ی دو پینچی نشان داده‌ایم.



شکل ۳-۵: نمونه‌ای از منحنی مشتق جریان نشان دهنده‌ی پدیده‌ی چند پینچی

البته سیگنال‌های حاصله از پروب ولتاژ و پیچه‌ی رگوفسکی کاملاً بر هم منطبق بوده و برای اندازه‌گیری زمان پینچ‌شدگی و تایید پینچ تفاوتی نمی‌کند از کدامیک استفاده نماییم. در شکل ۴-۵ نمونه‌ای از انطباق این دو نمودار بر هم را نشان داده‌ایم.



شکل ۴-۵: نمونه‌ای از انطباق نمودار پروب ولتاژ و مشتق جریان

همانطور که از نمودار ۴-۵ مشخص است زمان پینچ شدگی در هر دو دیاگنوستیک کاملاً بر هم منطبق می‌باشد.

۳-۵ اندازه‌گیری‌های مربوط به اشعه ایکس نرم

۱-۳-۵ آشکارسازی اشعه ایکس با استفاده از فوتودیود

همانطور که در بخش‌های گذشته نیز شرح داده شده است ما در این آزمایشات برای آشکارسازی اشعه‌ی ایکس از آرایه فوتودیودهای BPX-65 استفاده نموده‌ایم. این دیودها دارای زمان پاسخ‌دهی سریع و جریان تاریک پایین هستند. جزییات مربوط به مشخصه‌های این فوتودیودها در فصل پیشین توضیح داده شده است. برای پیدا کردن انرژی اشعه‌ی ایکس و نیز توزیع زمانی آن از این فوتودیودها البته با فیلترهای مختلف استفاده کرده‌ایم. برای انتخاب این فیلترها باید محدوده‌ی انرژی اشعه‌ی ایکس گسیل شده از گاز کاری مورد استفاده را در نظر بگیریم.

همانطور که در فصل‌های قبل نیز بیان شد به منظور محاسبه‌ی انرژی اشعه‌ی ایکس نرم ما از فیلترهای آلومینیوم ۲۰ میکرومتر و آلومینیوم ۱۰ میکرومتر بعلاوه ۱۲۵ میکرومتر مایلار استفاده نموده‌ایم. منحنی حساسیت این فیلترها در شکل ۵-۵ نشان داده شده است. با توجه به منحنی حساسیت این دو فیلتر میتوان انرژی اشعه‌ی ایکس نرم را محاسبه نمود. همان گونه که از شکل نیز مشخص است این دو منحنی به غیر از ناحیه‌ی اشعه‌ی ایکس نرم در سایر جاها بر هم منطبق هستند.

۲-۳-۵ تخمین انرژی اشعه ایکس نرم با استفاده از فوتودیودها

در فصل چهارم روابط محاسبه انرژی اشعه ایکس نرم را با استفاده از آرایه‌ی آشکارساز BPX-65 بیان نمودیم. دیدیم که برای محاسبه‌ی انرژی اشعه‌ی ایکس باید پارامترهای زیر مشخص باشند:

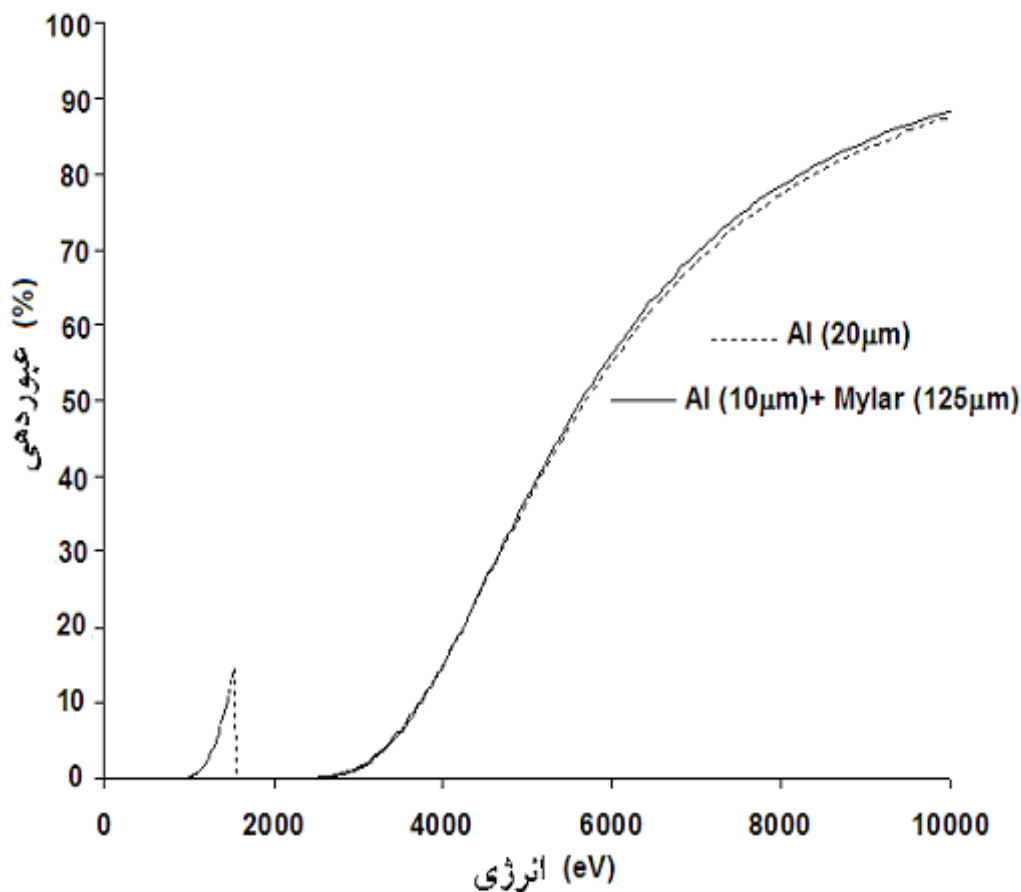
۱. ضریب عبور طیف جرمی نسبی

۲. فاصله‌ی ستون پلاسما تا محل آشکارساز

۳. مساحت سطح حساس به تابش فوتودیود

۴. مقاومت داخلی آشکارساز

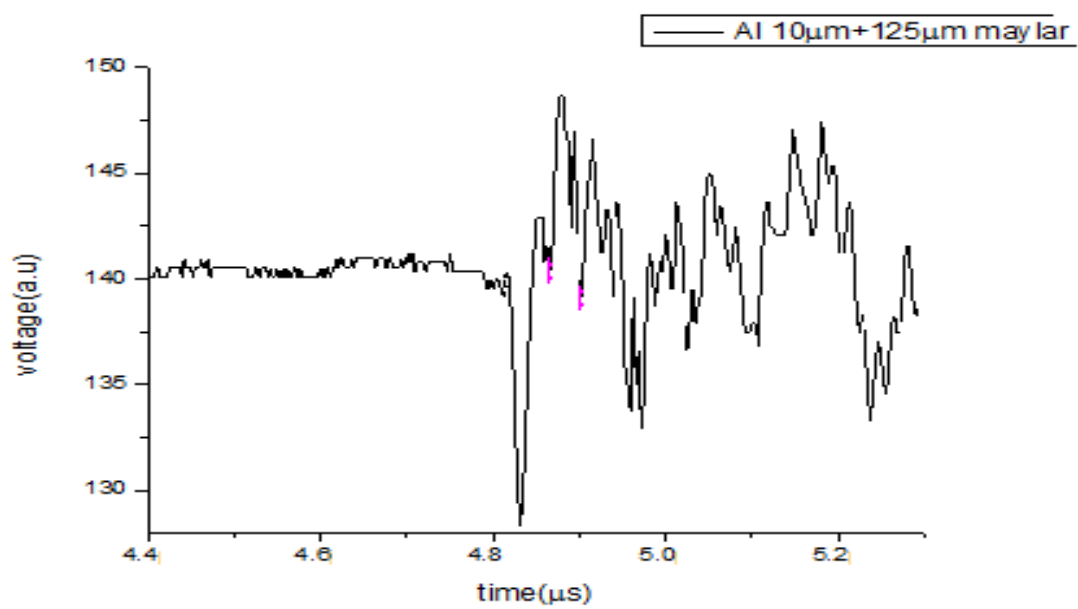
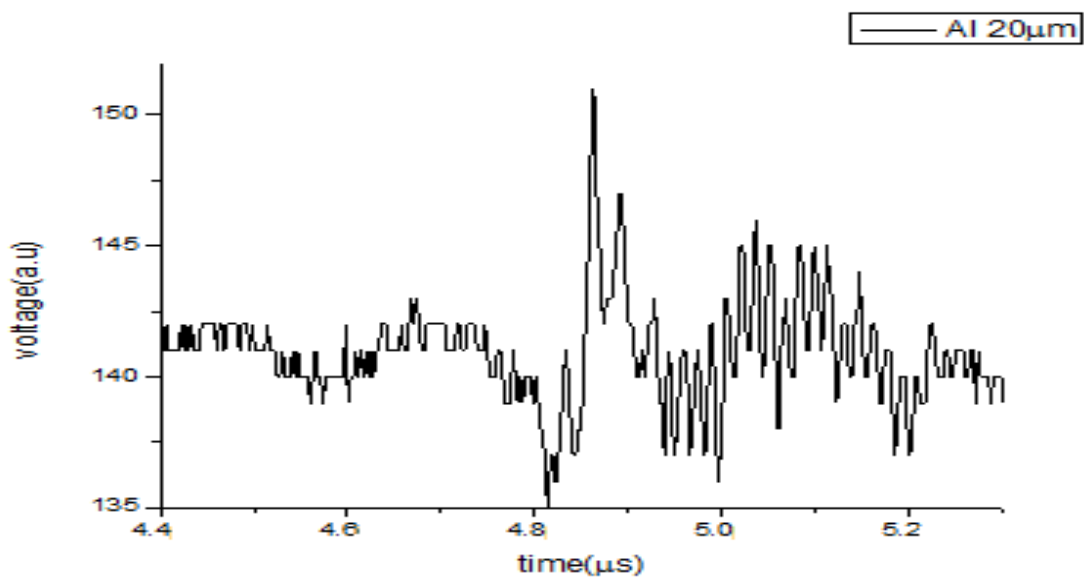
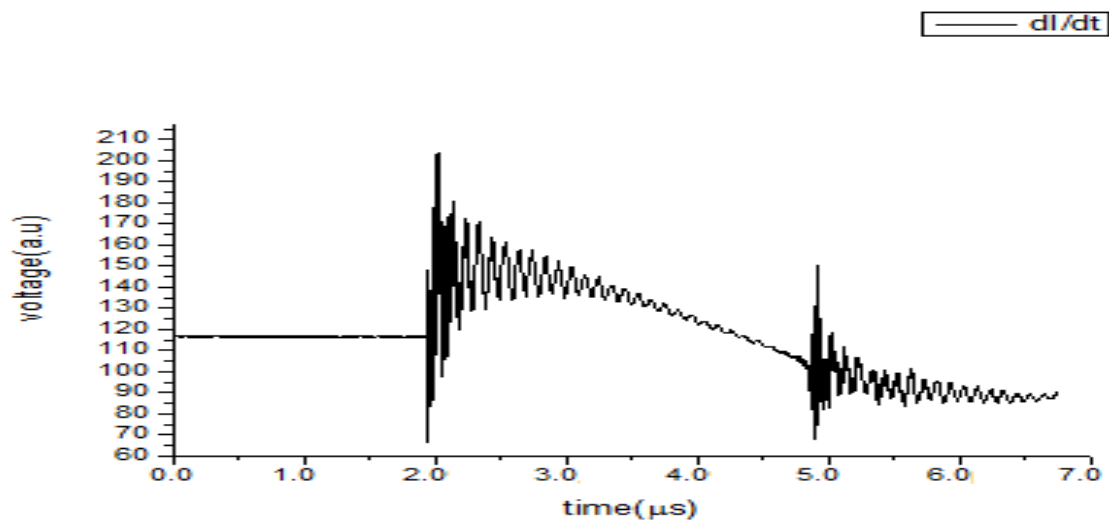
۵. مساحت زیر منحنی خروجی از آشکارساز



شکل ۵-۵: منحنی حساسیت فیلترهای بکار رفته در آشکارساز

از آنجاییکه ضریب "عبور طیف جرمی نسبی"^۱ برای گاز آرگون تا کنون محاسبه نشده است، لذا نمی توان انرژی اشعه‌ی ایکس نرم را برای گاز آرگون به طور عددی و دقیق اندازه‌گیری نمود. از طرفی چونکه انرژی اشعه‌ی ایکس برای گاز آرگون را نمی توان محاسبه نمود لذا بازه‌ی انرژی اشعه‌ی ایکس نرم و سخت را نیز نمی توان برای آن مشخص کرد. از همین رو فیلترهای استفاده شده برای تفکیک بازه انرژی و حذف اشعه‌ی ایکس سخت در بازه‌ی اشعه‌ی ایکس نرم، بطور تجربی و با استفاده از نتایج گاز کاری نئون انتخاب شده است. لذا این فیلتر قادر به حذف اشعه‌ی ایکس سخت نخواهد بود. ولی به طور تقریبی با استفاده از این دو فیلتر و کم کردن مساحت زیر آن دو می توان تغییرات انرژی را بر حسب تغییرات فشار و ولتاژ و نیز تغییرات طول عایق بررسی و مطالعه نمود. نمونه‌ای از سیگنال‌های مشتق جریان و کانال‌های فوتودیود بدست آمده در روند آزمایشات با دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود را در شکل ۵-۶ نشان داده‌ایم.

¹ Partially Weighted Spectral Transmission



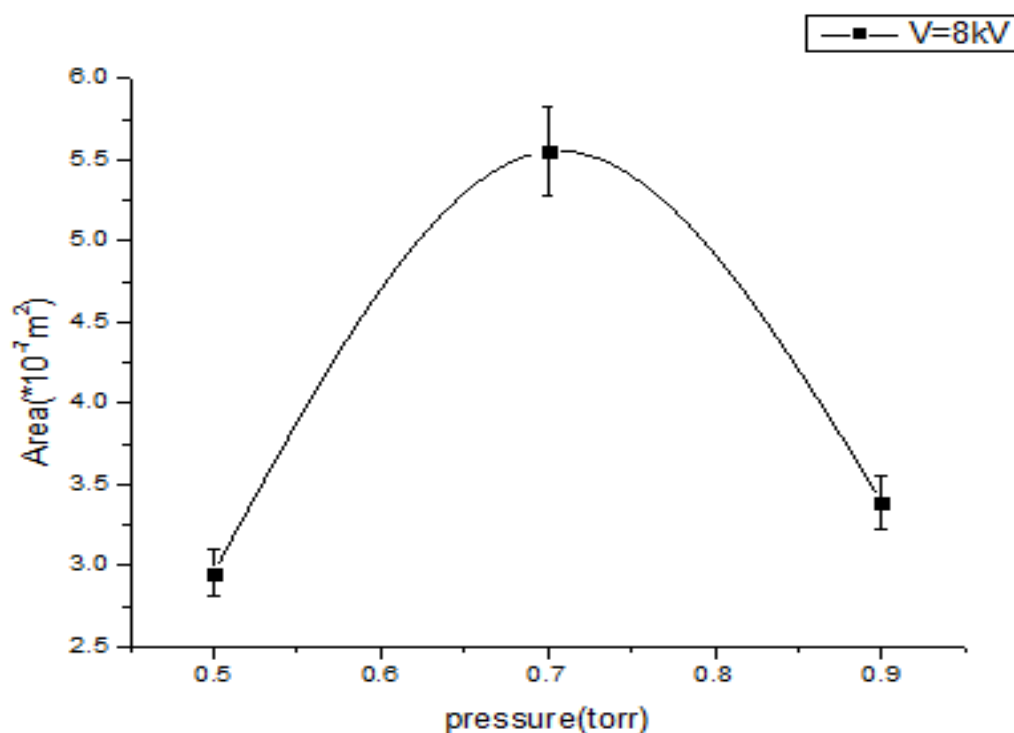
شکل ۵-۶: نمونه‌ای از سیگنال‌های مشتق جریان و فوتودیودها

همانطور که می‌دانیم زمانی که شدت پینچ‌ها قوی‌تر است و یا به بیان دیگر افت جریان شدیدتری اتفاق می‌افتد، پیک‌های اشعه‌ی ایکس شاخص‌تر و دارای تراکم بیشتر و از لحاظ تعداد نیز بیشتر می‌شوند که نشان از انرژی بیشتر تولید شده در اینگونه تنگش‌ها می‌باشد.

۳-۳-۵ بررسی اثر فشار و ولتاژ بر انرژی اشعه ایکس نرم

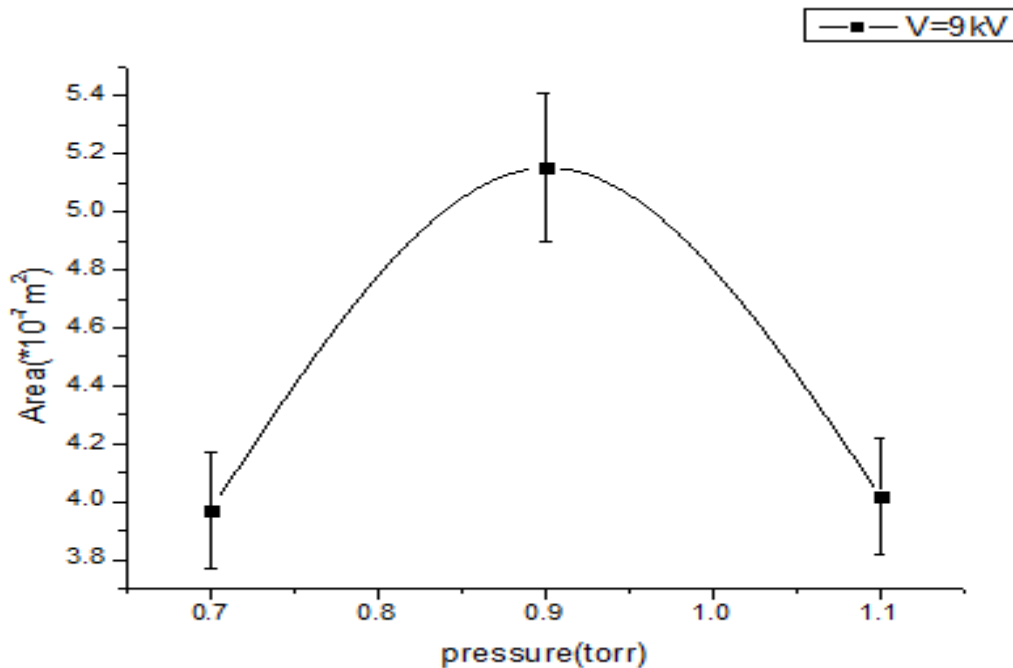
۱-۳-۳-۵ عایق شماره ۱

آزمایشات را با عایقی به طول ۴ سانتی متر و از جنس پیرکس و گاز کاری آرگون آغاز می‌کنیم. این عایق را در داخل دستگاه قرار داده و در فشارها و ولتاژهای مطلوب، آزمایشات را به طور آهسته و پیوسته انجام می‌دهیم. برای هر عایق در هر فشار و ولتاژ خاص ۱۵ بار تخلیه‌ی الکتریکی انجام داده و نتایج را توسط نوسان‌نما مشاهده و به وسیله‌ی کامپیوتر ثبت نموده‌ایم. برای آگاهی از تنگش در لایه‌ی پلاسمایی و تبدیل آن به ستون پلازما از سیگنال‌های پیچیده‌ی رگوفسکی بهره برده‌ایم. برای اطلاع از میزان اشعه‌ی ایکس خروجی از دستگاه از آرایه‌های فوتودیود BPX-65 استفاده شده است. اگر تغییرات مساحت زیر منحنی‌های فوتودیود را بر حسب فشار در ولتاژ ۸ kV رسم کنیم نمودار ۵-۷ بدست می‌آید.



شکل ۵-۷: تغییرات مساحت زیر منحنی بر حسب فشار در ولتاژ ۸kV برای عایق ۱

و حال اگر تغییرات مساحت زیر منحنی‌های فوتودیود را بر حسب فشار در ولتاژ ۹ kV رسم کنیم نمودار ۵-۸ بدست می‌آید. که دارای روندی مشابه نمودار قبل بر حسب فشار می‌باشد.



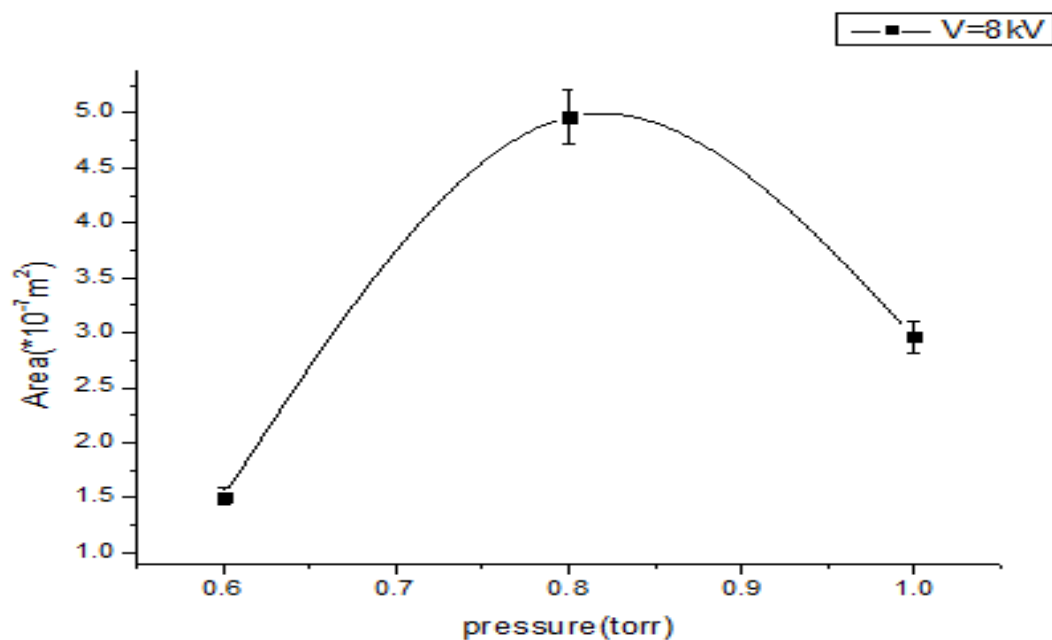
شکل ۵-۸: تغییرات مساحت زیر منحنی بر حسب فشار در ولتاژ ۹kV برای عایق ۱

همانطور که از این دو نمودار مشاهده می‌شود در هر دو ولتاژ با افزایش فشار، مساحت زیر منحنی‌ها افزایش می‌یابد و این افزایش مساحت تا هنگامی که فشار به فشار بهینه برسد ادامه می‌یابد و پس از آن، مساحت زیر منحنی‌ها شروع به افت می‌کند که نشان دهنده‌ی افت انرژی اشعه‌ی ایکس می‌باشد. با مقایسه‌ی بین این دو نمودار مشخص می‌شود که در این عایق با افزایش ولتاژ، فشار بهینه نیز افزایش یافته است.

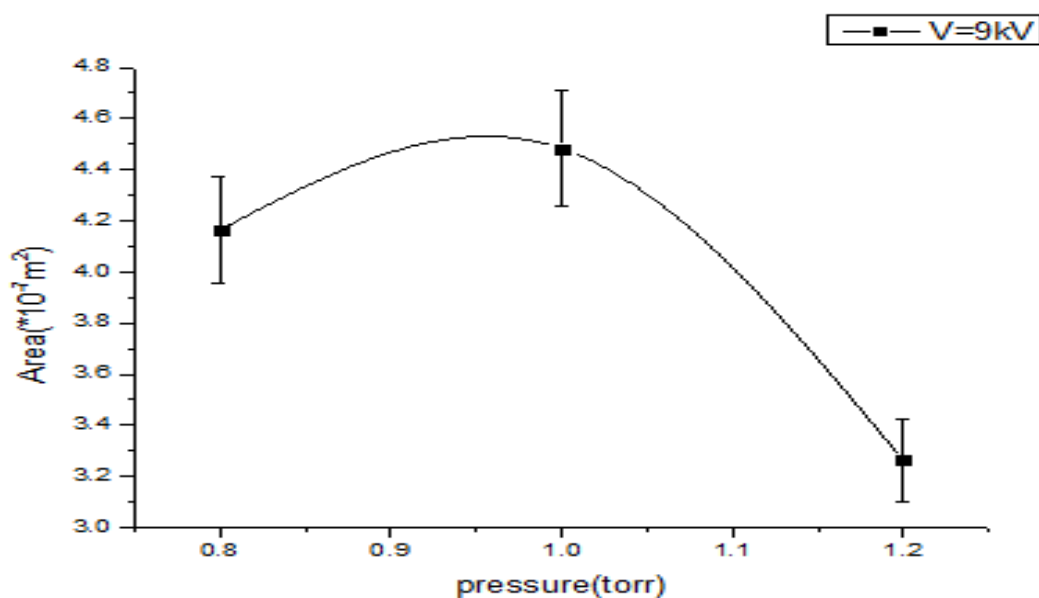
۵-۳-۲ عایق شماره‌ی ۲

با قرار دادن عایق شماره‌ی ۲ به طول ۴/۵ سانتی متر در داخل دستگاه و انجام دادن آزمایشات به طور یکسان (از لحاظ تعداد شات‌ها) با عایق قبلی در فشارهای مطلوب و ولتاژهای کاری، ترسیم نمودارهای تغییرات مساحت زیر منحنی بر حسب فشار برای این عایق نیز مشابه با عایق قبلی بدست آمد که در شکل‌های ۵-۹ و ۵-۱۰ نشان داده شده است. برای این عایق نیز با افزایش فشار، مساحت زیر منحنی‌های فوتودیود افزایش یافته و این سیر صعودی تا زمانیکه فشار به فشار بهینه برسد ادامه می‌یابد و بعد از آن

مساحت زیر منحنی شروع به کاهش می‌کند. البته این روند بیانگر همان نتایج قبل می‌باشد. در این عایق نیز همانند عایق قبلی مشخص است که با افزایش ولتاژ، فشار بهینه نیز افزایش می‌یابد، یعنی اینکه انرژی اشعه‌ی ایکس در فشارهای بالاتری به مقدار بیشینه‌ی خود می‌رسد. اگر نمودارهای این عایق را با دو نمودار عایق شماره‌ی ۱ مقایسه کنیم متوجه می‌شویم که با افزایش طول عایق میزان عددی مساحت‌ها در فشار بهینه کمتر و به تبع آن مقدار انرژی اشعه‌ی ایکس نرم نیز کاهش یافته است.



شکل ۵-۹: تغییرات مساحت زیر منحنی بر حسب فشار در ولتاژ ۸kV برای عایق ۲

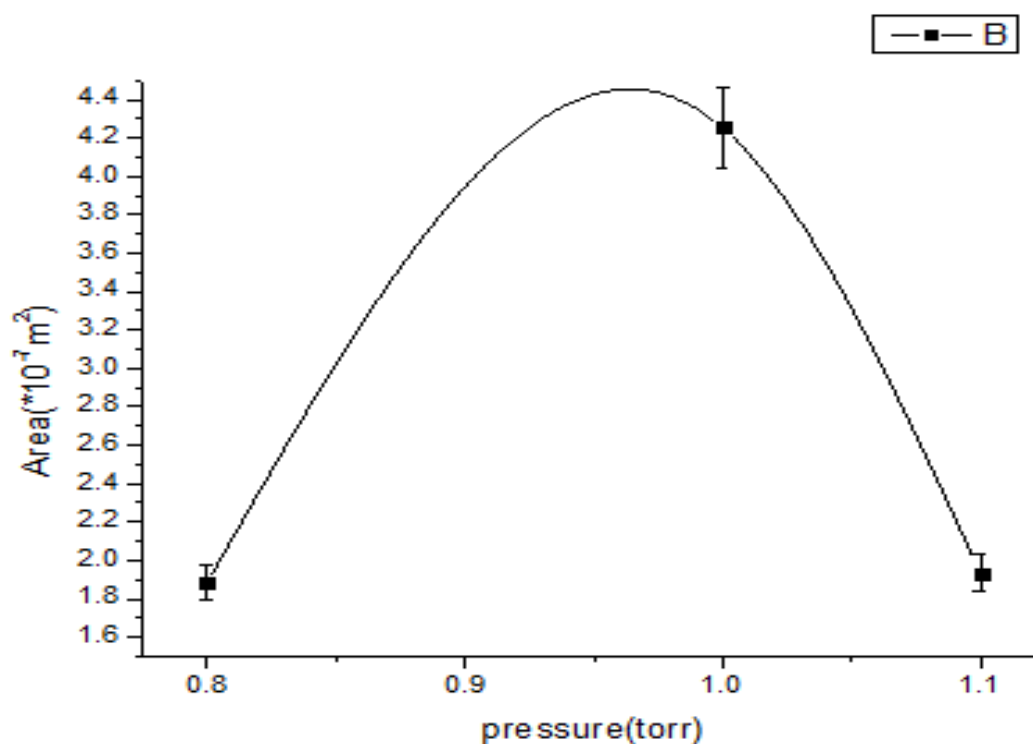


شکل ۵-۱۰: تغییرات مساحت زیر منحنی بر حسب فشار در ولتاژ ۹kV برای عایق ۲

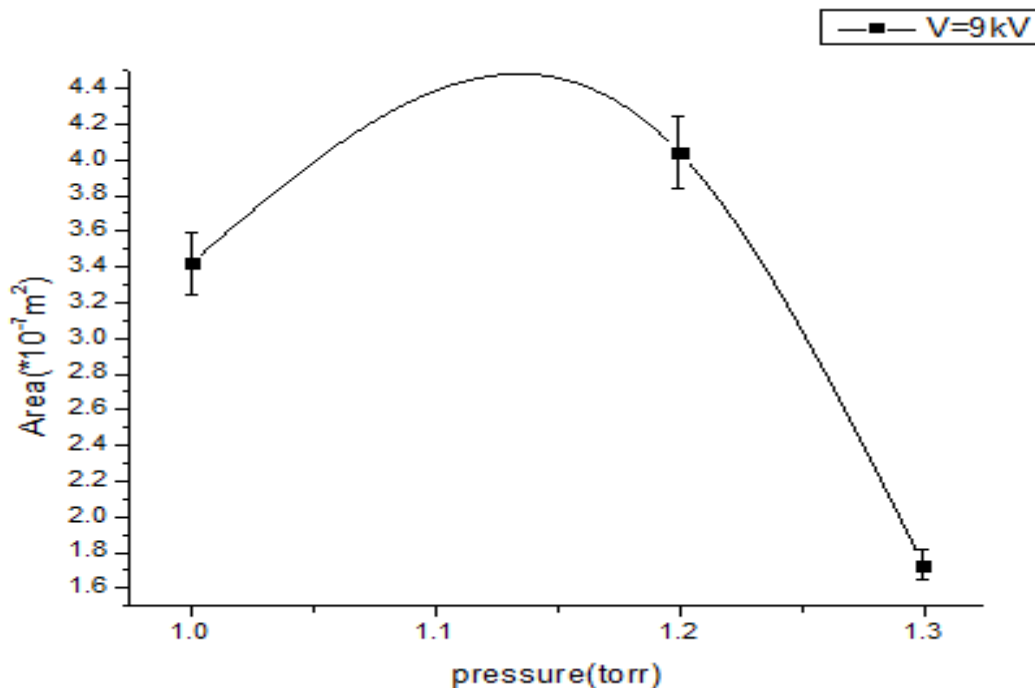
۳-۳-۳-۵ عایق شماره ۳

و در نهایت عایقی به طول ۵ سانتی متر را در دستگاه قرار داده و مانند دو عایق پیشین در ولتاژ و فشارهای مطلوب و با شرایطی یکسان آزمایش‌ها را ادامه می‌دهیم. همچنان گاز کاری آرگون می‌باشد و برای هر عایق ۱۵ بار شات زده می‌شود و نتایج توسط نوسان‌نما و کامپیوتر ثبت می‌شوند. حال اگر تغییرات مساحت زیر منحنی‌های فوتودیود را برای این عایق بر حسب فشار در ولتاژ ۸kV و ۹ kV رسم کنیم به نمودارهای ۵-۱۱ و ۵-۱۲ خواهیم رسید که در زیر نشان داده شده‌اند. درست مانند دو عایق قبل با افزایش فشار، مساحت زیر منحنی فوتودیود افزایش یافته که به تبع آن انرژی اشعه‌ی ایکس نرم خروجی از دستگاه نیز افزایش می‌یابد. این افزایش مساحت تا فشار بهینه ادامه یافته و بعد از آن مساحت زیر منحنی فوتودیود سیر نزولی به خود می‌گیرد.

همچنین با دقت در دو نمودار واضح است که با افزایش ولتاژ، فشار بهینه برای این عایق نیز افزایش داشته است. البته با مقایسه این دو نمودار با نمودارهای قبل مشخص می‌شود که با افزایش طول عایق، میزان عددی مساحت زیر منحنی فوتودیود کاهش یافته است. به بیان دیگر میزان اشعه‌ی ایکس نرم خروجی از دستگاه کاهش یافته است.



شکل ۵-۱۱: تغییرات مساحت زیر منحنی بر حسب فشار در ولتاژ ۸kV برای عایق ۳



شکل ۵-۱۲: تغییرات مساحت زیر منحنی بر حسب فشار در ولتاژ ۹kV برای عایق ۳

۵-۳-۳-۴ نتایج بدست آمده از نمودارهای تغییرات مساحت بر حسب فشار در یک ولتاژ

همانطور که از تمامی نمودارهای ترسیم شده در این بخش مشخص است با افزایش فشار در یک ولتاژ ثابت برای یک عایق خاص، مساحت زیر منحنی‌های فوتودیود افزایش می‌یابد یعنی انرژی اشعه‌ی ایکس نرم خروجی از دستگاه پلاسمای کانونی افزایش می‌یابد. این سیر صعودی ادامه می‌یابد تا جاییکه فشار به مقدار فشار بهینه می‌رسد، در این نقطه بیشترین مقدار عددی مساحت را داریم. یا به بیان دیگر بیشترین مقدار اشعه‌ی ایکس نرم از دستگاه پلاسمای کانونی گسیل می‌شود. حال اگر فشار را افزایش دهیم از میزان عددی مساحت زیر منحنی‌ها کاسته شده که بیانگر افت میزان انرژی اشعه‌ی ایکس نرم خروجی از دستگاه پلاسمای کانونی است. این امر به این علت می‌باشد که در فشارهای پایین‌تر، چگالی پلاسما کمتر بوده و گاز داخل محفظه دارای جرم کمتری است، بنابراین اولاً لایه جریان سریع‌تر حرکت کرده و ثانیاً گاز کمتری جاروب می‌کند پس در محل تشکیل ستون پلاسما چگالی گاز کاری کم می‌باشد.

از طرفی طبق رابطه‌ای که توسط آقای لی [۱۹] به دست آمده است و بیان می‌کند که انرژی اشعه‌ی ایکس خروجی از دستگاه پلاسمای کانونی به میزان انرژی منتقل شده به ستون پلازما بستگی دارد و این میزان انرژی انتقال یافته نیز تابع جرم گاز و شدت جریان پینچ می‌باشد، لذا جرم کمتر در جریان‌های پایین‌تر، انرژی کمتری را به ستون پلاسمایی منتقل کرده و در نتیجه از زمان تشکیل تا واپاشی ستون پلازما و تبدیل آن به یک ابر نازک و داغ پلاسمایی مقدار کمتری اشعه‌ی ایکس نرم تولید می‌شود.

با افزایش فشار چگالی پلازما بیشتر شده و لایه دارای جرم بیشتری خواهد شد. بنابراین از سرعت لایه جریان کاسته شده و همچنین لایه، جرم بیشتری را جاروب می‌کند. بنابراین در حین تشکیل تا واپاشی ستون پلازما مقدار بیشتری اشعه‌ی ایکس نرم تولید می‌شود. این روند ادامه می‌یابد تا زمانی که فشار به فشار بهینه برسد. در این حالت سرعت لایه، شدت جریان پینچ و همچنین جرم حمل شده توسط لایه طوری تنظیم می‌شود که در زمان تشکیل تا واپاشی ستون پلازما بیشترین انرژی اشعه‌ی ایکس نرم را داشته باشیم. با افزایش بیشتر فشار از سرعت لایه‌ی جریان کاسته شده و در نتیجه تنگش در جریان‌های پایین‌تر اتفاق می‌افتد و علی‌رغم جرم زیاد انرژی کمتری به ستون پلازما منتقل شده و در نتیجه انرژی اشعه‌ی ایکس نرم کمتر خواهد بود. به عبارت دیگر بعد از فشار بهینه شاهد یک افت در انرژی اشعه‌ی ایکس نرم خروجی از دستگاه خواهیم بود. البته نتایج تجربی نیز این مطلب را تأیید می‌کنند.

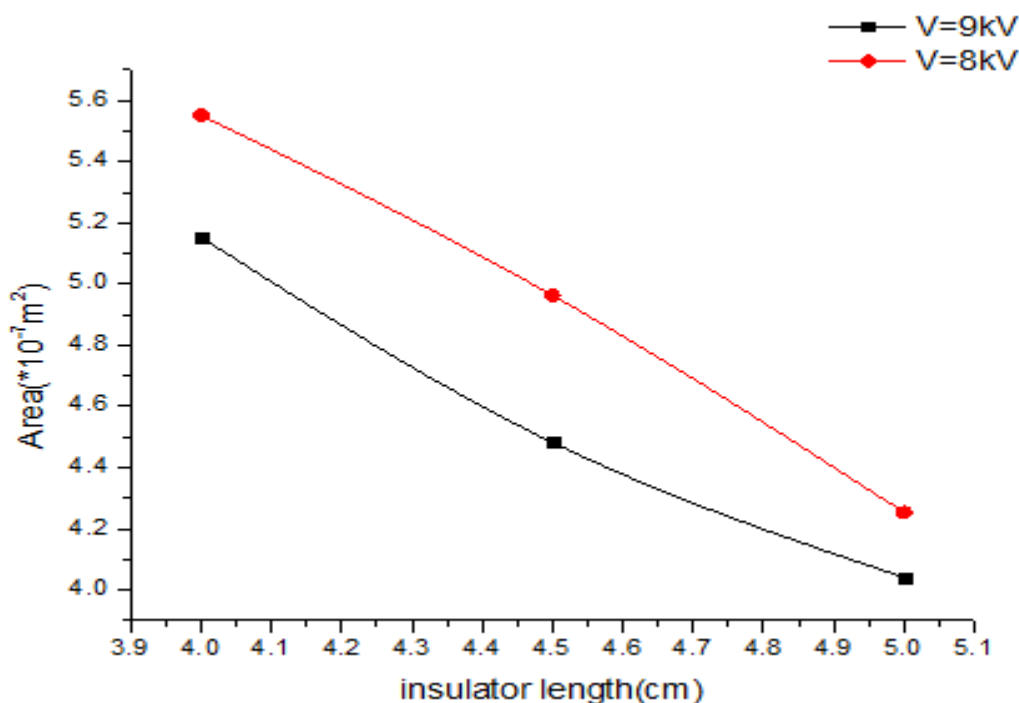
نکته‌ی دیگری که از بررسی نمودارها مشخص می‌شود آن است که برای یک عایق خاص با افزایش ولتاژ، فشار بهینه افزایش می‌یابد. افزایش ولتاژ در دستگاه به منزله‌ی افزایش نیروی محرکه‌ی وارده بر لایه‌ی پلازما می‌باشد. در صورت ثابت ماندن فشار و افزایش ولتاژ، لایه پلازما سریعتر حرکت کرده و زودتر از ماکزیمم جریان به بالای سطح آند می‌رسد و همچنین جرم کمتری را جاروب می‌کند بنابراین انرژی کمتری به ستون پلازما منتقل شده و در لحظه‌ی تنگش مقدار کمتری اشعه‌ی ایکس نرم تولید می‌شود. بنابراین برای داشتن مقدار بیشینه‌ی اشعه‌ی ایکس نرم با افزایش نیروی محرکه یا همان ولتاژ باید به همان نسبت میزان فشار را افزایش داده تا جرم لایه بیشتر شده و از سرعت آن نیز کاسته شود تا در لحظه‌ی تنگش بیشترین انرژی به ستون پلاسمایی منتقل شود.

۵-۳-۴ بررسی اثر طول عایق بر انرژی اشعه ایکس نرم

۵-۳-۴-۱ بررسی تغییرات مساحت بر حسب طول عایق

نمودارهای ترسیم شده در بخش قبل را می‌توان به گونه‌ای دیگر رسم و مورد مطالعه قرار داد. اگر مقدار عددی مساحت زیر منحنی فوتودیودها را در فشار بهینه بر حسب اندازه‌ی طول عایق آنها برای ولتاژ $8kV$ و $9kV$ رسم کنیم نمودار ۵-۱۳ بدست می‌آید.

همانطور که از شکل مشخص می‌شود با افزایش طول عایق در یک ولتاژ خاص مقدار عددی مساحت زیر منحنی فوتودیود به طور تقریباً خطی کاهش پیدا می‌کند و به تبع آن مقدار اشعه‌ی ایکس نرم خروجی از دستگاه پلاسمای کانونی نیز کاهش می‌یابد. به بیان دیگر با افزایش طول عایق و یا کاهش طول مؤثر آند مقدار اشعه‌ی ایکس نرم خروجی کاهش می‌یابد.



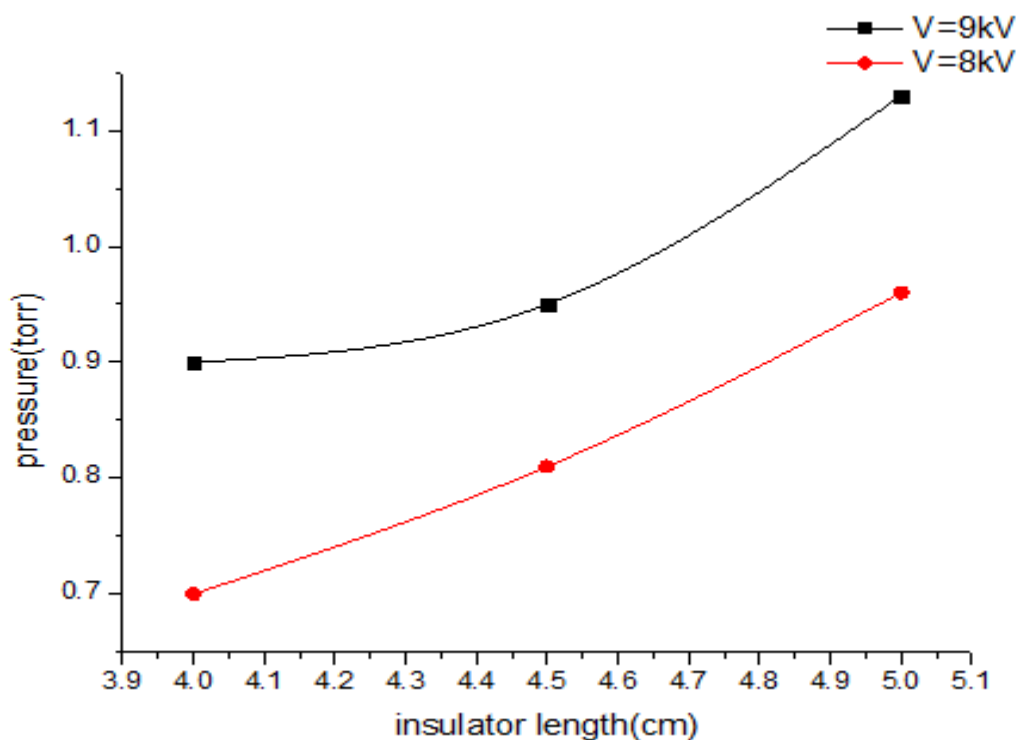
شکل ۵-۱۳: تغییر مساحت بر حسب طول عایق در ولتاژ $8kV$ و $9kV$

این امر به این علت است که در یک ولتاژ ثابت با افزایش طول عایق یا کاهش طول مؤثر آند، فاصله‌ی طولی طی شده توسط لایه‌ی پلاسمایی برای رسیدن به بالای سطح آند کاهش می‌یابد. با ثابت ماندن ولتاژ که همان نیروی محرکه اولیه برای حرکت لایه‌ی جریان است مدت زمان کمتری لازم است تا لایه

به سطح آند برسد، پس لایه در یک جریان پینچ ثابت جرم کمتری را جاروب کرده و انرژی کمتری را به ستون پلاسما منتقل می‌کند. لذا با افزایش طول عایق یا کاهش طول مؤثر آند مقدار اشعه‌ی ایکس نرم کاهش می‌یابد که این مطلب توسط نتیجه‌ی تجربی بدست آمده قابل تأیید است.

۵-۳-۴-۲ بررسی تغییرات فشار بهینه بر حسب طول عایق

حال اگر نمودار تغییرات فشار بهینه را بر حسب طول عایق‌ها رسم کنیم شکل ۵-۱۴ بدست خواهد آمد. همانطور که از شکل مشخص است در یک ولتاژ خاص با افزایش طول عایق، فشار بهینه نیز افزایش می‌یابد. به بیان دیگر با افزایش طول عایق یا کاهش طول مؤثر آند، فشار بهینه برای تولید بیشینه‌ی اشعه ایکس افزایش می‌یابد. دلیل این امر این است که در یک ولتاژ خاص با کاهش طول مؤثر آند، مسافت طولی که لایه‌ی جریان طی می‌کند کاهش یافته و لایه سریعتر به سطح آند خواهد رسید و به خاطر کاهش زمان، لایه جرم کمتری را جاروب خواهد کرد و تنگش در جریان‌های پایین‌تری اتفاق می‌افتد. بنابراین برای حفظ مقدار بیشینه‌ی انرژی اشعه‌ی ایکس باید با افزایش طول مؤثر آند مقدار فشار را افزایش دهیم تا به تبع آن مقدار جرم گاز افزایش یابد.

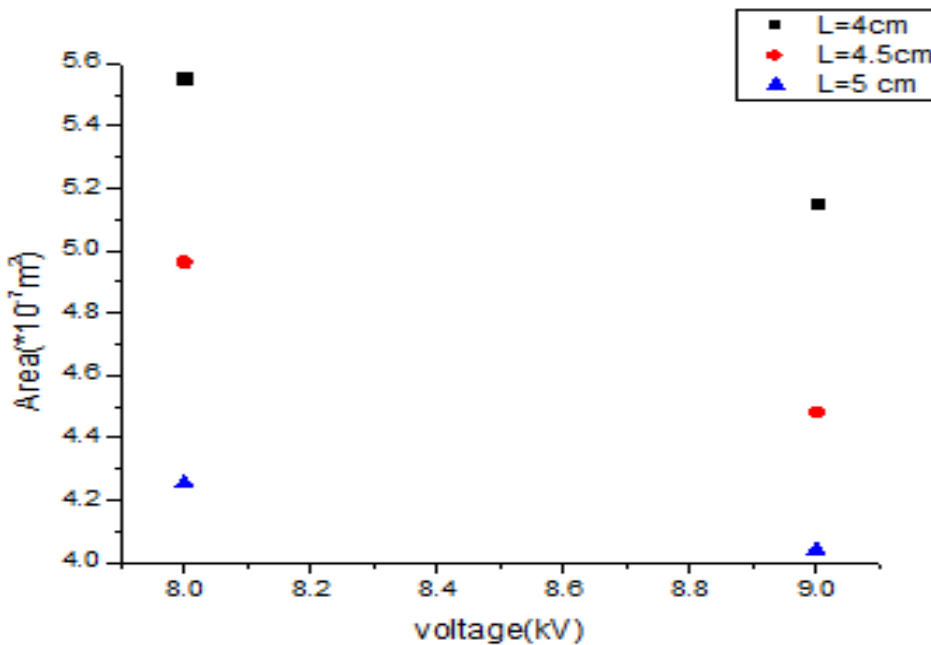


شکل ۵-۱۴: تغییرات فشار بهینه بر حسب طول عایق در ولتاژ ۹kV و ۸kV

با این کار لایه در مسیر کوتاهتر خود مقدار جرم بیشتری را جاروب کرده و در زمان تنگش انرژی بیشتری به ستون پلاسما منتقل خواهد کرد و لذا اشعه‌ی ایکس نرم بیشتری گسیل خواهد کرد.

۵-۳-۴-۳ بررسی تغییرات مساحت بر حسب ولتاژ

اکنون اگر تغییرات مساحت زیر منحنی‌های فوتودیود را بر حسب ولتاژ کاری برای هر سه عایق رسم کنیم نمودار شکل ۵-۱۵ بدست می‌آید.



شکل ۵-۱۵: نمودار تغییرات مساحت بر حسب ولتاژ

همانطور که از شکل بالا مشخص است برای تمامی عایق‌ها در فشار بهینه با افزایش ولتاژ مساحت زیر سطح منحنی‌ها کاهش پیدا می‌کند. یا به بیان دیگر برای یک عایق خاص در فشار بهینه با افزایش ولتاژ، انرژی اشعه‌ی ایکس نرم خروجی از دستگاه کاهش پیدا می‌کند. این موضوع به این علت می‌باشد که با توجه به خصوصیات مکانیکی دستگاه و طول آند بکار رفته در آن، ولتاژ ۸ کیلوولت بهترین ولتاژ برای هماهنگی میان سرعت لایه‌ی جریان و جرم حمل شده توسط آن و رسیدن همزمان آن‌ها با ماکزیمم جریان تخلیه به بالای سطح آند، برای تشکیل تنگش و همچنین ماکزیمم انرژی منتقل شده به ستون پلاسما و در نتیجه بیشترین گسیل اشعه‌ی ایکس از دستگاه می‌باشد.

۴-۵ نتیجه گیری نهایی

در حالت کلی اگر بخواهیم نتایج بدست آمده در این فصل را بطور مختصر مرور کنیم، میتوانیم به مطالب زیر بسنده کنیم.

گسیل اشعه‌ی ایکس نرم توسط گاز کاری آرگون از دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود (SHUPF) مورد مطالعه قرار گرفت. به علت عدم معلوم بودن ضریب عبور طیف جرمی نسبی برای گاز آرگون موفق به محاسبه دقیق انرژی نشدیم ولی با استفاده از مساحت زیر منحنی‌های فوتودیود که به طور مستقیم به انرژی اشعه ایکس وابسته است توانستیم تغییرات انرژی را بر حسب تغییرات فشار و ولتاژ و طول عایق بدست آوریم. بعد از انجام آزمایشات نتیجه گرفتیم که:

۱. برای یک عایق خاص در یک ولتاژ، با افزایش فشار میزان انرژی اشعه‌ی ایکس افزایش داشته و در فشار بهینه به بیشترین مقدار خود می‌رسد و بعد از فشار بهینه این مقدار شروع به کاهش می‌کند.

۲. برای یک عایق خاص با افزایش ولتاژ، فشار بهینه برای تولید اشعه‌ی ایکس بیشینه افزایش می‌یابد.

۳. برای یک عایق خاص و برای فشار بهینه، با افزایش ولتاژ میزان تولید اشعه ایکس نرم از دستگاه کاهش می‌یابد.

۴. برای یک ولتاژ ثابت با افزایش طول عایق میزان اشعه‌ی ایکس خروجی از دستگاه کاهش می‌یابد.

۵. برای یک ولتاژ ثابت با افزایش طول عایق فشار بهینه برای داشتن اشعه‌ی ایکس بهینه افزایش می‌یابد.

پیشنهادات

موضوعات زیر به عنوان کارهای آتی پیشنهاد می‌شود:

- * مطالعه تأثیر طول عایق بر انرژی اشعه‌ی ایکس نرم توسط سایر گازها.
- * مطالعه تأثیر فشارها و ولتاژهای مختلف با آندهایی با اشکال متفاوت بر انرژی اشعه ایکس.
- * مطالعه‌ی میزان تغییرات اشعه‌ی ایکس در پدیده‌ی چند پینچی.

منابع

- [۱] نجوم به زبان ساده. مايردگانی. محمد رضا خواجه پور. نشر مؤسسه جغرافیایی و کارتوگرافی گیتا شناسی. صفحه ۲۴۶
- [۲] مبانی ستاره شناسی. کارتونن هانر. غلام رضا شاه علی. انتشارات شاهچراغ. صفحه ۲۰۷
- [۳] F.F. Chen, "Introduction to plasma physics and controlled fusion" vol 1, springer, New York, second edition, (1986)
- [۴] رستمی فرد. د. د. تفرشی. م. نصیری. ع. "بررسی اشعه‌ی ایکس نرم دستگاه پلاسمای کانونی دنا با استفاده پردازش تصویر دوربین روزنه سوزنی"، کنفرانس فیزیک ایران، (۱۳۹۰)
- [۵] L. Mahe, "soft x-rays from compact plasma focus", PhD Thesis, NIE/ NTU (2000)
- [۶] Y. Yamada, Y. Kitagawa and Yokoyama "High energy deuterons beam generated by a plasma focus device" J. Appl. Phys., 58, 188. (1985)
- [۷] W. Neff, J. Eberle, R. Holz, R. Lebert and F. Richter, "The Plasma Focus as Soft X-ray Source for Microscopy and Lithography", SPIE Vol. 1140, X-ray Instrumentation, (1989)
- [۸] B. Shan, L. Mahe, R.S. Rawat and S. Lee, "Neon soft X-ray" Proceedings of Regional Conference on Plasma Research in 21st Century, Bangkok, Thailand, editor B. Paosawatyanong 75. (2000)
- [۹] E.P. Bogolyubov, V.D. Bochkov, V.A. Veretennikov, L.T. Vekhoreva, V.A. Gribkov, A.V. Dubrovskii, Yu.P. Ivanov, A.I. Isakov, O.N. Krokhin, P. Lee, S. Lee, V. Ya. Nikulin, A. Serban, P.V. Silin, X. Feng and G.X. Zhang "A Powerful Soft X-ray Source for X-ray Lithography Based on Plasma Focusing" phys.Rev. July 11, 1997
- [۱۰] B. Zheng, Z. Xiao, W. Wang, Choon Keat Lee, R.B. Goldner, H.J. Caulfield, R.L. Zimmerman, D.I. "An effective configuration for interferometric measurement of pulsed laser-induced plasma densities" science direct. Rev 23 January 2007.
- [۱۱] N.K. Neog, S.R. Mohanty, T.K. Borthakur. "Time resolved studies on X-rays and charged particles emission from a low energy plasma focus device" science direct. Rev 4 July 2007
- [۱۲] A. Bernard, H. Bruzzone, P. Choi, H. Chuaqui, V. Gribkov, K. Hirano, A. Krejci, S. Lee, C.M. Luo, F. Mezzetti, M. Sadowski, H. Schmidt, K. Ware, C.S. Wong, V. Zoita, "A Concept for an International Centre for Dense Magnetized Plasmas", (1993)
- [۱۳] J.W. Mather, "Investigation of the high energy acceleration mode in coaxial gun" Phys. Fluids S28. (1964)

- [۱۴] N.V. Filippov, T.I. Filippova and V.P. Vinogradov, “dense, high-temperature plasma in a non-cylindrical Z-pinch compression”, Nucl. Fusion Supl. 2577. (1962)
- [۱۵] S. Lee, P. Lee, G. Zhang, A. Serban, L. Mahe, X. Feng, S.V. Springham, C. Selvam, V. Kudryashov and T.K. Wong, “application of plasma focus as a source of high energy electron” Singap. J. Phys., 173, 276. (2003)
- [۱۶] S. Vahedi, S. Sobhanian, M.A. Mohammadi and V. Siahpoush, “Preliminary measurements in Sahand plasma focus emphasizing on the temporal characteristics of hard and soft X- rays” Czechoslovak Journal of Physics, 56, B389.(2006)
- [۱۷] S.P. Moo, Chakrabarty and S. Lee, “An investigation of the ion beam of a plasma focus using a metal obstacle and deuterated target” IEEE Trans. Plasma Sci., 19, 515.(1991)
- [۱۸] L. Michel, K. Schonbach and H. Fisher, “Neutron emission from a small 1-kJ plasma focus” Appl. Phys. Lett., 24, 57. (1974)
- [۱۹] M.A.Mohammadi dorbash, “laser shadiwgraphic study on plasma focus device”, PhD thesis,(2009)
- [۲۰] V.M. Korzhavin, “in Unconventional Approach to Fusion”, edited by B. Brunelli and G. Leotta, Plenum Press, New York, 193 (1982)
- [۲۱] J.W. Mather, “Formation of a High-Density Deuterium Plasma Focus” Phys. Fluids, 8, 366. (1965)
- [۲۲] P. Chatterton, “in Electrical Breakdown in Gases”, edited by Meek & Craggs, Wiley, (1978)
- [۲۳] A. Donges, G. Herziger, H. Krompholz, F. Ruhl and K. Schonbach, “The breakdown phase in a coaxial plasma gun” Phys.Lett. 76A, 391. (1980)
- [۲۴] H. Krompholz, W. Neff, F. Ruhl, K. Schonbach and G. Herziger, “Formation of the plasma layer in a plasma focus device” Phys.Lett. 77A, 246. (1980)
- [۲۵] M. Zakallah, I. Ahmad, A. Omar, G. Murtaza and M.M. Beg, “ Effects of anode shape on plasma focus operation with argon” Plasma source. Sci. Tech, 5, 544. (1980)
- [۲۶] J.N. Feuges, “The influence of the insulator surface in the plasma focus behavior” J. Appl. Phys. 66, 3467. (1989)
- [۲۷] W. Kies, “Power limits for dynamical pinch discharges” Plasma Phys.and Contr.Fusion, 28, 1645. (1986)

- [178] W.H. Bostik, L. Grunberger and W. Prior, "Current sheath motion in Plasma focus" in Proc. 3rd Europ. Conf. on Contr. Fusion and Plasma Phys. Utrecht, 1, 120. (1969)
- [179] J.W. Mather, "In methods of Experimental Physics" edited by Griem H and Lovberg R, Academic Press, vol. 9, Pt. B, p. 187. (1971)
- [180] M. Borowiecki and S. Czekaj, "Electromagnetic Instabilities, Filamentation, and Focusing of Relativistic Electron Beams" in Proc. 4th Int. Workshop on Plasma Focus and Z-Pinch Res. Warsaw, 86. (1985)
- [181] A. Bernard, A. Coudeville, A. Jolas, J. Launspach and J. Mascureau, "Experimental Studies on Plasma Focus and evidence for nonthermal processes" Phys. Fluids, 18, 180. (1975)
- [182] H. Bhuyan, S.R. Mohanty, N.K. Neog, S. Bujarbarua and R.K. Rout, "Magnetic probe measurements of current sheet dynamics in a coaxial plasma accelerator" Meas. Sci. Technol. 14 1769. (2003)
- [183] R.S. Rawat, M.P. Srivastava and S.R. Mohanty, "Study of Current Sheath Dynamics in Dense Plasma Focus in the Presence of Axial Magnetic Field using Laser Shadowgraphic Technique" IEEE Transactions on Plasma Science, 22, 967. (1994)
- [184] H. Krompholz, F. Ruhl, W. Schneider, K. Schonbach and G. Herziger, "A scaling law for plasma focus devices" Phys. Lett. 82A, 82. (1981)
- [185] H. Bruzzone, C. Moreno and H. Kelly, "Measurements of current sheets in plasmas with a finite-sized magnetic probe" Meas. Sci. and Tech., 2, 1195. (1991)
- [186] H. Herold, A. Juzykiewicz, M. Sadowski and H. Schmidt, "Experiment with Poseidon as a Plasma focus facility" Nucl. Fusion, 29 1255. (1989)
- [187] A.J. Toepfer, D.R. Smith and E.H. Beckner, "Ion Heating in the Dense Plasma Focus" Phys. Fluids 14, 52. (1971)
- [188] N.J. Peacock, M.G. Hobby and P.D. Morgan, "Thermal property of plasma in plasma focus" In 5th Int. Conf. on Plasma Phys. and Contr. Nucl. Fusion Res., IAEACN-28/D-3, Tokyo. (1972)
- [189] A. Jeffresy and T. Taniuti, In Magnetohydrodynamic Stability and Termonuclear Containment. (1966)
- [190] Y.H. Chen and S. Lee, "Coaxial plasma gun in mode 1 operation" Int. J. Elect., 35,341. (1973)

- [୧୧] H. Bruzzone, H. Kelly and C. Moreno, “The effect of transmission lines and switching action on the electrical signals in a powerful capacitive discharge”, IEEE Trans. On Plasma Sci., 18, 689. (1990)
- [୧୨] M.J. Bernstein, D.A. Meskan and H.L.L Paassen, “Space, Time, and Energy Distributions of Neutrons and X Rays from a Focused Plasma Discharge” Phys. Fluids, 12, 2193. (1969)
- [୧୩] H. Schmidt, “Formation of Different phases in plasma focus ”In Proc. 2Nd Latin American Workshop on Plasma Phys. and Contr. Thermonucl. Fusion, Medellin, vol. 12, p.1. (1987)
- [୧୪] T.Y. Tou, PhD Thesrs, Univ. Of Malaya, Malaysia, (1986)
- [୧୫] S. Lee, “Energy balance and the radius of electromagnetically pinched plasma columns” Plasma Phys., 25, 571.(1983)
- [୧୬] J.W. Mather, “Formation of a High-Density Deuterium Plasma Focus” Phys. Fluids, 8, 366. (1965)
- [୧୭] J.W. Shearer, “Contraction of Zpinches actuated by radiation losses”Phys. Fluids, 19, 1426. (1976)
- [୧୮] G.R. Neil and R.S. Post, “Observation of Overdense Infrared Scattering from a Post Pinch Plasma Focus” Plasma Phys., 23, 145. (1981)
- [୧୯] V. Raspa, F. Di Lorenzo, P. Knoblauch, A. Lazarte, A. Tartaglione, A. Clause and C. Moreno” Plasma focus based repetitive source of fusion neutrons and hard x-rays”, Rev 30 June 2007
- [୨୦] H. Bhuyan, S.R. Mohanty, N.K. Neog, S. Bujarbarua and R.K. Rout, “Magnetic probe measurements of current sheet dynamics in a coaxial plasma accelerator” Meas. Sci. Technol. 14 1769. (2003)
- [୨୧] P. Choi, C.S. Wong and H. Herold, “Laser and Particle Beams”, 7A, 763 (1989)
- [୨୨] B. Shan, “Comparative study of dynamics and X-ray emission of several Plasma Focus Devices”PhD. Thesis, NIE/NTU. (2000)
- [୨୩] K. Hirano, T. Yamamoto, K. Shimoda, Y. Tagaya, ”correlation between Time-Resolved Soft X-Ray Images and Interferometric Results in a Plasma Focus”, Rev June 18, Japanese Journal Of Applied Physics. (1985)

- [Δϕ] M. A. Mohammadi, S. Sobhanian, C.S. Wong, S. Lee, P. Lee And R. S. Rawat” The effect of anode shape on neon soft x-ray emissions and current sheath configuration in plasma focus device”, J. Phys. D: Appl. Phys .42(2009)
- [ΔΔ] L. Soto, J. Moreno, P Silva, G Sylvester, M Zambra, C. Pavez, V. Raspa, F. Castillo And W. Kies,” Research on Pinches driven by SPEED 2 Generator: Hard X-ray and Neutron Emission in Plasma Focus Configuration
- [Δϕ] R.L. Gullickson and R.H. Barlett, in "Advances in X-Ray Analysis", edited by W.L. Pickles, Vol. 18, p. 184, Plenum Press, New York, (1974)
- [Δγ] R.S. Rawat, P. Lee, T. White, Li. Ying and S. Lee, “Room temperature deposition of titanium carbide thin films using dense plasma focus device” Surface and Coatings Technology, 138, 159. (2001)
- [Δλ] S. Lee, P. Lee, G. Zhang, A. Serban, M. Liu,X. Liu, X. Feng, S.V. Springham, C.S. Selvam, V. Kudryashov and T.K. Wong, “Application of plasma focus as a source of high energy electron” Singap. J. Phys., 173, 276. (2003)
- [Δϑ] S. Lee, “Energy balance and the radius of electromagnetically pinched plasma columns” Plasma Phys., 25, 571. (1983)
- [ϕ·] S. Bing, “Plasma Dynamics and X-ray emission of the plasma focus” PhD. Thesis, NIE/NTU (2000).
- [ϕϑ] C.E. Moore, "Atomic Energy Levels", U.S. Bureau of Standards Cir. No.467. (1949)
- [ϕϕ] S. Lee, “An energy-consistent snow-plough model for pinch design” J.Phys.D: Appl. Phys., 16, 2463. (1983)

Abstract

The plasma focus device have ability to products compressing plasma to very high density ($\sim 10^{26}\text{m}^{-3}$) and high temperature ($\sim 1\text{KeV}$).pinches plasma with the conditions have ability to emission many of Soft X-Rays pulses in the extensively spectra.Soft X-Ray have many applications such as medicine and lithography for reason its pulses and have extensively spectra,for this reason lionize by the scientist.We effort in this thesis that with the Shahrood university plasma focus device (SHUPF) measurement the Soft X-Ray variation of argon gas in the different voltage and pressure with insulator that have cognate and different length.

In this process for guideline this thesis we use of below diagnostics for detection.1. Rogowski coil: for detections signals of current and derivative of current for knowledgement of pinches in the current sheath.2.Voltage prob: for detections variations of voltage.3.BPX-65 detector: for detections X-Ray signals out put from photodiode channels.

After the perform experiment in the same conditions we found that in the stable voltage with increasing the insulator length,the Soft X-Ray energy that emits from device is decrease.also for the special insulator length with the increasing the voltage the hieghest average pressure for have maximum Soft X-Ray energy is increase.with study on the graph we found that for all insulator in constant voltage with increasing the pressure,value of Soft X-Ray energy is increasing and in the special pressure it has maximum.after this pressure,with the increasing pressure,value of Soft X-Ray energy start to decreasing.

In the process of the performs experiments we saw multipinche.we measurement value of Soft X-Ray energy that emits from second pinch and we found that in the second pinch respect to first pinch,we have greater Soft X-Ray energy.

Key words: current sheath, photodiod, Soft X-Ray, Hard X-Ray, pinch, highest average pressure, two pinch.



University of Shahrood

Faculty of physics

Effect of height insulation on X-ray energy in plasma
focus device

Javad sharifzadeh

Supervisors:

Dr.M.Momeni

Dr.M.Mohammadi

September 2015