

سلامی



دانشگاه صنعتی شاهرود
دانشکده فیزیک

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد فیزیک

بررسی تاثیر ارتفاع عایق بر زمان تشکیل پلازما در ولتاژها و
فشارهای مختلف در دستگاه پلاسمای کانونی

زهرا خدابخشی

اساتید راهنما :

دکتر مهدی مومنی

دکتر محمدعلی محمدی دورباش

شهریور ۱۳۹۳

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده :

گروه :

پایان نامه کارشناسی ارشد خانم زهرا خدابخشی

تحت عنوان:

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

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

تقدیم بہ:

پیامبر رحمت و مہربانی

محمد مصطفیٰ (صلی اللہ علیہ وآلہ وسلم)

او کہ بابر جستگی بی نظیر و تعلیمات پر معنائیں توانست اندیشہ را با

عمل جمع آورد.

و تقدیم بہ:

پدر و مادر مہربانم

«شکرانه»

«سپاس خدایی را که سخوران در ستودن او بمانند و شمارگران شمردن نعمتهای او ندانند، و کوشندگان حق او را گزاردن توانند. خدایی که پای اندیشه تیرگام در راه شناسایی او لنگ است، و سرِ فکرش ژرف رو به دریای معرفش برسنگ. گواهی می‌دهم که خدا یکتاست، انبازی ندارد و بی‌همتاست. گواهی از روی اعتقاد و ایمان، بی‌آمیغ برآمده از امتحان. گواهی می‌دهم که محمد (ص) بنده او و پیامبر اوست. او را بفرستاد باین آشکار، و نشانه‌هایی پدیدار، و قرآنی بنیفته در علم پروردگار. که نوری است رحمان، و چراغی است فروزان، تا گردودی از دلها بزداید، و با حجت و دلیل ملزم فرماید. پاک خدا، چه بزرگ است آنچه می‌بینم از قدرت تو.» (نخ البلاغ)

سپاس می‌گویم خدا را برای نعمت وجود پدر و مادری دلسوز و فداکار که همواره در راه کسب علم و دانش در کنارم بوده‌اند.

از اساتید گران قدر و بزرگوارم جناب آقایان دکتر مهدی مومنی و دکتر محمد علی محمدی برای راهنمایی‌های عالمانه و جسارتی که در انجام کار به من دادند، شکر و قدردانی می‌کنم.

صمیمانه از زحمات و راهنمایی‌های دلسوزانه و از سرانخلاص استاد فرزانه ام جناب آقای دکتر محمد امین بصام سپاسگزارم.

از اساتید بزرگوار سرکار خانم مهندس بهجت قاسمی و جناب آقای دکتر غلامرضا اطاعتی برای کمک‌های بی‌دینشان کمال شکر را دارم.

از برادر عزیزم که در انجام این پژوهش بسیار مریاری نمود و خواهران بزرگوارم صمیمانه شکر و سپاسگزاری می‌نمایم.

از تمامی عزیزانی که مراد این راه‌یاری نمودند بویژه جناب آقای مهندس شهناو سرکار خانم مهندس شهبازی شکر و قدردانی می‌کنم.

تعهد نامه

اینجانب زهرا خدابخشی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته فیزیک اتمی مولکولی (پلاسما) دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی تاثیر ارتفاع عایق بر زمان تشکیل پلاسما در ولتاژها و فشارهای مختلف در دستگاه پلاسمای کانونی تحت راهنمایی دکتر مومنی و دکتر 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

با توجه به محدود بودن منابع انرژی، یکی از نیازهای بشر یافتن منابع انرژی جدید است. یکی از این منابع انرژی حاصله از واکنش‌های همجوشی هسته‌ای است. در راستای تامین انرژی پاک از فرآیند همجوشی هسته‌ای، دستگاه پلاسمای کانونی برای اولین بار در سال ۱۹۶۰ و به طور مستقل در دو کشور آمریکا و اتحاد جماهیر شوروی سابق در دو مدل مدر و فیلیپوف ساخته شد. تفاوت عمده مدل‌های مدر و فیلیپوف از لحاظ نسبت شعاع آند به طول آن است.

با استفاده از دستگاه پلاسمای کانونی می‌توان پلاسمای پالسی با طول عمر در حدود 100 nm و با دمای بالا در حدود 1 keV و چگالی بالا 10^{25} m^{-3} تولید کرد. دستگاه پلاسمای کانونی بعنوان منبع تولید اشعه ایکس پالسی، یونهای پرانرژی، الکترونهای نسبیته و همچنین نوترونهای پرانرژی (در صورت استفاده از گاز دوتریوم) بشمار می‌رود. دستگاه پلاسمای کانونی دارای کاربردهای فراوانی از قبیل استفاده در صنعت پزشکی، کاشت یونی، تولید رادیو ایزوتوپ (در صورت استفاده از گاز دوتریوم)، عیب‌یابی اجسام سریع و لیتوگرافی می‌باشد. پارامترهای مختلفی در بهینه کردن دستگاه پلاسمای کانونی دخالت دارند. از این پارامترها می‌توان به پارامترهای هندسی دستگاه یعنی آند، کاتد و همچنین عایق بکار گرفته شده در دستگاه اشاره کرد. دیگر پارامترها که تغییرات آنها آسانتر است؛ فشار گاز کاری، نوع گاز و تغییرات ولتاژ کاری می‌باشند. مطالعه این پارامترها از اهمیت زیادی در بهینه کردن دستگاه دارد. در این پایان‌نامه با توجه به نقش پر اهمیت پارامترهای نامبرده بر عملکرد دستگاه پلاسمای کانونی، تاثیر ارتفاع عایق بر زمان تشکیل پلاسما در ولتاژها و فشارهای مختلف بررسی شده است.

کلمات کلیدی: دستگاه پلاسمای کانونی، عایق، پینچ، جریان تخلیه، فشار بهینه، لایه جریان، ارتفاع

عایق

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

مطالعه تاثیر فشار و ولتاژ بر زمان پینچ در دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود (SHUPF). کنفرانس مهندسی و فیزیک پلاسما. اردیبهشت ماه ۱۳۹۳، بابلسر- ایران

مطالعه پلاسمای تولیدی در دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود (SHUPF) با عکسبرداری دیجیتالی تک لنز بازتابی. کنفرانس مهندسی و فیزیک پلاسما. اردیبهشت ماه ۱۳۹۳، بابلسر- ایران

بررسی اثر طول عایق بر زمان تشکیل پلاسما در دستگاه پلاسمای کانونی. کنفرانس فیزیک ایران. شهریور ماه ۱۳۹۳، زاهدان-ایران

فهرست مطالب

۱	فصل اول: پلاسما و معرفی دستگاه پلاسمای کانونی
۱-۱	مقدمه
۲-۱	معرفی پلاسما و ویژگیهای آن
۳-۱	پارامترهای پلاسما
۱-۳-۱	دما
۲-۳-۱	حفاظت دمای
۴-۱	مشخصه پلاسما
۱-۴-۱	معیارهای پلاسما
۵-۱	محصولسازی پلاسما
۱-۵-۱	معیار لاوسون
۲-۵-۱	روشهای محصولسازی
۶-۱	دستگاه پلاسمای کانونی
۱-۶-۱	عملکرد دستگاه پلاسمای کانونی
۲-۶-۱	دینامیک دستگاه پلاسمای کانونی نوع مدر
۳-۶-۱	ناپایداریها در پلاسمای کانونی
۴-۶-۱	کاربردهای دستگاه پلاسمای کانونی
۲۱	فصل دوم: دینامیک دستگاه پلاسمای کانونی
۱-۲	مقدمه
۲-۲	مدلسازی رفتار دینامیکی پلاسمای کانونی
۲-۲-۱	فاز محوری
۲-۲-۲	فاز شعاعی
۲-۲-۳	فاز حرکت شعاعی روبه داخل
۲-۲-۴	فاز موج ضربه انعکاس یافته

۲۷	.....	۲-۲-۵	فاز تراکم آرام
۲۷	.....	۲-۳	مشخصه‌های ترمودینامیکی ستون پلاسما
۲۹	.....	۴-۲	فرآیند انتقال انرژی
۲۹	.....	۱-۴-۲	مقاومت ظاهری: انرژی ذخیره شده در LP در اثر تغییر جریان
۳۱	.....	۵-۲	پارامتر رانش
۳۱	.....	۲-۶	خصوصیات الکتریکی و معادلات مدار معادل دستگاه پلاسمای کانونی
۳۲	.....	۷-۲	اثر تنگش
۳۴	.....	۸-۲	پارامترهای تاثیرگذار بر تنگش
۳۵	.....	۱-۸-۲	خازن
۳۵	.....	۲-۸-۲	اثر ولتاژ
۳۶	.....	۳-۸-۲	مشخصات گاز
۳۹	.....	۴-۸-۲	مشخصات هندسی دستگاه
۴۳	.....	۵-۸-۲	کاتد
۴۳	.....	۶-۸-۲	عایق
۴۷	.....		فصل سوم: چیدمان آزمایش و اندازه‌گیری
۵۰	.....	۱-۳	مقدمه
۵۰	.....	۲-۳	دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود (SHUPF)
۵۱	.....	۱-۲-۳	ساختار کلی دستگاه پلاسمای کانونی (SHUPF)
۷۰	.....	۳-۳	عایقها
۷۱	.....	۱-۳-۳	تعویض عایق
۷۱	.....	۴-۳	پنجره دید
۷۳	.....	۵-۳	فیلتر
۷۴	.....	۶-۳	روش انجام آزمایشها
۷۱	.....		فصل چهارم: تحلیل و نتایج
۷۷	.....	۱-۴	مقدمه

۷۷	آزمایشات اولیه در جهت بررسی عملکرد دستگاه	۲-۴
۸۰	بررسی اثر ولتاژ، فشار و طول عایق بر زمان پینچ	۳-۴
۸۰	عایق شماره ۱	۱-۳-۴
۸۲	عایق شماره ۲	۲-۳-۴
۸۳	عایق شماره ۳	۳-۳-۴
۸۴	عایق شماره ۴	۴-۳-۴
۸۷	مقایسه زمان کانونی شدن پلازما در عایقهایی با طول متفاوت	۴-۴
۸۹	تصویربرداری از ناحیه پینچ	۵-۴
۸۹	عایق شماره ۱	۱-۵-۴
۹۰	عایق شماره ۲	۲-۵-۴
۹۴	عایق شماره ۳	۳-۵-۴
۹۵	عایق شماره ۴	۴-۵-۴
۹۶	نتیجه‌گیری	۴-۶
۹۲	منابع	

فهرست اشکال

- جدول (۱-۱): تقسیم‌بندی دستگاه‌های مختلف گداخت ۷
- شکل (۲-۱): نمایی از انواع دستگاه پلاسمای کانونی ۸
- شکل ۳-۱: ناپایداری ریلی- تیلور ۱۴
- شکل ۴-۱: محیط شبیه‌سازی شده از ناپایداری ریلی تیلور ۱۵
- شکل ۵-۱: ناپایداری تاب‌ی و سوسیسی ۱۶
- شکل ۶-۱: ناپایداری تاب‌ی ۱۷
- شکل ۷-۱: (الف): تصویر رادیوگرافی از یک مدار مجتمع [۳۲] (ب): تصویر رادیوگرافی از ماهی [۳۳] ۱۹
- شکل ۱-۲: (a) دینامیک لایه جریان در یک دستگاه پلاسمای کانونی (b) سیگنال ولتاژ و جریان متناظر با فازهای مختلف تخلیه ۲۳
- شکل ۲-۲: فازهای دینامیکی پلاسمای کانونی [۴۱-۴۲] ۲۴
- شکل ۳-۲: خلاصه‌ای از انتقال انرژی در پلاسمای کانونی ۲۹
- شکل ۴-۲: مدار الکتریکی دستگاه پلاسمای کانونی ۳۱
- شکل ۵-۲: حرکت تنگشی ستون پلاسمای استوانه‌ای ۳۱
- شکل ۶-۲: اثر ولتاژ بر جریان تخلیه در دستگاه NX2 [۴۵] ۳۵
- شکل ۷-۲: اثر فشار بر جریان تخلیه در دستگاه NX2 ۳۶
- شکل ۸-۲: (الف) تغییرات زمان پینچ در اثر فشار (ب) تغییرات زمان پینچ در اثر ولتاژ ۳۷
- شکل ۹-۲: سیگنال مشتق جریان برای گاز نئون و دوتریم در دستگاه NX2 در ولتاژ $11/5 \text{ K}$ ۳۸
- شکل ۱۰-۲: ساختارهای مختلف سر آند ۴۰
- شکل ۱۱-۲: لایه جریان در شکل‌های متفاوت سر آند ۴۱
- شکل ۱۲-۲: پدیده چندپینچی [۴۸] ۴۱
- شکل ۱۳-۲: تغییرات انحنای لایه جریان بر اثر تغییرات طول عایق [۵۶] ۴۴
- شکل ۱۴-۲: دمای الکترونی جریان پایین برای طول‌های متفاوت عایق [۵۷] ۴۴

- شکل ۳-۱: بلوک دیاگرام دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود..... ۴۹
- شکل ۳-۲: محفظه خلاء..... ۵۰
- شکل ۳-۳: نمایی از دستگاه پلاسمای کانونی (*SHUPF*)..... ۵۱
- شکل ۳-۴: آند و عایق اطراف آن..... ۵۱
- شکل ۳-۵: کاتد دستگاه پلاسمای کانونی..... ۵۲
- شکل ۳-۶: پمپ خلاء..... ۵۳
- شکل ۳-۷: اسپارک گپ (گاف جرقه)..... ۵۴
- شکل ۳-۸: ساختار اسپارک گپ نوع تریگاترون..... ۵۵
- شکل ۳-۹: سیستم اتصال به زمین..... ۵۶
- شکل ۳-۱۰: طیف الکترومغناطیسی..... ۵۷
- شکل ۳-۱۱: تصویر برداری از پلاسمای با دوربین آنالوگ..... ۵۸
- شکل ۳-۱۲: حسگر تصویر نوع *CMOS* (سمت راست) و *CCD* (سمت چپ)..... ۵۹
- شکل ۳-۱۳: چیدمان عکسبرداری از پلاسمای در دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود (*SHUPF*) ، (۱) کاتد، (۲) عایق، (۳) پنجره دید (پلکسی)، (۴) آند..... ۶۰
- شکل ۳-۱۴: ستون پلاسمای در ولتاژ ۹ کیلوولت و فشار ۱/۶ تور..... ۶۰
- شکل ۳-۱۵: پیچه روگوفسکی..... ۶۲
- شکل ۳-۱۶: مدار معادل پیچه روگوفسکی..... ۶۳
- شکل ۳-۱۷: سیگنال مشتق جریان..... ۶۳
- شکل ۳-۱۸: پروب ولتاژ..... ۶۴
- شکل ۳-۱۹: سیگنال ولتاژ..... ۶۵
- شکل ۳-۲۰: نمونه سیگنال مربوط به جریان و مشتق جریان..... ۶۶
- شکل ۳-۲۱: عایق‌هایی با طول متفاوت..... ۶۷
- شکل ۳-۲۲: نمای روبه‌رو از پنجره پلکسی گلاس..... ۶۸

- شکل ۳-۲۳: میزان تراگسیل انواع پلکسی گلاس در ناحیه طیفی مرئی و فرابنفش ۶۸
- شکل ۳-۲۴: فیلترهای ND مختلف ۶۹
- شکل ۳-۲۵: تصویربرداری از ستون پلازما با فیلترهای مختلف [۶۱] ۶۹
- شکل ۴-۱: نمونه‌های از سیگنال ولتاژ ۷۳
- شکل ۴-۲: تغییرات زمان پینچ بر حسب ولتاژ در عایق با طول 4cm ۷۴
- شکل ۴-۳: تغییرات زمان پینچ در اثر تغییرات فشار در عایق شماره ۱ ۷۵
- شکل ۴-۴: تغییرات زمان پینچ در اثر تغییرات ولتاژ در عایق شماره ۱ ۷۶
- شکل ۴-۵: تغییرات زمان پینچ در اثر تغییرات فشار در عایق شماره ۲ به طول ۴ ۷۷
- شکل ۴-۶: تغییرات زمان پینچ در اثر تغییرات ولتاژ در عایق شماره ۲ ۷۷
- شکل ۴-۷: تغییرات زمان پینچ در اثر تغییرات فشار در عایق شماره ۳ ۷۸
- شکل ۴-۸: تغییرات زمان پینچ در اثر تغییرات ولتاژ در عایق شماره ۳ ۷۸
- شکل ۴-۹: تغییرات زمان پینچ بر اثر فشار در ولتاژ ۹ کیلوولت ۷۹
- شکل ۴-۱۰: تغییرات زمان پینچ در اثر ولتاژ ۸۰
- شکل ۴-۱۱: تغییرات زمان پینچ در اثر فشار ۸۰
- شکل ۴-۱۲: تغییرات زمان کانونی شدن بر حسب فشار در ولتاژ ۷ کیلوولت ۸۲
- شکل ۴-۱۳: تغییرات زمان کانونی شدن بر حسب فشار در ولتاژ ۸ کیلوولت ۸۲
- شکل ۴-۱۴: تغییرات زمان کانونی شدن بر حسب فشار در ولتاژ ۹ کیلوولت ۸۳
- شکل ۴-۱۵: سیگنال جریان پدیده دوپینچی در ولتاژ ۱۳ کیلوولت و فشار ۲ تور [۶۲] ۸۴
- شکل ۴-۱۶: تصاویر چندپینچی و سیگنال مشتق جریان در فشار 1 torr ، ولتاژ 9 KV و عایق $3/5\text{cm}$ ۸۵
- شکل ۴-۱۷: تصاویر ستون پلازما در فشارهای مختلف در ولتاژ ۹ کیلوولت ۸۶
- شکل ۴-۱۸: منحنی تغییرات پهنا و ارتفاع پلازما در فشارهای مختلف در ولتاژ ۹ کیلوولت ۸۷
- شکل ۴-۱۹: تشکیل دوپینچی در فشار 1 torr و ولتاژ 9 KV ۸۸
- شکل ۴-۲۰: نمونه سیگنال مشتق جریان در پدیده چندپینچی در فشار ۱ تور ۸۸
- شکل ۴-۲۱: تصاویر پلازما تشکیل یافته در عایق بطول $4/5$ سانتیمتر ۸۹

شکل ۴-۲۲: تصاویر دوپینچی در عایق به طول ۵ سانتیمتر ۹۰

فصل اول

پلازما و معرفی دستگاه پلازما کانونی

۱ فصل اول: پلاسما و معرفی دستگاه پلاسمای کانونی

۱-۱ مقدمه

امروزه تامین انرژی یک مسئله جهانی است بطوریکه پژوهشگران به دنبال برسی منابع جدید انرژی هستند. یکی از این منابع انرژی استفاده از انرژی حاصله از فرایند گداخت هسته‌ای است. به علت پاک بودن انرژی تولید شده از فرایند همجوشی، تحقیقات بسیاری در سرتاسر دنیا بر روی راکتورهای گداخت انجام گرفته است که یکی از نتایج آن طراحی و ساخت دستگاه پلاسمای کانونی می‌باشد. دستگاه پلاسمای کانونی به دلیل سادگی ساختار، ارزانی و قابلیت تولید پلاسمای پالسی با دمای بالا ($1-2 \text{ keV}$)، چگال (10^{20} cm^{-3}) و نیمه عمر کوتاه ($200-50 \text{ ns}$) بسیار پر کاربرد در آزمایشگاه‌های تحقیقاتی است [۱]. همچنین انواع تابش‌های شکل گرفته در دستگاه پلاسمای کانونی، آن را بعنوان یک مولد قوی پالسی معرفی کرده است [۲]. درک عمیق از دینامیک پلاسمای ایجاد شده، نقش اساسی در بهینه کردن پلاسما برای کاربردهای خاص دارد.

در فصل اول این پایان‌نامه به معرفی پلاسما و دستگاه پلاسمای کانونی پرداخته شده است. در فصل دوم دینامیک دستگاه پلاسمای کانونی، پدیده تنگش و مهمترین عوامل موثر بر تنگش شرح داده شده است. فصل سوم شامل چیدمان آزمایش، روش انجام کار، اجزای دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود (*SHUPF*) و ابزارهای اندازه‌گیری در انجام آزمایش‌ها است و در فصل چهارم این پایان‌نامه به نتایج حاصله از آزمایشات و اندازه‌گیری‌ها در دستگاه *SHUPF* و پیشنهاداتی برای کارهای آینده پرداخته شده است.

۲-۱ معرفی پلازما و ویژگی‌های آن

پلازما گاز شبه خنثایی از ذرات باردار و خنثی است که رفتار جمعی از خود نشان می‌دهد. پلازما "خنثی" است یعنی آن اندازه خنثی است که بتوان $n \approx n_e \approx n_i$ گرفت، نه آن قدر خنثی که تمام نیروهای الکترومغناطیسی مورد توجه حذف شوند، n چگالی پلازما، n_e چگالی الکترون‌ها و n_i چگالی یون‌ها می‌باشد. نیروهای وارد بر یک مولکول، مثلاً مولکول هوا را در نظر بگیرید، چون مولکول خنثی است، هیچ نیروی الکترومغناطیسی خالصی بر آن وارد نمی‌شود و نیروی ثقل قابل چشمپوشی است. این مولکول بدون مزاحمت حرکت می‌کند تا به مولکول دیگر برخورد کند، همین برخوردها هستند که حرکت ذره را تعیین میکنند. پلازما دارای ذرات باردار است که با حرکتشان می‌توانند تمرکزهای موضعی با بارهای مثبت یا منفی ایجاد کنند که موجب پیدایش میدان‌های الکتریکی می‌شوند. با حرکت بارها، جریان و در نتیجه میدان‌های مغناطیسی بوجود می‌آیند. این میدان‌ها بر حرکت ذرات باردار دیگر که دورتر قرار گرفته‌اند اثر می‌گذارد.

اجزاء پلازما حتی در فواصل دور نیرویی بر یکدیگر وارد می‌کنند. همین نیروی کولنی بلندبرد است که برای پلازما مجموعه بزرگی از حرکت‌های ممکن را فراهم می‌کند و حوزه مطالعه‌ای را که فیزیک پلازما نامیده شده است غنی می‌سازد. جالبترین نتایج به پلاسمای به اصطلاح "غیربرخوردی"^۱ مربوط می‌شوند، که در آن نیروهای الکترومغناطیسی بلندبرد به قدری از نیروهای مربوط به برخوردهای موضعی معمولی بزرگترند که می‌توان از همه این نیروهای برخوردی صرف‌نظر کرد.

¹ Collisionless

منظور از "رفتار جمعی" حرکت‌هایی است که نه تنها به شرایط موضعی بلکه به حالت پلاسما در نواحی دور بستگی دارند. پلاسما به علت رفتار جمعی، گرایشی به پیروی از تاثیرات خارجی ندارد، و اغلب طوری رفتار می‌کند که گویی اختیارش با خودش است.

۳-۱ پارامترهای پلاسما

۱-۳-۱ دما

در فیزیک پلاسما معمولاً دما را بر حسب واحدهای انرژی بیان می‌کنند. برای مشخص کردن دما از انرژی مربوط به Kt استفاده می‌کنند که در آن داریم.

$$(۱-۱)$$

$$KT = 1eV = 1.6 \times 10^{-19} J$$

$$(۲-۱)$$

$$1eV = 11600^\circ k$$

منظور از یک پلاسمای $۲eV$ پلاسمایی است که برای آن $KT = 2eV$ می‌باشد.

جالب است که پلاسما در یک زمان چندین دما داشته باشد. اغلب اتفاق می‌افتد که یون‌ها و الکترون‌ها دارای توزیع‌های ماکسولی جداگانه‌ای با دماهای مختلف T_e و T_i هستند. این وضعیت به آن دلیل پیش می‌آید که آهنگ برخورد بین خود یون‌ها یا خود الکترون‌ها بیشتر از آهنگ برخورد بین یک الکترون و یک یون است.

۲-۳-۱ حفاظ دبای

یکی از مشخصات اساسی رفتار پلاسما توانایی آن ایجاد حفاظ در مقابل پتانسیل‌های الکتریکی است که به آن اعمال می‌شود که این شرط با استفاده از رابطه زیر نشان داده می‌شود.

(۳-۱)

$$\lambda_D = \left(\frac{\epsilon_0 K T_e}{n e^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

که در آن λ_D طول دمای نامیده می شود و اندازه‌های از فاصله حفاظ را می‌دهد. اگر ابعاد یک دستگاه را L بنامیم ملاک پلاسما بودن یک گاز یونیده این است که به قدر کافی چگال باشد که λ_D خیلی کوچکتر از L شود.

۴-۱ مشخصه پلاسما

حفاظ دمای فقط وقتی معتبر است که ذرات در ابر بار به تعداد کافی وجود داشته باشند. اگر تعداد ذرات را n_d بنامیم باید شرط $n_d \gg 1$ برقرار باشد [۳].

۱-۴-۱ معیارهای پلاسما

سه شرط مشخص کننده پلاسما عبارتند از :

$$-1 \quad \lambda_D \ll 1$$

$$-2 \quad n_d \gg 1$$

$$-3 \quad \omega \tau > 1$$

دو شرط اول را در قسمت‌های قبل به آن اشاره کردیم. شرط سوم مربوط به برخوردهاست. برای مثال، گاز یونیده ضعیف در خروجی یک جت مشخصات پلاسما را ندارد زیرا ذرات باردار آن قدر با اتم‌های خنثی برخورد می‌کنند که حرکت آن‌ها توسط نیروهای هیدرودینامیک معمولی تعیین می‌شود نه توسط نیروهای الکترومغناطیسی. اگر ω بسامد نوعی نوسانات پلاسما و τ زمان متوسط بین برخوردها با اتم‌های خنثی باشد، برای آنکه گاز مانند پلاسما، و نه یک گاز خنثی رفتار کند لازم است که $\omega \tau > 1$ باشد [۳].

۱-۵-۱ محصورسازی پلاسما

۱-۵-۱-۱ معیار لاوسون^۲

شرط لازم برای تولید انرژی از واکنش‌های گداخت در یک راکتور، گرمایش پلاسما تا دمای مناسب (حدود 10 keV یا بیش از 100 میلیون درجه کلوین) و محصورسازی آن به مدت کافی با دما و چگالی بالاست که به معیار لاوسون معروف است و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$N\tau > 10^{20} \frac{s}{m^3} \quad (4-1)$$

در معیار لاوسون n چگالی پلاسما و τ مدت زمان محصورسازی است. از آنجایی که در چنین دماهای بالایی محصورسازی توسط دیواره‌های مادی امکان‌پذیر نمی‌باشد بکارگیری دیگر روش‌های محصورسازی عملی است.

۱-۵-۱-۲ روش‌های محصورسازی

اولین هدف عملی در محصورسازی، افزایش دمای پلاسما و دومین هدف آن است که پلاسما با دمای بالا در فضای محدودی محصور شود. دو روش در محصورسازی پلاسما استفاده می‌شوند که عبارتند از:

الف) محصورسازی مغناطیسی (MCF^۳)

ب) محصورسازی لختی (ICF^۴)

اساس محصورسازی مغناطیسی، اعمال میدان مغناطیسی جهت حرکت چرخشی ذرات باردار حول خطوط مغناطیسی و ایجاد فضاهایی برای به دام انداختن ذرات باردار پایه‌ریزی شده است. در محصورسازی لختی

² Lawson Criterion

³ Magnetic Confinement Fusion

⁴ Inertial Confinement Fusion

بدون اعمال میدان مغناطیسی، پلازما را از طریق یک موج ضربه قوی (Shock Wave) و یا امواج ضربه‌ی پی‌درپی، در فضایی کروی داغ و متراکم می‌کنند. جدول (۱-۱) تقسیم‌بندی دستگاه‌های مختلف گداخت بر اساس روش‌های محصورسازی را نشان می‌دهد.

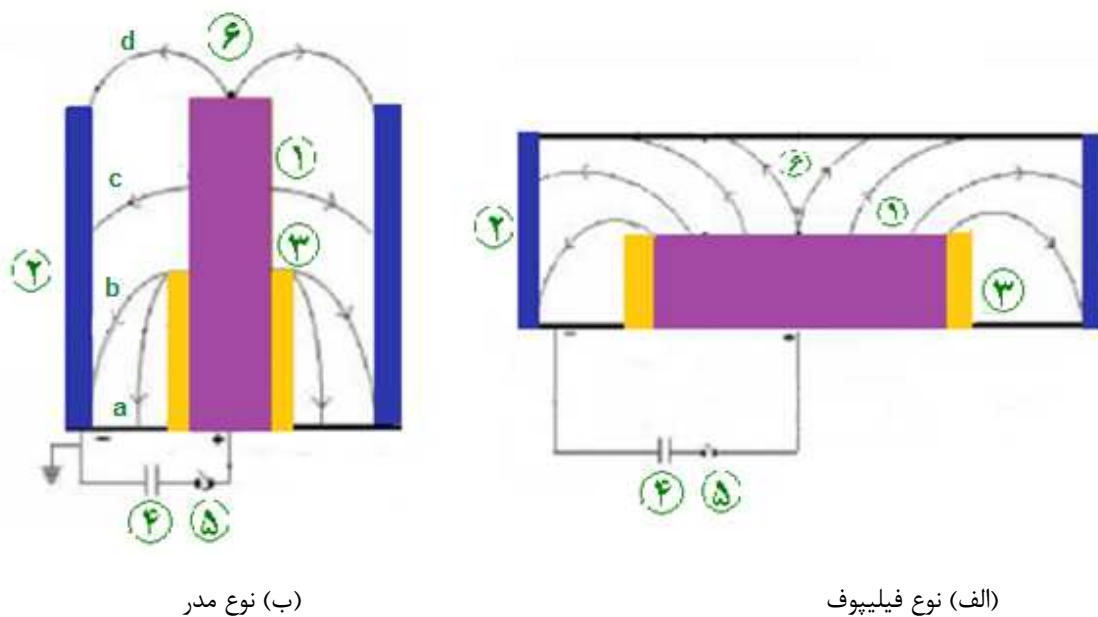
جدول (۱-۱): تقسیم‌بندی دستگاه‌های مختلف گداخت

روش محصورسازی	آرایش میدان مغناطیسی	دستگاه	نوع عملکرد
محصورسازی مغناطیسی	چنبره‌ای	توکامک	شبه پیوسته
		θ پینچ	پالسی
		استلراتور	پیوسته
		هلیترون	پیوسته
محصورسازی مغناطیسی	انتهای باز	آینه‌ای	پالسی
		z پینچ	پالسی
		پلاسمای کانونی	پالسی
محصورسازی لختی	ندارد	لیزر	پالسی
		پرتو الکترون نسبیتی	پالسی
		پرتو یون سنگین	پالسی

۶-۱ دستگاه پلاسمای کانونی

در راستای تامین انرژی از فرآیند گداخت هسته‌ای دستگاه پلاسمای کانونی^۵ در اوایل دهه ۱۹۶۰ بطور جداگانه توسط مدر^۶ [۴] در ایالات متحده آمریکا و فیلیپوف^۷ [۵] در شوروی اختراع شد. این دو دستگاه کارکرد مشابهی دارند اما از نظر مشخصات هندسی با یکدیگر متفاوتند. اختلاف اساسی این دو مدل در ابعاد الکترودها و نسبت قطر به طول الکتروود داخلی (معمولا آند) است که این نسبت برای نوع فیلیپوف بزرگتر از ۱ با قطر الکتروود

داخلی ۲۰۰-۵۰ سانتیمتر و در نوع مدر این نسبت کوچکتر از ۱ با قطر الکتروود داخلی ۲۲-۲ سانتیمتر است. در شکل (۲-۱) نمایی از این دو مدل نشان داده شده است.



شکل (۲-۱): نمایی از انواع دستگاه پلاسمای کانونی
 ۱- آند، ۲- کاتد، ۳- عایق ۴- خازن، ۵- تریگر، ۶- محل تنگش پلاسم

⁵ Plasma Focus
⁶ Mather
⁷ Filippov

۱-۶-۱ عملکرد دستگاه پلاسمای کانونی

دستگاه پلاسمای کانونی از دو الکترودهم محور تشکیل شده است که یک عایق آن‌ها را از یکدیگر جدا می‌کند. الکتروده داخلی معمولاً آند و الکتروده خارجی کاتد است. آند می‌تواند به شکل یک استوانه توپری و یا یک تیوپ استوانه‌ای توخالی ساخته شود. کاتد شامل ۶ تا ۲۴ عدد میله مسی است که اطراف آند قرار گرفته است. عایق از جنس پیرکس، آلومینیوم و یا سرامیک ساخته می‌شود.

اساس کار یک دستگاه پلاسمای کانونی ساده است. انرژی ذخیره شده در بانک خازنی توسط یک گاف جرقه (کلیدی با قابلیت انتقال جریان و ولتاژ بالا) به الکتروده مرکزی انتقال می‌یابد. تخلیه الکتریکی ابتدا در روی سطح عایق انجام می‌شود سپس به صورت لایه جریان (شکل ۱-۱ قسمت a) از سطح عایق جدا می‌شود. در اثر تغییرات سریع میدان مغناطیسی موج ضربه تشکیل شده و به سمت بالا حرکت می‌کند و در مسیر حرکت خود مولکول‌های گاز را یونیزه می‌کند. لایه جریان ایجاد شده در اطراف عایق به علت وجود نیروی لورنتز از موقعیت a در شکل (۱-۱) به موقعیت b و c حرکت می‌کند. به موقعیت a فاز شکست و حرکت از موقعیت a به b و c فاز محوری نامیده می‌شود. وقتی لایه جریان به انتهای الکتروده مرکزی (آند) رسید (موقعیت c)، در اثر داشتن تکانه به مرحله فاز شعاعی یعنی بالای سطح آند می‌رسد. حرکت لایه جریان در فاز شعاعی (موقعیت d) نیز در اثر نیروی لورنتس است. در پایان فاز شعاعی پلاسمای پرچگال با دمای تقریباً 1keV تشکیل می‌شود. مدت زمانی که بین لحظه شکست تا لحظه تنگش طول می‌کشد حدود چند میکروثانیه است. در مدت طول عمر پلازما اشعه‌های ایکس نرم و سخت، نوترون‌های پرنرژی، الکترون‌های نسبیتی و یون‌های پرنرژی تولید می‌شود [۶-۱۰]. ستون پلاسمای

تنگیده پس از زمان بسیار کوتاهی در اثر ناپایداری‌های ریز و سوسیسی^۸ متلاشی می‌شود. به بیان دیگر پلاسما خاموش می‌شود.

۱-۶-۲ دینامیک دستگاه پلاسمای کانونی نوع مدر

دینامیک دستگاه پلاسمای کانونی را می‌توان به سه فاز مجزا تقسیم کرد [۱۱] که عبارتند از :

(۱) فاز شکست

(۲) فاز شتاب‌گیری محوری

(۳) فاز شعاعی

۱-۶-۲-۱ فاز شکست^۹

با اعمال ولتاژ زیاد میان الکترودها در محفظه خلاء که با گاز کاری پر شده است شکست الکتریکی بر روی عایق اتفاق می‌افتد و جریان الکتریکی در گاز تولید می‌شود که به شرایط اولیه گاز [۱۲]، پارامترهای الکترودها [۱۳]، قطبش الکترودها و عایق [۱۴] بستگی دارد. لایه جریان تشکیل یافته در امتداد عایق بالا آمده و هنگامیکه لایه جریان به انتهای عایق می‌رسد الکترودها را به هم وصل می‌کند. چگونگی تشکیل لایه جریان به این ترتیب است که پس از اعمال اختلاف پتانسیل میان الکترودها با تاخیر زمانی چند ده نانو ثانیه مرحله شکست بر روی عایق مشاهده شده است [۱۵]. در این مدت الکترون‌هایی بر اثر نشر میدانی از لبه فلزات و همچنین یونیزاسیون گاز اطراف ایجاد می‌شود. این الکترون‌ها در راستای خطوط میدان الکتریکی شتاب گرفته و به سمت سطح عایق یا الکتروود داخلی یا خارجی با توجه به پلاریته حرکت می‌کنند. در پلاسمای کانونی معمولاً پلاریته الکتروود داخلی مثبت

⁸ Susage Instability

⁹ The Breakdown Phase

است در نتیجه الکترون‌ها به سطح عایق می‌چسبند و سطح عایق را باردار می‌کند. نیروی لورنتز لایه ایجاد شده را به روش تنگش معکوس از عایق جدا می‌کند. پس از مدت زمان ۵۰-۵۰۰ نانوثانیه رسانش لایه ایجاد شده به اندازه کافی زیاد می‌شود که تخلیه الکتریکی به لایه‌های جریان تبدیل می‌شود که در حقیقت به یک ساختار دو لایه تبدیل می‌شود که در جلوی آن یونیزاسیون و در انتهای آن پیستون مغناطیسی قرار دارد.

۱-۶-۲-۲ فاز حرکت محوری^{۱۰}

در این فاز لایه جریان در اثر نیروی مغناطیسی به سمت انتهای باز الکترودها حرکت می‌کند. لایه جریان در انتهای مرحله فاز شکست شکل می‌گیرد و شتابی که نیروی لورنتس به آن می‌دهد آن را به سمت انتهای بالای آند می‌راند. قسمت شعاعی نیروی لورنتس لایه جریان را به سمت الکترودها بیرونی حرکت می‌دهد. به دلیل تابعیت عکس فاصله چگالی جریان و میدان مغناطیسی B_θ نیروی لورنتس در نزدیک آند قویتر است. این عامل باعث می‌شود که سرعت لایه جریان در نزدیکی سطح الکترودها مرکزی بیشتر شود. در نتیجه این اختلاف سرعت سبب می‌شود لایه جریان به شکل سهمی درآید. مدت زمان این فاز در حدود ۱ تا ۴ میکروثانیه است [۱۶].

۱-۶-۲-۳ فاز شعاعی^{۱۱}

در انتهای فاز محوری لایه جریان انتهای آند را جاروب می‌کند. در نتیجه به علت نیروی لورنتس رو به داخل (محور الکترودها) باعث تشکیل پلاسمای چگال در مدت ۵۰-۲۰۰ نانوثانیه وابسته به مشخصات دستگاه پلاسمای کانونی می‌شود. فاز شعاعی که باعث تشکیل پلاسمایی با چگالی بالا می‌شود بنا به علت

¹⁰ Axial Phase Motion

¹¹ Radial phase

مشخصه‌هایی از قبیل گسیل اشعه ایکس، ذرات باردار پر انرژی و گسیل نوترون‌های پرانرژی (در صورت استفاده از گاز دوتریوم) از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است.

در فاز شعاعی با تغییرات سریع در اندوکتانس، میدان الکتریکی قوی در ستون پلازما تشکیل می‌شود چون جریان تخلیه در این مرحله ثابت است در نتیجه میدان الکتریکی از رابطه زیر بدست می‌آید.

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

در رابطه فوق I جریان تخلیه و $\frac{dL}{dT}$ میزان تغییرات زمانی اندوکتانس است.

فاز شعاعی به چهار زیر فاز تقسیم می‌شود [۱۷]: ۱. فاز تراکم ۲. فاز شبه آرام ۳. فاز ناپایداری ۴. فاز واپاشی

۱-۶-۲-۳-أ فاز تراکم^{۱۲}

فاز تراکم از فروریزش ناگهانی با تقارن شبه‌استوانه‌ای (قیفی شکل) به سمت محور الکترودها به علت تاثیر نیروی لورنتز آغاز می‌شود. در این فاز لایه جریان به طور شعاعی آند را جاروب کرده و با تقارن سمتی درهم می‌رود و به کمپنه شعاع خود می‌رسد. سرعت لایه جریان در بازه ۶۰-۷ سانتیمتر بر میکروثانیه است که به شرایط گاز کاری، شکل هندسی الکترودها، چگالی جریان و ساختار لایه جریان بستگی دارد [۱۸]. ستون پلازما به‌طور آدیاباتیک متراکم شده تا تنگش شکل گیرد. ناپایداری ریلی-تیلور در ۳۰ نانوثانیه قبل از انتهای این مرحله اتفاق می‌افتد. این نوع ناپایداری با کاهش سرعت شعاعی، از بین می‌رود [۱۹]. در انتهای این مرحله میدان مغناطیسی خیلی سریع به داخل ستون پلازما نفوذ می‌کند و باعث یک مقاومت پلاسمایی زیاد می‌گردد و اندوکتانس سیستم افزایش می‌یابد [۲۰]. پس از شکل‌گیری ستون پلازما گرمایش ژولی نقش اصلی در گرم کردن پلازما بر عهده دارد. اغلب فرض می‌شود که معادله

¹² The compression phase

بنت^{۱۳} در فاز تنگش برقرار است که مطابق این معادله دمای نهایی می‌باید فقط به جریان I و چگالی N برقرار است. یعنی پلاسمای با چگالی کمتر، دمای بیشتری دارد.

$$T \approx \frac{I^2}{N} \quad (۲-۱)$$

۱-۶-۲-۳-ب فاز آرام^{۱۴}

این فاز از شروع انبساط ستون پلاسمای تنگش‌یافته آغاز می‌شود. در طول این فاز انبساط ستون پلازما در دو راستای شعاعی و محوری اتفاق می‌افتد که فشار مغناطیسی محصورسازی از انبساط شعاعی جلوگیری می‌کند. اما پلازما در راستای محوری بدون هیچ مانعی و فواره‌وار گسترش می‌یابد و نتیجه آن تشکیل جبهه موج ضربه در راستای محوری است. تغییر سریع در اندوکتانس پلازما (که در فاز تراکم آغاز می‌شود) یک میدان الکتریکی در ستون پلازما ایجاد می‌کند. این میدان الکتریکی میدان الکترون‌ها و یون‌ها را در دو جهت مخالف شتاب می‌دهد. سرعت سوق نسبی بین الکترون‌ها و یون‌ها افزایش خواهد یافت و به سرعت حرارتی الکترون‌ها نزدیک می‌شود. این امر منجر به آغاز ناپایداری‌های ریز مانند چرخش الکترونی و دیگر ناپایداری‌های باریکه-پلازما می‌شود. در انتهای فاز آرام ناپایداری $M=0$ که مربوط به افزایش دمای الکترونی است به سرعت در جهت شعاعی توسعه می‌یابد. ستون پلازما دوباره متراکم خواهد شد و دلیل این تراکم، ناپایداری $M=0$ است. بر مبنای این مشاهدات می‌توان مدت زمان پلازما (T_p) را به صورت زمان بین اولین تراکم و لحظه آغاز ناپایداری $m=0$ تعریف کرد [۲۱].

¹³ Bennett

¹⁴ The Quiescent Phase

۱-۶-۲-۳-ت فاز ناپایداری^{۱۵}

فاز ناپایداری بدلیل تولید اشعه ایکس نرم و سخت، یون‌ها، الکترون‌های سریع و گسیل نوترون مهمترین مرحله بشمار می‌آید. در اثر رشد ناپایداری $m=0$ میدان الکتریکی القایی افزایش می‌یابد. این میدان موجب شتابگیری الکترون‌ها به سمت آند و یون‌ها به سمت کاتد می‌شود. چگالی پلاسما در ناحیه تنگش مجدداً به 10^{19} cm^{-3} افزایش می‌یابد. در اثر برخورد الکترون‌ها با آند مقدار زیادی ناخالصی تولید شده و وارد ستون پلاسما می‌شود. تخریب ستون پلاسما تا از بین رفتن کامل آن ادامه می‌یابد.

۱-۶-۲-۳-ث فاز واپاشی^{۱۶}

آخرین مرحله از دینامیک پلاسمای کانونی فاز فروپاشی است. در هنگام تنگش وقتی چگالی پلاسما به کمتر از 2×10^{27} بر سانتیمتر مکعب می‌رسد این فاز شروع می‌شود. در طول فاز واپاشی ابر پلاسمایی بزرگ و داغ به علت از بین رفتن ستون پلاسما تشکیل شده است. این ابر مقدار زیادی اشعه ایکس در اثر تابش ترمزی گسیل می‌کند. اشعه ایکس نرم خیلی سریع در طول این فاز گسیل می‌شود. پیک اشعه ایکس نرم به عنوان اولین پیک بعد از پیک تنگش است که دارای زمانی ۳۰۰ نانوثانیه است [۲۲].

۱-۶-۳ ناپایداری‌ها در پلاسمای کانونی

۱-۶-۳-۱ ناپایداری ریلی-تیلور^{۱۷}

هنگامی که یک شاره تراکم‌ناپذیر و چگال توسط یک شاره با چگالی پائین‌تر احاطه می‌شود و این ترکیب در میدانی شتاب می‌گیرد، ناپایداری ریلی-تیلور بوجود می‌آید. در پلاسمای محصور شده مغناطیسی، میدان مغناطیسی همانند سیال سبک‌تری که سیال سنگین‌تر (پلاسما) را احاطه کرده است،

¹⁵ The unstable phase

¹⁶ The decay phase

¹⁷ Rayleigh-Taylor Instability

رفتار می‌کند با گسترش میدان مغناطیسی به درون پلاسما، یون‌ها شتابی می‌گیرند که از رابطه (۱-۳) قابل حصول است.

(۲-۱)

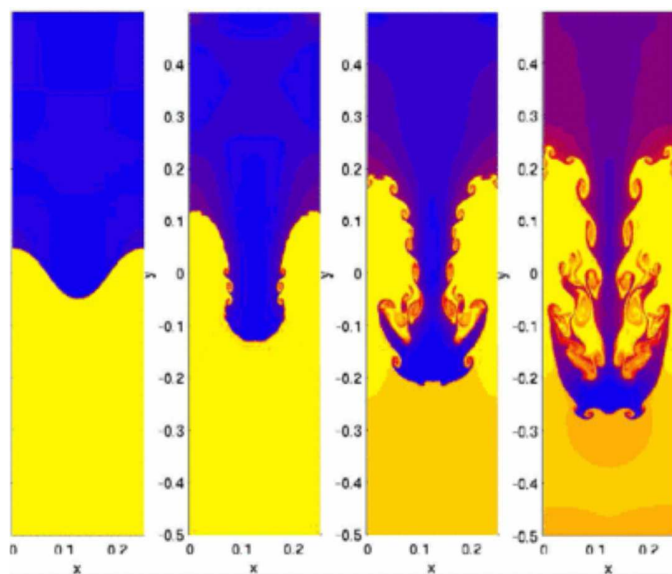
$$G_{\text{EFF}} = \frac{V_{\text{TI}}^2}{R}$$

در این رابطه V_{TI} سرعت یونی و R شعاع انحنای میدان است. در شکل (۲-۱) با نفوذ میدان مغناطیسی به داخل سیال، ناپایداری ریلی-تیلور پدید آمده است. همانند وقوع ناپایداری که در ترکیب آب و روغن در مرز دو محیط ایجاد می‌شود. در پایان فاز تراکم مرز ستون پلاسما افتوخیز نموده و این ناپایداری در مدت زمان ۳۰ نانوثانیه رشد می‌کند.



شکل ۳-۱: ناپایداری ریلی-تیلور

محیط شبیه‌سازی شده از ناپایداری ریلی-تیلور در شکل (۲-۲) بهتر نمایش داده شده است.

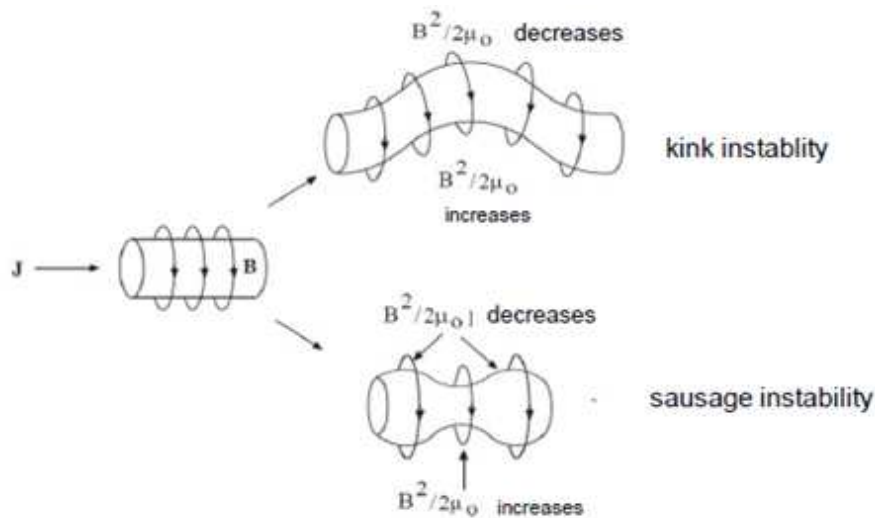


شکل ۱-۴: محیط شبیه‌سازی شده از ناپایداری ریلی تیلور

۱-۶-۳-۲ ناپایداری $M=0$ (سوسیسی^{۱۸})

واپاشی ستون پلازما بعلت ناپایداری‌های هیدرومغناطیسی به‌ویژه ناپایداری مد $M=0$ (ناپایداری سوسیسی) است. ناپایداری‌های هیدرومغناطیسی بر اساس عدد مد قطبی ($E^{IM\theta}$) تقسیم‌بندی می‌شوند. در تقارن سمتی اختلال شعاعی حول یک نقطه به آهستگی ستون پلازما را همانند شکل (۲-۳) تنگ می‌کند. چگالی جریان طولی (J_z) که در این نقطه از سطح مقطع کوچکتری عبور می‌کند میدان مغناطیسی B_θ قویتری را ایجاد می‌کند درحالی‌که میدان در نقاط دیگر بدون تغییر باقی‌مانده می‌ماند. میدان مغناطیسی قویتر نیروی بی‌شتی را به سمت داخل به ستون پلازما اعمال می‌کند و ستون پلازما را فشرده‌تر می‌سازد. این تغییرات در میدان مغناطیسی، میدان الکتریکی محوری بزرگی را القاء می‌کند که موجب شتاب‌گیری یون‌ها در پلازما تا چند صد کیلوولت می‌شود. ناپایداری سوسیسی با اعمال میدان مغناطیسی محوری که از میدان مغناطیسی قطبی قویتر باشد از بین می‌رود.

¹⁸ Susage

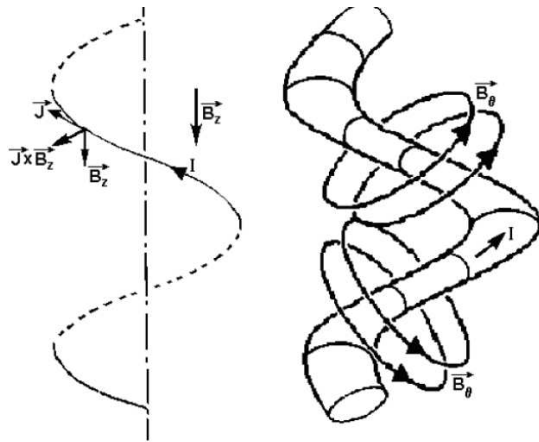


شکل ۱-۵: ناپایداری تابی و سوسیسی

۱-۶-۳-۳ ناپایداری مد $M=1$ (تابی)^{۱۹}

با افزودن میدان مغناطیسی در امتداد محور ستون پلازما از ناپایداری سوسیسی کاسته می شود اما ناپایداری دیگری به نام ناپایداری تابی ($m=1$) ایجاد می شود. این ناپایداری موجب می شود ستون پلازما حلزونی شکل شود (شکل ۲-۴). در ناپایداری تابی وقتی قسمتی از ستون پلازما خم می شود میدان مغناطیسی قطبی در لبه بیرونی قوس قویتر از لبه درونی خواهد شد در نتیجه نیروی بیشتری به لبه درونی وارد می شود موجب خمیدگی بیشتر ستون پلازما می شود. برای غلبه بر ناپایداری تابی باید میدان مغناطیسی در راستای محور پلازما قویتر بوده و یا قطر ستون پلازما به اندازه ای باشد که میدان مغناطیسی بین پلازما و مرز آن یکنواخت باشد.

¹⁹ kink



شکل ۱-۶: ناپایداری تابی

۱-۶-۳-۴ ناپایداری‌های ریز و تلاطم^{۲۰}

اثرات ناپایداری‌های ریز و توربولانس بر دینامیک لایه جریان در تعداد زیادی آزمایشات مشاهده شده است که می‌توان موارد زیر را نام برد: ۱- پراکندگی غیرعادی نور لیزر هنگام مطالعه لایه جریان. ۲- مقاومت غیرعادی در ستون پلاسما. ۳- تابش غیرحرارتی در ناحیه میکروموج. مشاهدات مربوط به گسیل میکروموج (۱۸GH-۲/۶) در طول تشکیل تنگش را می‌توان بر حسب ناپایداری‌های ریز بیان کرد. توربولانس ایجاد شده در هنگام تنگش باعث شتابگیری ذرات می‌شود [۲۳].

۱-۶-۴ کاربردهای دستگاه پلاسمای کانونی

دستگاه پلاسمای کانونی مولد نوترون (در صورت استفاده از گاز دوتریوم)، الکترون، یون، اشعه ایکس سخت و نرم [۲۴] و اشعه ماورای بنفش شدید (EUV) است [۲۵]. از آنجایی که دستگاه پلاسمای کانونی مولد ذرات و تابش‌های پرانرژی است این دستگاه کاربردهای آموزشی، تحقیقاتی و صنعتی دارد [۲۶].

²⁰ Micro instabilities and turbulence

۱-۴-۶-۱ کاربردهای آموزشی

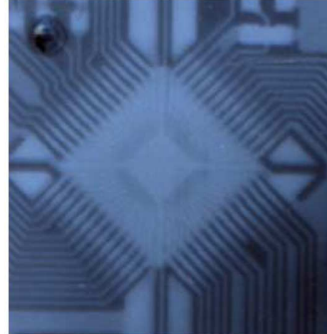
دستگاه پلاسمای کانونی ابزار آموزشی مناسبی برای درک مفاهیم بنیادی در زمینه‌های مختلف فیزیک بویژه پلازما، ترمودینامیک، الکترومغناطیس، اسپکتروسکوپی، فیزیک اتمی و فیزیک هسته‌ای می‌باشد. مراحل مختلف شکل‌گیری پلازما، پینچ و انواع تابش‌های شکل گرفته در این دستگاه، مورد مطالعه و پژوهش بسیاری از دانشجویان در مقاطع مختلف تحصیلی قرار گرفته است.

۲-۴-۶-۱ دستگاه پلاسمای کانونی بعنوان چشمه نوترونی

اگر از دوتریوم به عنوان گاز کاری استفاده شود، دستگاه پلاسمای کانونی چشمه نوترون‌های سریع و پرنرژی بشمار می‌رود [۲۷]. از این نوترون‌های پرنرژی در آنالیز مواد و تولید رادیوایزوتوپ‌ها استفاده می‌شود.

۳-۴-۶-۱ کاربردهای مبتنی بر تولید اشعه ایکس

مشخصه پرتوهای ایکس گسیل شده از یک دستگاه پلاسمای کانونی، شدت بالا و گستردگی ناحیه طیفی آن است [۲۸]. تابش اشعه ایکس در دستگاه پلاسمای کانونی عمدتاً ناشی از تابش ترمزی، تابش بازترکیب و تابش خطی می‌باشد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که دستگاه پلاسمای کانونی قادر به تولید پرتو ایکس در ناحیه وسیعی از انرژی‌های کمتر 1 keV تا بیش از 500 keV می‌باشد. از اشعه ایکس تولید شده در پلاسمای کانونی برای میکرولیتوگرافی [۲۹]، رادیوگرافی از نمونه‌های زیستی [۳۰]، فلزی و عیب‌یابی اجسام متحرک [۳۱] استفاده می‌شود. در شکل ۱-۷ تصویربرداری از یک نمونه زیستی و فلزی نشان داده شده است. قسمت (الف) تصویر گرفته شده از یک مدار مجتمع با استفاده از پرتو ایکس گسیلی از *SBUMTPFI* مشاهده می‌شود. این تصویر توسط دارستانی و همکارانش گرفته شده است. قسمت (ب) تصویر یک ماهی که توسط حسین و همکارانش در فشار $0/5$ میلی‌بار هیدروژن گرفته شده است.



شکل ۱-۷: (الف): تصویر رادیوگرافی از یک مدار مجتمع [۳۲] (ب): تصویر رادیوگرافی از ماهی [۳۳]

۱-۶-۴-۴ کاربردهای مبتنی بر تولید اشعه ماورای بنفش

تکنیک‌های نسل بعدی لیتوگرافی بر مبنای پلاسماهای تخلیه الکتریکی به دلیل کارایی و ارزان قیمت بودن نسبت به روش‌هایی چون تابش سینکرترون و پلاسماهای حاصله از لیزر توسط بسیاری از پژوهشگران مورد مطالعه قرار گرفته است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که پلاسماهای کانونی می‌تواند جایگزین مناسبی برای لیتوگرافی اشعه ماورای بنفش شدید (EUVL) باشد [۳۴].

۱-۶-۴-۵ کاربردهای مبتنی بر تولید الکترون

باریکه الکترونی پالاسی با انرژی بالا در لیتوگرافی [۳۵]، لایه‌نشانی [۳۶] و پردازش سطوح مواد [۳۷] بکار گرفته می‌شود.

۱-۶-۴-۶ کاربردهای مبتنی بر تولید یون

✓ کاشت یونی [۳۸]

✓ آمورفیزه کردن کریستال سیلیکون [۳۹]

فصل دوم

دینامیک دستگاه پلاسمای کانونی

۲ فصل دوم: دینامیک دستگاه پلاسمای کانونی

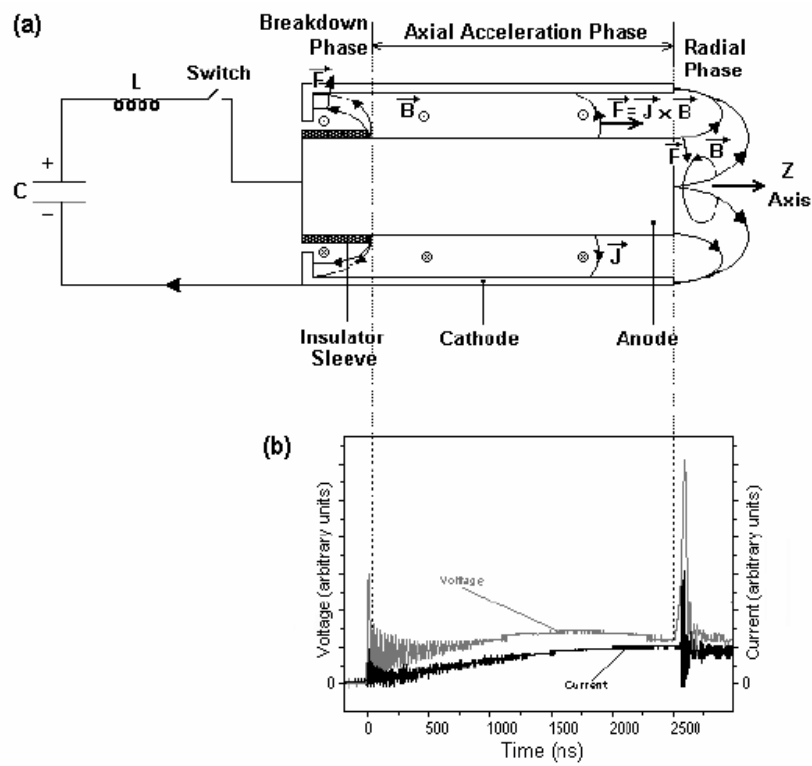
۱-۲ مقدمه

در این فصل رفتار پلازما و پلاسمای کانونی از دیدگاه‌های مختلف شامل خصوصیات الکتریکی و مدار معادل پلاسمای کانونی، موج ضربه و معادلات آن، خصوصیات ترمودینامیکی و فرایند انتقال انرژی در پلاسمای کانونی را مورد بررسی قرار داده و رفتار دینامیکی پلاسمای کانونی را شرح می‌دهیم.

۲-۲ مدل سازی رفتار دینامیکی پلاسمای کانونی

همان‌طوریکه در فصل قبل بیان شد فرایند دینامیکی که در دستگاه پلاسمای کانونی رخ می‌دهد به فازهای شکست، شتاب محوری و شعاعی تقسیم‌بندی می‌شود. اولین بار مدل مربوط به پلاسمای کانونی توسط پروفیسور لی [۴۰] ارائه شد که در ابتدا به صورت یک کد مگنتوهیدرودینامیک ساده بود و بتدریج کامل گردید. این مدل علاوه بر آن که چگونگی شکل و شتاب گرفتن پلازما را شرح می‌دهد، پدیده‌هایی را که در فاز شعاعی رخ می‌دهد و همچنین گسیل اشعه ایکس از پلاسمای کانونی شده را توصیف می‌کند. نمایی از این سه فاز و سیگنال‌های ولتاژ و جریان در شکل (۱-۲) دیده می‌شود. فاز شعاعی شامل تراکم، سکون، ناپایداری، واپاشی می‌باشد. بر اساس این مدل فرایند حاکم بر دستگاه پلاسمای کانونی به چهار فاز تقسیم می‌شود:

- ۱- فاز شتاب محوری
- ۲- فاز حرکت شعاعی رو به داخل موج ضربه
- ۳- فاز موج ضربه انعکاس یافته
- ۴- فاز تراکم آرام

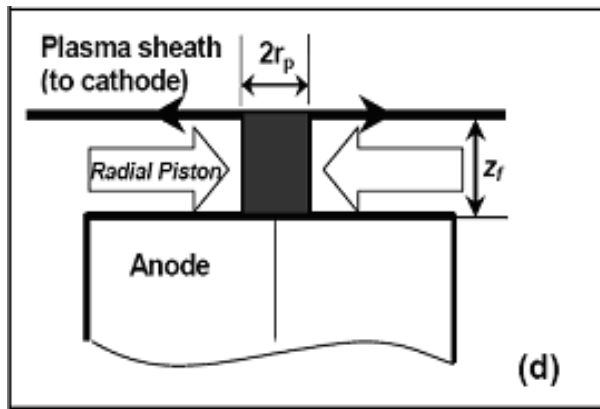
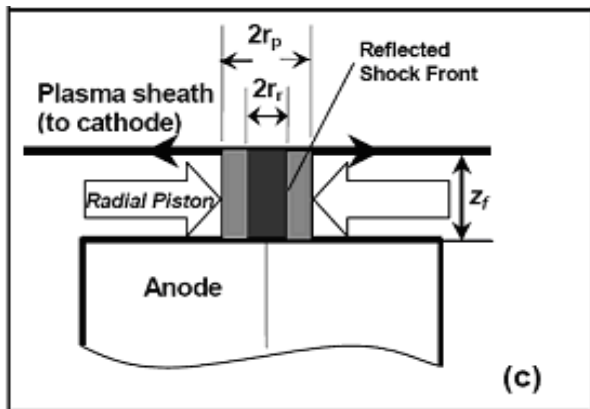
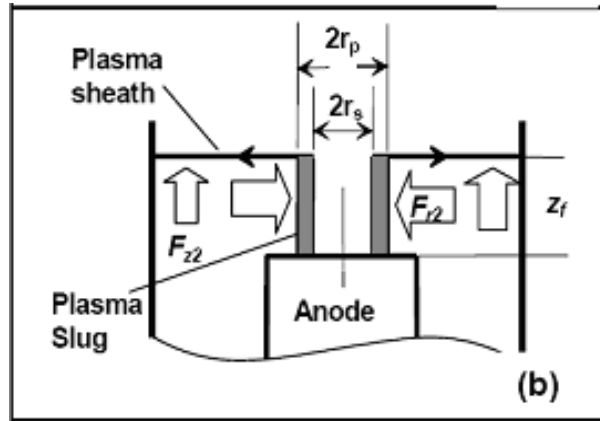
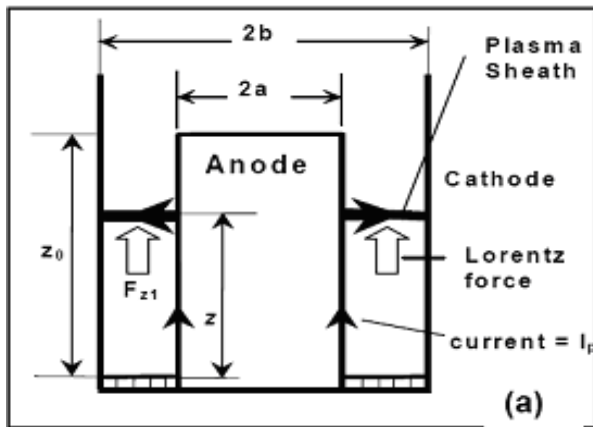


شکل ۱-۲: (a) دینامیک لایه جریان در یک دستگاه پلاسمای کانونی (b) سیگنال ولتاژ و جریان متناظر با فازهای مختلف تخلیه

۱-۲-۲ فاز محوری

فاز محوری بعد از فاز شکست آغاز می شود. همان طوری که در شکل ۲-۲ (a) نشان داده شده است لایه پلازما بصورت یک لایه رسانای تخت، آند را به کاتد متصل می کند و کسری از جرم گاز (f_{m1}) میان

آند و کاتد را تا بالای آند جاروب می‌کند. با در نظر گرفتن لایه جریان در راستای محور Z ، فاز محوری از $z = 0$ شروع شده و در $z = z_0$ انتهای طول آند به پایان می‌رسد. جرم لایه پلازما در Z بصورت $f_{ml} = n_0 m_i z \pi (b^2 - a^2)$ است. در این رابطه n_0 چگالی اتم‌ها، m_i جرم اتمی گاز کاری، a شعاع آند و b شعاع کاتد می‌باشد.



شکل ۲-۲: فازهای دینامیکی پلاسمای کانونی [۴۱-۴۲]

۲-۲-۲ فاز شعاعی

فاز شعاعی به سه فاز تقسیم می‌شود که عبارتند از:

الف- فاز حرکت شعاعی روبه داخل

ب- فاز موج ضربه انعکاس یافته

ج- فاز تراکم آرام

۲-۲-۳ فاز حرکت شعاعی روبه داخل

در این فاز فرض می شود پلاسما همانند یک موج ضربه زننده^{۲۱} با شعاع بیرونی r_p (موقعیت پیستون مغناطیسی) و شعاع درونی r_s (جبهه ضربه) و طول z_f است. Slug بصورت شعاعی توسط پیستون مغناطیسی روبه داخل متراکم می شود و کسر f_{m2} از گاز در درون slug جمع آوری می شود. این فاز در $r_p = r_s = a$ آغاز شده و با رسیدن جبهه موج ضربه به محور آند ($r_s = 0$) تمام می شود.

۲-۲-۴ فاز موج ضربه انعکاس یافته

جبهه موج پس از برخورد ضربه به محور مرکزی با کسر سرعتی از سرعت روبه جلوی جبهه موج در فاز روبه داخل، در جهت شعاعی روبه خارج شروع به حرکت می کند. در این حالت انرژی جنبشی ذرات در Slug

(E_K) در اثر ضربه به انرژی درونی پلاسما تبدیل می شود. این امر باعث افزایش دما و چگالی در مرکز خواهد بود. این مرحله بعنوان فاز ضربه انعکاس یافته نام دارد. در این مرحله پلاسما به دو قسمت تقسیم شده است قسمت مرکزی پلاسما نسبتا ساکن اما داغ و چگال است و قسمت بیرونی با دما و چگالی کمتر خیلی سریع فشرده می شود. مرزی که ستون پلاسمای داغ و چگال مرکزی را از پلاسمای بیرونی جدا می کند جبهه موج انعکاس یافته نام دارد. هنگامی که کل ذرات به ستون پلاسمای مرکزی

²¹ Slug

پیوستند جبهه ضربه انعکاس یافته و پیستون مغناطیسی همدیگر را در موقعیت شعاعی $r_r = r_p$ ملاقات می کنند که در این زمان این فاز پایان می یابد.

۲-۲-۵ فاز تراکم آرام

پس از پایان فاز موج ضربه انعکاس یافته، فاز تراکم آرام آغاز می شود. در این فاز ستون پلازما همچنان به فشردگی شدن ادامه می دهد تا اینکه در اثر ناپایداری ها از هم می پاشد. این فاز را فاز تابشی نیز می نامند زیرا گسیل اشعه ایکس از پلاسمای کانونی شده صورت می گیرد.

۲-۳ مشخصه های ترمودینامیکی ستون پلازما

حرکت و تراکم ستون پلازما توسط پیستون مغناطیسی انجام می گیرد، پیستون مغناطیسی با رابطه (۱-۲) بیان می شود. مشخصات ترمودینامیکی ستون پلازما در جدول (۱-۲) آورده شده است. میزان انرژی منتقل شده به ستون پلازما را با $EINP^{22}$ نشان می دهند. این انرژی صرف گرم کردن، یونیزاسیون و تراکم پلازما می شود. اتلاف انرژی از طریق انرژی گرمایی، انرژی یونیزاسیون (E_i)، تابش (Q_{rad})، انرژی جنبشی پلازما (E_k) و انرژی ناشی از برخورد ذرات صورت می پذیرد.

$$P_B = \frac{1}{2\mu} \left(\frac{\mu I_p}{2\pi r_p} \right)^2 \quad (1-2)$$

جدول ۱-۲: مشخصه های ترمودینامیکی ستون پلازما

خصوصیات	
E_s	اتلاف انرژی توسط نشتی ذرات

²² Total energy that transferred into the plasma

انرژی گرمایی

$$E_{thermal} = \frac{3}{2} KT$$

منابع اتلاف انرژی

انرژی جنبشی

$$E_k = \frac{1}{2} m_i N_{ion} \left(\frac{dr_p}{dt} \right)^2$$

انرژی تابشی

$$Q_{rad} = \int_t (p_b + p_l + p_r) dt$$

یونیزاسیون و برانگیختگی

$$E_i = N_{ion} \times \left[\sum_{z=1}^{z_n} (\alpha_z I_z) + \sum_{z=1}^{z_n} (\alpha_z E_z) \right]$$

کار پیستون

منابع تولید انرژی

$$EINP = \int_t I_p^2 \left(R - \frac{\mu}{4\pi} \frac{z_f}{r_p} \frac{dr_p}{dt} \right) dt$$

گرمای ژولی

یونیزاسیون و بازترکیب

$$N_e = N_{ion} \times Z_{eff}$$

منابع تولید و اتلاف ذرات

نشستی ذرات در حین تراکم

$$N_{leak} = N_{ion} \times (1 - f_{m2})$$

(N_{ion} تعداد یون در SLUG)

گاز جمع آوری شده توسط جبهه موج

$$N_{ion} = \pi n_0 \int_t ((r_p^2 - r_s^2) \frac{dz_f}{dt} - 2z_f r_s \frac{dr_s}{dt}) dt$$

فشار پیستون مغناطیسی

فشار گاز

$$P_B = \frac{1}{2\mu} \left(\frac{\mu I_p}{2\pi r_p} \right)^2$$

M_I جرم اتم یا یون، α_z کسری از پلاسما که اتم های آن به اندازه Z الکترون از دست داده اند.

$Z_{eff} = \sum z \alpha_z$ بار موثر یک یون، \dot{I}_z انرژی مورد نیاز برای انتقال یک اتم خنثی به Z امین حالت یونیزه و

E_z انرژی برانگیختگی میانگین در Z امین حالت یونیزه یون است.

۴-۲ فرآیند انتقال انرژی

انتقال انرژی به درون پلازما از سه طریق صورت می‌گیرد. شکل (۲-۳) خلاصه‌ای از انتقال انرژی در دستگاه پلاسمای کانونی را نشان می‌دهد.

(۱) **مقاومت ظاهری:** انرژی ذخیره شده در L_P در اثر تغییر جریان

(۲) **پیستون مغناطیسی:** انرژی ناشی از تغییر اندوکتانس پلازما. نیمی از کار انجام شده توسط

پیستون صرف تراکم پلازما می‌شود (افزایش انرژی ذخیره شده در L_P) و نیمی دیگر صرف افزایش انرژی پلازما می‌شود.

(۳) **گرمای ژولی:** از آنجا که پلازما دارای مقاومت R_p است، عبور جریان از درون آن سبب گرم

شدن پلازما می‌شود.

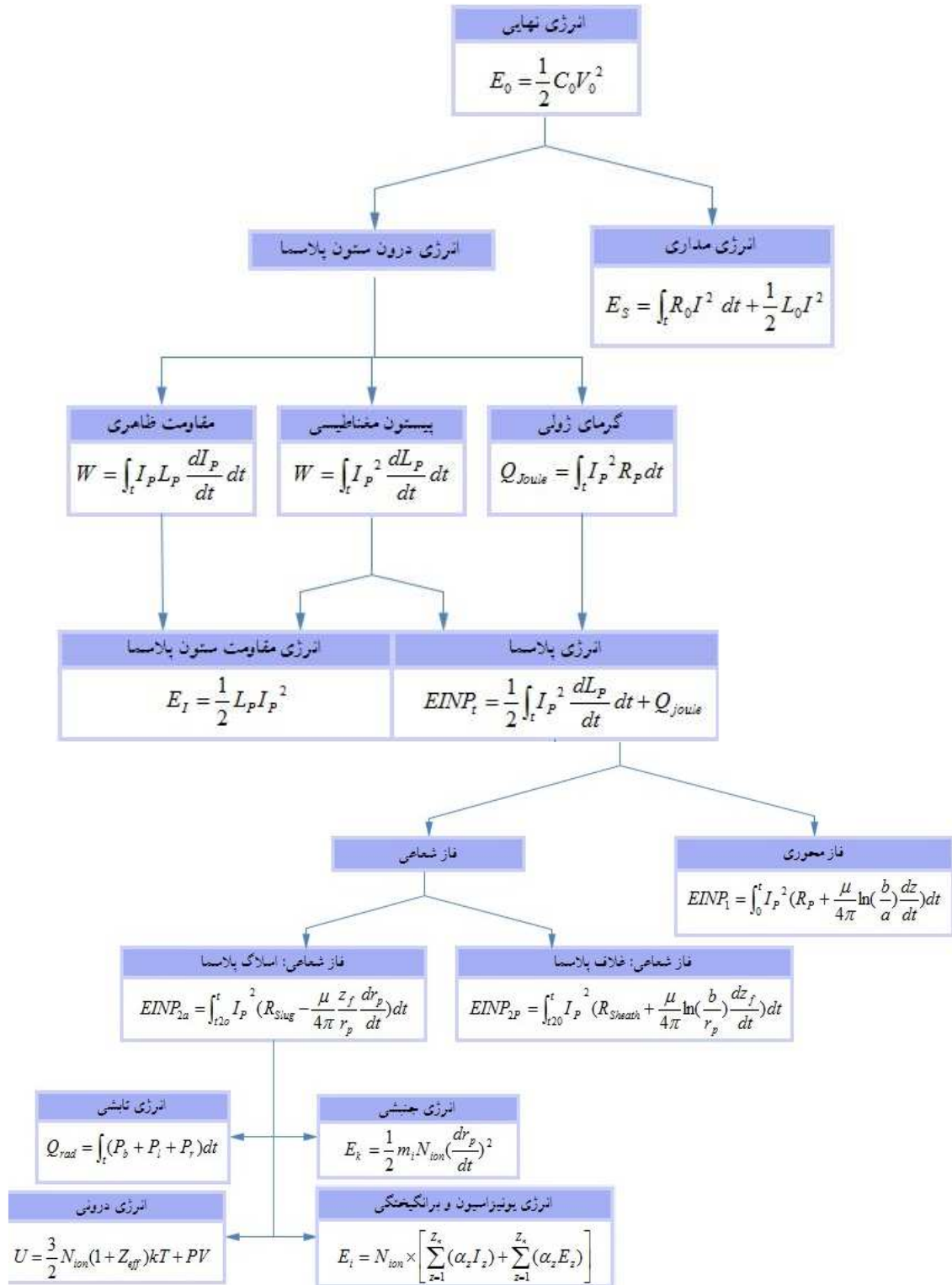
انرژی ذخیره شده در اندوکتانس سیستم (E_I) در صورت افت جریان به صورت یک منبع انرژی عمل می‌کند و نمی‌توان آن را اتلاف انرژی دانست. انرژی از دو طریق به درون پلازما منتقل می‌شود:

الف- گرمای ژولی

ب- نیمی از کار انجام شده توسط پیستون مغناطیسی

که این دو نوع انرژی به صورت انرژی جنبشی E_K ، انرژی درونی U ، انرژی یونیزاسیون و برانگیختگی E_I

و انرژی تابشی Q_{RAD} مصرف می‌شوند.



شکل ۲-۳: خلاصه‌ای از انتقال انرژی در پلاسما کانونی

۲-۵ پارامتر رانش

برای توصیف شدت نیروی رانش در دستگاه پلاسمای کانونی مفهوم پارامتر رانش برای اولین بار توسط پروفیسور لی معرفی شد [۴۳]. پارامتر رانش معرف فشار مغناطیسی بر واحد چگالی یا انرژی مغناطیسی بر واحد جرم است. پارامتر رانش را با رابطه زیر نشان داده می‌شود.

$$s = \frac{I/a}{\sqrt{\rho}} \quad (2-2)$$

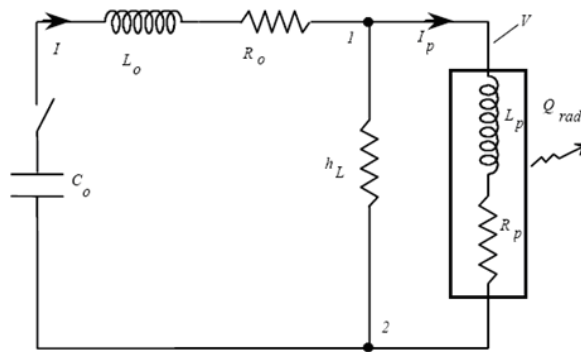
همچنین این پارامتر به صورت تجربی برای اندازه‌گیری سرعت بکار می‌رود که برای هر گازی دارای مقدار بهینه است. پارامتر رانش به چگالی انرژی ستون پلاسمای مرتبط است و افزایش چگالی انرژی (یا معادل آن دمای پلاسمای) را می‌توان با افزایش جریان و یا کاهش شعاع آند و فشار گاز بدست آورد.

۲-۶ خصوصیات الکتریکی و معادلات مدار معادل دستگاه پلاسمای کانونی

در مرحله تخلیه الکتریکی، دستگاه پلاسمای کانونی را می‌توان به‌عنوان مولفه‌ای از مدار الکتریکی معادل در نظر گرفت. مدار الکتریکی معادل پلاسمای کانونی در شکل (۲-۴) به‌طور شماتیک نشان داده شده است. در این شکل R_0, L_0, C_0 عبارت از ظرفیت خازنی، اندوکتانس و مقاومت مدار خارجی و L_p, R_p مقاومت و اندوکتانس پلاسمای است. تخلیه الکتریکی به‌صورت حلقه RLC در نظر گرفته می‌شود. h_L مقاومت نشستی پلاسمای که نشان‌دهنده نشستی در طول سطح عایق است و بانک خازنی تا ولتاژ V_0 شارژ می‌شود. بر اساس قانون کیرشهف معادلات مدار و ولتاژ ستون پلاسمای به‌ترتیب به‌صورت زیر می‌باشند:

$$\frac{1}{C_0} \int_0^t Idt - V_0 + R_0 I + \frac{d}{dt} (IL_0) + R_p I_p + \frac{d}{dt} (I_p L_0) = 0 \quad (2-3)$$

$$V = V_0 - \frac{1}{C_0} \int_0^t I dt - R_0 I - \frac{d}{dt}(L_0 I) = R_p I_p + \frac{d}{dt}(I_p L_p) \quad (4-2)$$

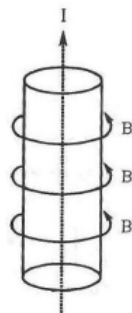


شکل ۴-۲: مدار الکتریکی دستگاه پلاسمای کانونی

در آزمایشگاه اندازه‌گیری جریان تخلیه در دستگاه پلاسمای کانونی بوسیله پیچه روگوفسکی انجام می‌گیرد.

۷-۲ اثر تنگش^{۲۳}

تمایل یک جریان الکتریکی شدید در فشرده ماندن در جهت عرضی، هنگام تخلیه در داخل پلازما به "اثر تنگش" معروف است. عامل اصلی که باعث تنگش می‌شود عبارت است از برهمکنش جریان با میدان مغناطیسی خودش یا عبارت دیگر نیروی جاذبه بین رشته‌های موازی جریان. اثر تنگش اولین بار توسط بنت^{۲۴} معرفی شد شکل (۵-۲).



²³ Pinch

²⁴ Benet

شکل ۲-۵: حرکت تنگشی ستون پلاسمای استوانه‌ای

یک تخلیه جریان با تقارن استوانه‌ای را در داخل پلاسمای در نظر بگیرید. از قانون مدار آمپر، میدان مغناطیسی در فاصله r از محور تخلیه با معادله (۲-۵) داده می‌شود:

$$B(r) = \frac{\mu_0}{r} \int_0^r J(r') r' dr' \quad (۲-۵)$$

از این معادله نتیجه می‌شود که

$$\frac{\partial B}{\partial r} = -\frac{\mu_0}{r^2} \int_0^r J(r') r' dr' + \mu_0 J(r) = -\frac{1}{r} B(r) + \mu_0 J(r) \quad (۲-۶)$$

نیروی مغناطیسی در واحد حجم عبارت است از

$$F_V = J \times B = -J(r) B(r) \hat{r} \quad (۲-۷)$$

\hat{r} بردار یکه در جهت R است. با حذف $J(R)$ بین (۲-۲) و (۲-۳) نتیجه می‌شود:

$$F_V = -\frac{1}{\mu_0} B \frac{\partial B}{\partial r} - \frac{1}{\mu_0 r} B^2 \quad (۲-۸)$$

این نیرو را می‌توان به یک فشار معادل، P_{eq} تبدیل کرد با در نظر گرفتن $F_V = -\frac{\partial P_{eq}}{\partial r}$ و انتگرال‌گیری داریم

$$P_{eq} = \frac{1}{2\mu_0} B^2 + \frac{1}{\mu_0} \int_0^r \frac{B^2}{r} dr \quad (۲-۹)$$

آنچه مورد توجه است فشار روی مرزهای عرضی تخلیه است. با این فرض بزرگ بودن رسانندگی یعنی حالتی که در آن خطوط میدان مغناطیسی زیاد نمی‌توانند به داخل سیال رسانا نفوذ کنند در این حالت در مرز تخلیه ($r=R$) فشار درست همان مقداری است که آن را فشار مغناطیسی P_m می‌نامند.

$$P_m = \frac{1}{2\mu_0} B^2(R) \quad (10-2)$$

از معادله (۱۰-۲) واضح است که فشار مغناطیسی در ناحیه خارج، یکنواخت اما در داخل تخلیه صفر یا خیلی کوچک است. بنابراین اثر تنگش را می‌توان ناشی از ایجاد ناگهانی یک فشار مغناطیسی در ناحیه خارج از تخلیه دانست که منجر به تراکم پلاسما می‌شود. اگر تنگش می‌توانست به شکل پایداری منقبض شود، این عمل تا جایی ادامه می‌یافت که فشار مغناطیسی در ناحیه خارج مساوی فشار سیال در داخل تخلیه شود. با در نظر گرفتن پلاسما مانند یک گاز کامل، فشار از رابطه (۱۱-۲) داریم:

$$P = NKT \quad (11-2)$$

بنابراین (در شعاع نهایی تخلیه R) داریم:

$$\frac{1}{\mu_0} B^2(R) = \frac{1}{2} \frac{\mu_0}{4\pi^2 R^2} I^2 = NKT \quad (12-2)$$

I جریان در داخل ناحیه تخلیه است. با حل این عبارت برای جریان و در نظر گرفتن اصل بقای ذرات $A_0 N_0 = \pi R^2 N$ خواهیم داشت:

$$I^2 = 2 \left(\frac{\mu_0}{4\pi} \right)^{-1} \pi R^2 NKT = 2 \left(\frac{\mu_0}{4\pi} \right)^{-1} A_0 N_0 KT \quad (13-2)$$

A_0 سطح مقطع اولیه تخلیه، N_0 چگالی اولیه ذرات، $K = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ و $\frac{\mu_0}{4\pi} = 10^7 \frac{T.M}{A}$ است.

۸-۲ پارامترهای تاثیرگذار بر تنگش

مهمترین پارامترهای قابل اندازه‌گیری در دستگاه پلاسمای کانونی جریان و ولتاژ سیستم هستند. بررسی این سیگنال‌ها اطلاعات مفیدی در رابطه با دینامیک و عملکرد سیستم می‌دهد. کیفیت کانونی شدن در دستگاه پلاسمای کانونی با توجه به میزان فرورفتگی تنگش و شیب منفی آن در سیگنال مشتق جریان

مشخص کرد. سیگنال مشتق می‌تواند اطلاعات مفیدی در خصوص سرعت تراکم پلاسمای، زمان وقوع پینچ و شعاع نهایی ستون پلاسمای به ما دهد. اغلب نتیجه‌گیری‌ها در زمینه کیفیت و چگونگی رخداد تنگش بر پایه بررسی سیگنال جریان و مشتق آن انجام می‌پذیرد. در ادامه مهمترین عوامل تاثیرگذار بر تنگش با تمرکز بر سیگنال جریان و مشتق آن مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد.

۲-۸-۱ خازن

اجزای هندسی دستگاه بر پایه میزان انرژی سیستم طراحی می‌شود. ظرفیت، اندوکتانس، ماکزیمم ولتاژ قابل تحمل خازن [۴۴] به‌عنوان مهمترین پارامترهای تاثیرگذار بر انرژی سیستم و محاسبات مربوط به هندسه دستگاه نام برد. مطابق با رابطه (۲-۱۴) انتخاب خازنی با ظرفیت بالا و اندوکتانس پایین سبب افزایش جریان منتقل شده به ستون پلاسمای می‌شود.

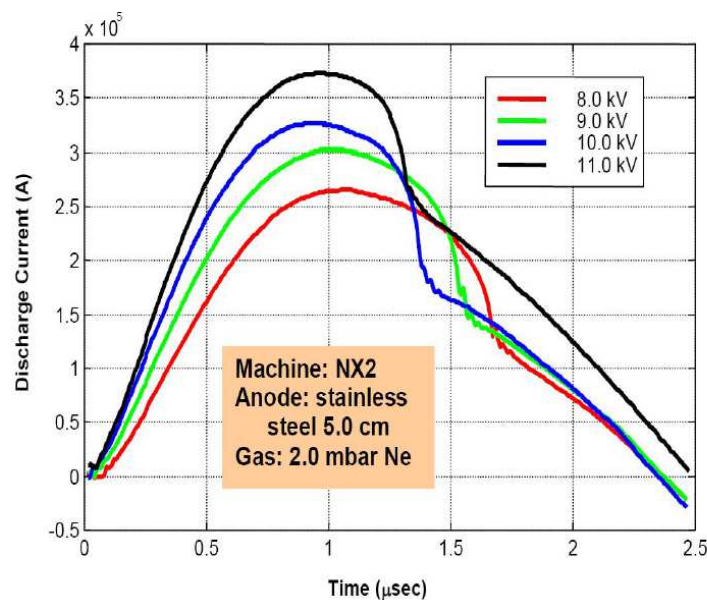
$$I = \frac{V}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \quad (2-14)$$

با توجه به رابطه مستقیم جریان و ولتاژ اعمالی، استفاده از خازنی با ولتاژ کاری بالاتر سبب بهبود در عملکرد و بهره‌تابشی سیستم می‌شود. کاهش اندوکتانس سبب افزایش سرعت تخلیه انرژی و در نتیجه تخلیه‌ای همگن و یکنواخت می‌شود. برای کاهش اندوکتانس و یا افزایش ظرفیت خازن استفاده از چند خازن موازی مرسوم است. تنها مشکل در این خازن‌ها همزمانی تخلیه است.

۲-۸-۲ اثر ولتاژ

افزایش ولتاژ سبب افزایش دامنه جریان می‌شود. طبق رابطه (۲-۱۴) دامنه جریان با ولتاژ سیستم رابطه مستقیم دارد. با افزایش ولتاژ در یک فشار مشخص، لایه جریان سریعتر طول آند را طی کرده و به بیشینه

مقدار خود می‌رسد و زمان پینچ‌شدگی کاهش می‌یابد. افزایش ولتاژ سبب افزایش سرعت لایه جریان می‌شود. در شکل (۶-۲) اثر ولتاژ بر جریان تخلیه در دستگاه پلاسمای کانونی NX2 در فشار ۲ میلی‌بار نشان داده شده است. فرورفتگی موجود در سیگنال جریان نشان‌دهنده فاز شعاعی می‌باشد. در ولتاژهای بالاتر، تنگش زودتر رخ می‌دهد (فاز محوری سریع‌تر به پایان می‌رسد). فرورفتگی موجود در سیگنال جریان نشان‌دهنده فاز شعاعی است با افزایش ولتاژ بازه زمانی مربوط به فرورفتگی جریان (فاز شعاعی) کاهش می‌یابد.



شکل ۶-۲: اثر ولتاژ بر جریان تخلیه در دستگاه NX2 [۴۵]

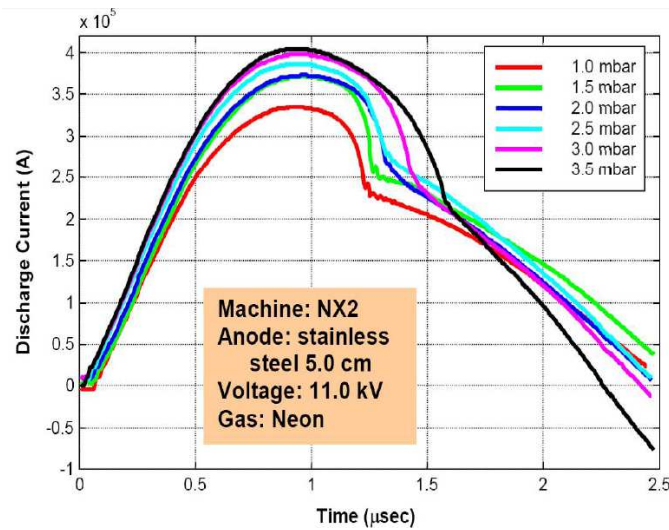
۲-۸-۳ مشخصات گاز

۲-۸-۳-۱ اثر فشار

برای بررسی اثر فشار بر زمان تنگش لازم است پارامترهای دیگر سیستم ثابت نگه داشته شود. شکل (۷-۲) اثر فشار بر جریان در دستگاه در ولتاژ ۱۱ کیلوولت نشان می‌دهد [۴۵]. با افزایش فشار، جریان تخلیه افزایش می‌یابد. در یک ولتاژ مشخص با افزایش فشار، اینرسی ناشی از جرم افزایش می‌یابد و بدین

ترتیب سرعت حرکت لایه پلاسمای کاهش پیدا می‌کند. کاهش سرعت لایه پلاسمای از آهنگ افزایش اندوکتانس می‌کاهد و در نتیجه اندوکتانس سیستم نسبت به فشارهای پایین‌تر، کمتر خواهد بود و جریان سریعتر افزایش می‌یابد.

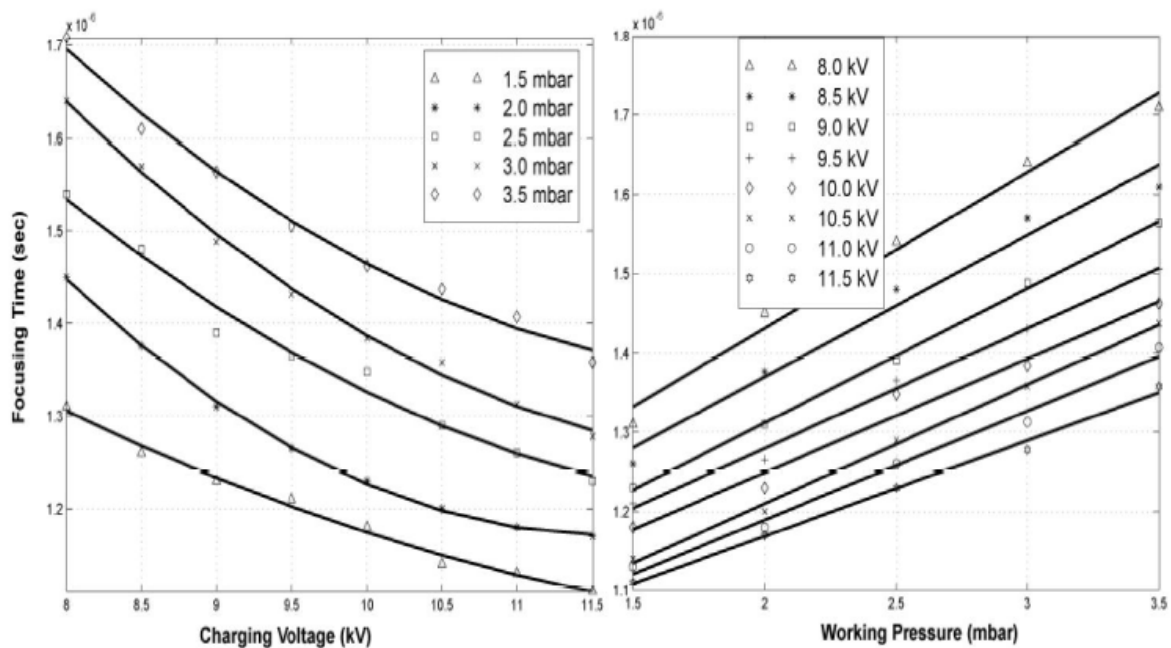
زمان فاز شعاعی، بازه زمانی مربوط به شروع و پایان فرورفتگی در سیگنال جریان است. افزایش فشار سبب تاخیر در زمان وقوع فاز شعاعی خواهد شد. عبارت دیگر زمان فاز محوری افزایش می‌یابد. افزایش زمان فاز محوری و شعاعی بر اثر افزایش فشار با پارامتر حرکت قابل توضیح است. افزایش فشار سبب افزایش چگالی و در نتیجه کاهش پارامتر حرکت می‌شود. کاهش پارامتر حرکت سبب کاهش سرعت پلاسمای و در نهایت سبب افزایش زمان‌های مربوط به فاز محوری و شعاعی می‌شود.



شکل ۲-۷: اثر فشار بر جریان تخلیه در دستگاه NX2

زمان کانونی شدن، بازه زمانی بین شروع تخلیه الکتریکی در سیستم و کمینه فرورفتگی در سیگنال ولتاژ (مشتق جریان) است. این زمان شامل فاز شعاعی و محوری می‌شود. زمان وقوع فاز شعاعی خیلی کوتاهتر از فاز محوری است. در شکل (۲-۸) تغییرات زمان کانونی شدن در اثر تغییرات ولتاژ و فشار نشان داده شده است.

افزایش ولتاژ سبب افزایش نیروی محرکه وارد بر ستون پلازما می شود در نتیجه پلازما سریعتر حرکت می کند و زمان تنگش کاهش می یابد. افزایش فشار، افزایش اینرسی ناشی از جرم را به دنبال دارد و این امر سبب افزایش زمان پینچ می شود. در بیشینه جریان پیستون مغناطیسی قوی تر بوده و ستون پلازما متراکم تر شود.



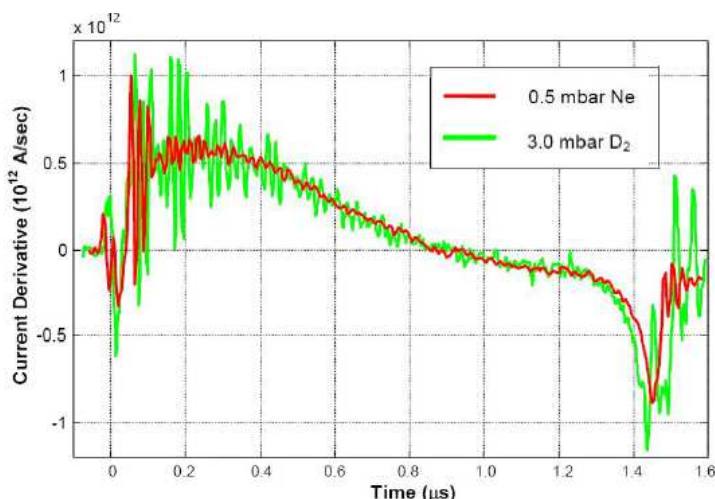
ب) تغییرات زمان پینچ در اثر ولتاژ

شکل ۲-۸: الف) تغییرات زمان پینچ در اثر فشار

۲-۳-۸-۲ نوع گاز

با توجه به پارامتر حرکت در صورت ثابت نگهداشتن سایر پارامترها، تنها پارامتری که اثر نوع گاز را نشان می دهد، چگالی جرمی خواهد بود. حتی با یکسان گرفتن چگالی جرمی برای گازهای مختلف، باز هم در دینامیک دستگاه تفاوت هایی دیده خواهد شد. سیگنال مشتق جریان برای دو گاز دوتریم و نئون با چگالی جرمی یکسان در شکل (۲-۹) نشان داده شده است. سیگنال مربوط به دو گاز در فاز محوری تقریباً یکسان است اما در ابتدای فاز شعاعی قبل از زمان $1/3 \mu s$ مشتق جریان برای دوتریم سریعتر افت می کند

این امر بالاتر بودن سرعت رو به داخل پلازما را در گاز دوتریم نشان می‌دهد. بالاتر بودن سرعت تراکم در دوتریم ناشی از فرایند یونیزاسیون بر دینامیک پلازما می‌باشد. سرعت جبهه موج با λ (نسبت گرمای ویژه) رابطه مستقیم دارد و فرایند یونیزاسیون سبب کاهش λ می‌شود. فرایند یونیزاسیون سبب کاهش سرعت جبهه موج خواهد شد. فرایند یونیزاسیون موجب اتلاف انرژی و کاهش دماست. اگر در فاز شعاعی، دما پایین باشد سرعت انتقال انرژی از پیستون به جبهه موج کاهش می‌یابد. فرایند یونیزاسیون سبب تولید ذرات ثانویه (الکترون‌ها) می‌شود. افزایش چگالی ذرات موجب کاهش دما و سرعت تراکم ستون پلازما خواهد شد. تعداد ذرات تولید شده در اثر یونیزاسیون کامل گاز نئون در فشار 0.5 mbar تقریباً نصف تعداد ذرات تولید شده در فشار 3 mbar دوتریم است.



شکل ۲-۹: سیگنال مشتق جریان برای گاز نئون و دوتریم در دستگاه NX2 در ولتاژ 11.5 Kv

۲-۸-۴ مشخصات هندسی دستگاه

۲-۸-۴-۱ طول آند

طول آند یکی از پارامترهای مهم و تاثیرگذار بر تنگش پلازما می‌باشد [۴۶]. بهترین تنگش‌ها زمانی اتفاق می‌افتد که جریان در بیشینه مقدار خود باشد. از آنجایی که لایه جریان برای رسیدن به سر آند باید

طول آن را بپیماید، بهتر است فاز محوری در نزدیکی بیشینه جریان به پایان برسد. لذا برای محاسبه طول بهینه آند از زمان صعود طول پالس جریان استفاده می کنند. کوتاه بودن طول آند سبب می شود که تنگش خیلی زودتر از بیشینه جریان رخ دهد و انرژی کافی به پیستون مغناطیسی جهت تراکم مناسب ستون پلازما منتقل نخواهد شد و اگر طول آند برای انرژی مشخص، بیشتر از طول بهینه باشد، تنگش بعد از بیشینه جریان رخ خواهد داد که در این حالت نیز انرژی کمتری به پیستون مغناطیسی منتقل خواهد شد.

۲-۸-۴-۲ شعاع آند

سرعت لایه جریان در فاز محوری و شعاعی به پارامتر حرکت و متناظر آن به شعاع آند بستگی دارد. با افزایش پارامتر حرکت، میزان انرژی منتقل شده به ستون پلازما نیز افزایش می یابد. پارامتر حرکت با شعاع آند رابطه عکس دارد و یکی از روش های انتقال انرژی بیشتر به پلازما، کاهش شعاع آند است البته افزایش پارامتر حرکت، افزایش سرعت لایه جریان را به دنبال دارد اما برای سرعت لایه جریان در فاز شعاعی و محوری کران بالایی وجود دارد به همین سبب یک حد پایینی برای شعاع آند وجود دارد.

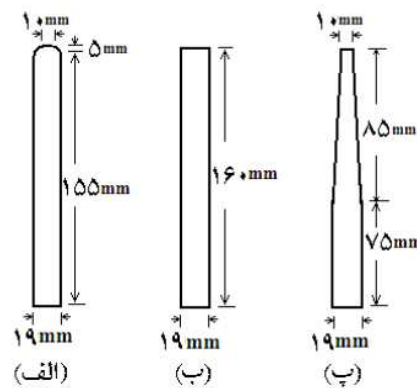
شعاع آند بر میزان تراکم شعاعی و کشیدگی محوری ستون پلازما تاثیر می گذارد. بازه زمانی بین کمینه شعاع ستون پلازما تا زمان بروز ناپایداری، زمان تنگش تعریف می شود. محاسبات و آزمایشات نشان می دهد زمان تراکم، زمان تنگش، کمینه شعاع ستون پلازما و بیشینه کشیدگی ستون پلازما به مقدار شعاع آند وابسته اند. شعاع آند یکی از پارامترهای مهم در وقوع و چگونگی تنگش است. پینچی مناسبتر است که بیشترین فشردگی و کشیدگی را داشته باشد. برای تراکم بیشتر ستون پلازما باید شعاع آند را به حداقل ممکن رساند و از طرف دیگر برای افزایش کشیدگی و زمان تنگش، لازم است شعاع آند را افزایش داد که این دو شرط با هم محقق نمی شود. در نتیجه برای آند شعاع بهینه ای که توسط پارامتر حرکت مشخص می شود در نظر گرفت.

۲-۸-۴-۳ جنس آند

فشار بهینه دستگاه پلاسمای کانونی برای یک انرژی مشخص، به شدت به جنس مواد استفاده شده برای ساخت آند وابسته است. الکتروود مرکزی (آند) از جنس‌های متفاوتی چون گرافیت، آلومینیوم، تیتانیوم، آهن، مس، نقره و تنگستن ساخته می‌شود. در برخورد الکترون‌ها با سطح آند و همچنین بدلیل بالا بودن دما، ذرات از سطح آند کنده شده و بر سطح عایق نهشته می‌شود این ناخالصی‌ها علاوه بر آنکه در تخلیه‌های بعدی وارد پلازما می‌شوند، سبب افزایش جریان نشتی از سطح عایق خواهد شد. در بین الکتروودها آلومینیوم بیشترین و تنگستن کمترین جریان نشتی از سطح عایق را دارد. با توجه به هزینه‌های ساخت از مس برای ساخت الکتروودها استفاده می‌شود.

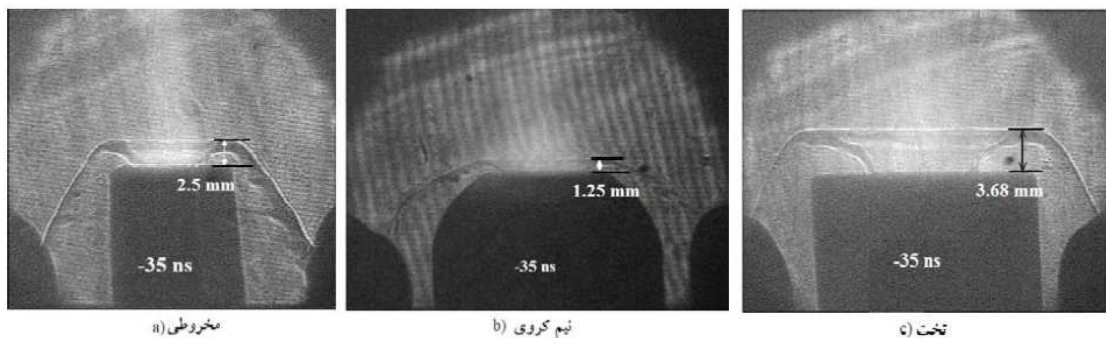
۲-۸-۴-۴ ساختار انتهای آند

آند مورد استفاده در پلاسمای کانونی به صورت کلی به شکل‌های کروی، نیم‌مخروطی و تخت می‌باشد [۴۷] شکل (۲-۱۰).



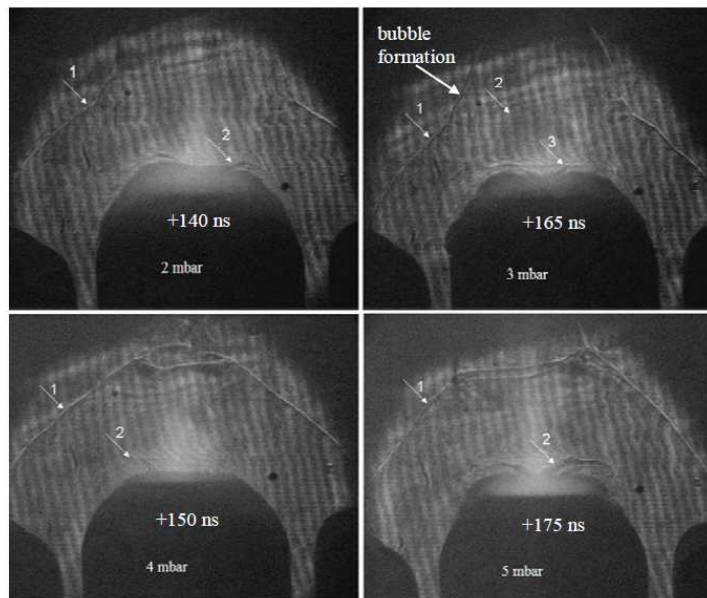
شکل ۲-۱۰: ساختارهای مختلف سر آند

پلازما در انتهای فاز شعاعی تشکیل می‌شود بنابراین پارامترهایی که در فاز شعاعی دخالت دارند در خصوصیات پلاسمای تشکیل‌یافته سهمیم هستند. تغییر در شکل آند مشخصه‌های پلازما از جمله سرعت لایه جریان و شکل لایه را تغییر می‌دهد. شکل (۲-۱۱) تغییرات شکل لایه جریان به علت تغییر شکل آند نشان داده شده است این تصاویر به روش سایه‌نگاری لیزری تصویربرداری شده است. روش سایه‌نگاری لیزری یکی از روش‌های مطالعه ساختار و دینامیک لایه جریان است. در این روش لیزری با طول موج پایین به درون پلازما تابیده شده و پس از اندرکنش با پلازما بوسیله یک CCD آشکار سازی می‌شود. محمدی و همکارانش با بکارگیری لیزر نیتروژن با طول موج ۳۳۷ نانومتر با پهنای پالس ۲ نانوثانیه به مطالعه لایه جریان در انتهای آندهایی با ساختارهای مختلف پرداختند. نتایج تحقیقات محمدی و همکارانش بر روی آندهای مختلف [۴۸] نشان می‌دهد فاصله لایه جریان از



شکل ۲-۱۱: لایه جریان در شکل‌های متفاوت سر آند

سطح آند، برای آند شبه مخروطی کمترین مقدار و برای آند تخت بیشترین مقدار است همچنین مشاهده چندپینچی در هنگام آزمایش با آند نیم‌کروی در فشارهای مختلف بدست آمده است. در شکل (۲-۱۲) تصاویری از این پدیده جالب در فشارهای مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۲: پدیده چندپینچی [۴۸]

۲-۸-۵ کاتد

۲-۸-۵-۱ ساختار کاتدها

در یک دستگاه پلاسمای کانونی، پلاسمای حاصل از تخلیه در سرتاسر فازهای پینچ و حرکت محوری با الکترودها در تماس است. بررسی‌های انجام شده بر تاثیر ساختار کاتد بر پینچ نشان می‌دهد ساختار کاتد تاثیر بسزایی در اتلاف انرژی و جریان دارد [۴۹]. کاتد را معمولا به صورت میله‌ای و یا صفحه‌ای می‌سازند.

۲-۸-۶ عایق

۲-۸-۶-۱ طول عایق

طول عایق یکی از پارامترهای مهم و تاثیرگذار در رفتار دینامیکی دستگاه پلاسمای کانونی است [۵۰]. طول موثر عایق از بالای صفحه کاتد محاسبه می‌شود. در ابتدا تخلیه الکتریکی بر روی سطح عایق انجام

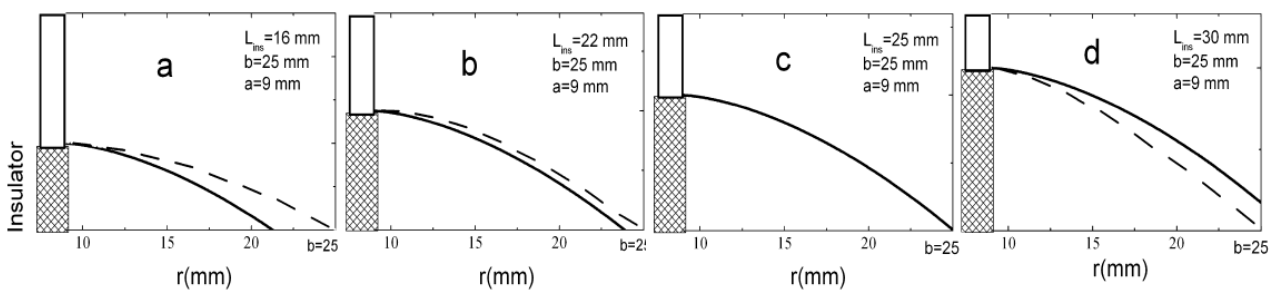
می‌شود و فاز اولیه موسوم به فاز شکست شکل می‌گیرد. تشکیل پلاسمای چگال با دمای زیاد به فاز شکست وابسته است. کارایی پلاسمای کانونی برای تولید انواع تابش وابسته به شکل‌گیری لایه جریانی همگن در فاز شکست است [۵۱]. شکل‌گیری صحیح لایه جریان توسط بار موجود در فضای نزدیک به سطح عایق صورت می‌گیرد و در این شکل‌گیری عواملی چون طول عایق، شکل لبه صفحه کاند، پیش تخلیه مداوم و نهشت لایه فلزی بر سطح عایق موثر هستند. در واقع طول عایق دارای یک مقدار بهینه‌ای است که این طول بهینه سبب تشکیل لایه جریانی متقارن و همگن می‌شود [۵۲]. هنگامی که لایه جریان شکل می‌گیرد نیروی لورنتس آن را در راستای عایق حرکت می‌دهد و وقتی به انتهای عایق می‌رسد، الکترودها را به یکدیگر اتصال می‌دهد. مدت زمان فاز شکست حدود چند ده نانو ثانیه است [۵۳]. محل شکل‌گیری لایه جریان به روش زمان پرواز و بوسیله دوربین‌های روزنه سوزنی و سایه‌نگاری لیزری عکسبرداری شده است [۵۴]. در طی فاز شکست، لایه پلاسمای شکل گرفته با رابطه سهمی وار (۲-۱۵) توصیف می‌شود.

$$Z(r) = -\frac{a}{2q} \left[x(x^2 - q^2)^{\frac{1}{2}} - (1 - q^2)^{\frac{1}{2}} - q^2 \ln \frac{x + (x^2 - q^2)^{\frac{1}{2}}}{1 + (1 - q^2)^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (15-2)$$

که در این رابطه $x = \frac{r}{a}$ ، $q = \left(\frac{\mu_0 I^2}{8\pi^2 a^2 \rho_0 u^2} \right)^{\frac{1}{2}}$ ، R فاصله از محور عایق، a شعاع الکتروود مرکزی، ρ_0 چگالی گاز غیراختلالی، i جریان در لایه پلاسمای U سرعت لایه پلاسماست. در دستگاه‌های مختلف نشان داده شده است که برای عملکرد بهینه دستگاه، نسبت طول عایق به اختلاف شعاع‌های الکترودها از رابطه (۲-۱۶) تبعیت می‌کند. طول بهینه عایق بر فشار بهینه سیستم و بهره نوترونی و ایکس اثر می‌گذارد. با افزایش و یا کاهش طول عایق، فشار گاز مورد نیاز برای داشتن حالت بهینه وقوع پینچ به ترتیب باید زیاد و کم شود.

$$1 < \frac{L_{ins}}{b-a} < 1.8 \quad (۱۶-۲)$$

اساس این رابطه ناشی از آن است که طول عایق، روی انحنای اولیه لایه جریان تشکیل شده اثر می‌گذارد و همین امر رفتار دینامیکی لایه جریان تا رسیدن به لحظه پینچ را تغییر می‌دهد. در شکل (۲-۱۳) انحنای لایه جریان برای عایق‌هایی با طول‌های متفاوت نشان داده شده است. مطابق شکل با افزایش طول عایق، انحنای لایه جریان افزایش و یا شیب منحنی (خط‌چین) کاهش می‌یابد. انحنای لایه جریان به شدت بر بهره نوترون و ایکس نرم تاثیر می‌گذارد [۵۵]. با کاهش طول عایق از مقدار بهینه، سرعت فاز محوری کاهش می‌یابد. برای همزمان شدن بیشینه جریان و زمان رسیدن لایه جریان به بالای آند باید فشار را کاهش داد در نتیجه کاهش چگالی، بهره نوترونی و ایکس کاهش خواهد یافت. اگر طول عایق بزرگتر از مقدار بهینه باشد زمان فاز محوری کاهش و برای همزمانی با بیشینه جریان لازم است فشار افزایش یابد. افزایش فشار سبب کاهش دمای پلاسمای و در نهایت کاهش میزان برهمکنش پرتو-هدف در گاز دوتریم و کاهش بهره نوترونی می‌شود بنابراین انتخاب طول مناسب برای عایق بسیار حائز اهمیت است.



شکل ۲-۱۳: تغییرات انحنای لایه جریان بر اثر تغییرات طول عایق [۵۶]

از مهمترین پارامترهای پلاسمای، دما و چگالی است. تغییرات طول عایق بر چگالی و دمای الکترون‌های جریان

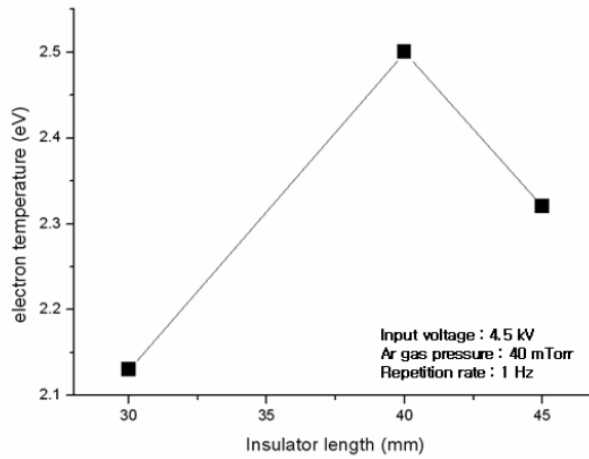
پایین اثر می‌گذارد. دمای الکترون‌های پینچ با استفاده از رابطه بنت (۲-۱۷) محاسبه می‌شود.

$$kT = \frac{1}{2} \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{1}{\pi r^2} \frac{1}{N} I^2 \quad (۲-۱۷)$$

R شعاع پلاسمای پینچ‌شده، I جریان تخلیه، $\frac{\mu_0}{4\pi} = 10^{-7} \frac{Tm}{A}$ و N چگالی الکترونی است. مطابق با

شکل (۲-۱۴) بررسی بر روی طول‌های متفاوتی از عایقی به جنس آکریل نشان می‌دهد ماکزیمم دمای

الکترونی 2.5 eV و بیشترین چگالی 10^{16} cm^{-3} مربوط به عایقی به طول 40 cm است.



شکل ۲-۱۴: دمای الکترونی جریان پایین برای طول‌های متفاوت عایق [۵۷]

۲-۸-۶-۲ شعاع عایق

زمان تکمیل فرآیند یونیزاسیون در فاز شکست (\bar{t}) و زمان اتمام فاز شکست (τ_{off}) به شعاع عایق

وابسته است. رابطه حاکم بر زمان شروع فاز شکست عبارت است از:

$$\tau_i = 20(\epsilon n_0)^{\frac{1}{3}} T_e^{\frac{1}{2}} \left(2\pi r_a \frac{\delta}{I_0} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (۲-۱۸)$$

ϵ انرژی مورد نیاز برای تولید یک الکترون، n_0 چگالی گاز خنثی، r_a شعاع عایق، δ پهنای لایه جریان، T_e دمای پلاسما و I_0' مشتق جریان است. $\frac{I_0'}{2\pi r_a \delta}$ آهنگ افزایش چگالی جریان در لایه جریان است که با τ رابطه عکس دارد. برای کاهش زمان یونیزاسیون و افزایش چگالی جریان می توان شعاع عایق را کاهش داد. مطابق رابطه (۲-۱۹) زمان اتمام فاز شکست، وابستگی به شعاع عایق و فشار دیده می شود. کاهش فشار و شعاع عایق تا جایی که در شرایط بهینه خللی وارد نکند برای کاهش زمان فاز شکست پیشنهاد می شود.

$$\tau_{off}(ns) = 8000(\rho r_a^3 \delta / I_0'^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2-19)$$

۲-۸-۶-۳ جنس عایق

در تحقیقات بسیاری اثر جنس های مختلف عایق بر نوع و میزان تابش های گوناگون حاصله از دستگاه پلاسمای کانونی بررسی شده است. نتایج آزمایش ها وابستگی فشار بهینه پینچ و متناظر با آن بهره نوترونی و ایکس را به جنس آند و عایق نشان می دهند. در دستگاه پلاسمای کانونی از عایق با جنس های مختلف پیرکس، تفلون، شیشه، کوارتز و آلومینا استفاده می شود [۵۸]. در دستگاه های پلاسمای کانونی با عایق های سرامیکی (شیشه، کوارتز و آلومینا) یکنواختی لایه جریان و با بکارگیری عایق های غیر سرامیکی، غیریکنواختی لایه جریان مشاهده می شود. کوهستانی و همکارانش اثر طول عایق بر میزان اشعه ایکس سخت را مورد مطالعه قرار دادند [۵۹].

۲-۸-۶-۴ اثر نهشت لایه فلزی بر عایق

با انجام تخلیه های الکتریکی در دستگاه پلاسمای کانونی، ذرات در اثر تبخیر و برخورد ذرات پراثری از سطح الکتروود مرکزی (آند) از جنس مس کنده شده و داخل سطح عایق نفوذ می کند و شرایط وقوع

شکست را بهبود می‌بخشد. نهشت کم لایه فلزی بر سطح عایق، موجب کاهش مقاومت عایق و شکل‌گیری

فاز شکست و تشکیل لایه جریانی متقارن و یکنواخت می‌شود [۶۰].

فصل سوم

چیدمان آزمایش و اندازه‌گیری

۳ فصل سوم: چیدمان آزمایش و اندازه‌گیری

۱-۳ مقدمه

در دستگاه پلاسمای کانونی، تخلیه اصلی در محفظه خلاء صورت می‌گیرد. پس از تزریق گاز، نوبت به شارژ بانک خازنی می‌رسد و برای تخلیه انرژی به داخل محفظه از یک کلید توان بالا از نوع گاف جرقه استفاده می‌شود. در این فصل ابتدا دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود معرفی می‌شود. سپس چیدمان آزمایش شرح داده شده و در ادامه فصل به سیستم‌های تشخیصی، ابزارهای اندازه‌گیری و روش انجام آزمایش‌ها پرداخته شده است.

۲-۳ دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود (SHUPF)

دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود از نوع مدر با مشخصات $C_0 = 16\mu f$ و $V_0 = 12kV$ و

$L_0 = 200nH$ با ماکزیمم انرژی $1/15$ KJ می‌باشد که مشخصات کلی آن در جدول ۱-۳

بیان شده است.

جدول ۱-۳: ویژگی‌های دستگاه پلاسمای کانونی (SHUPF)

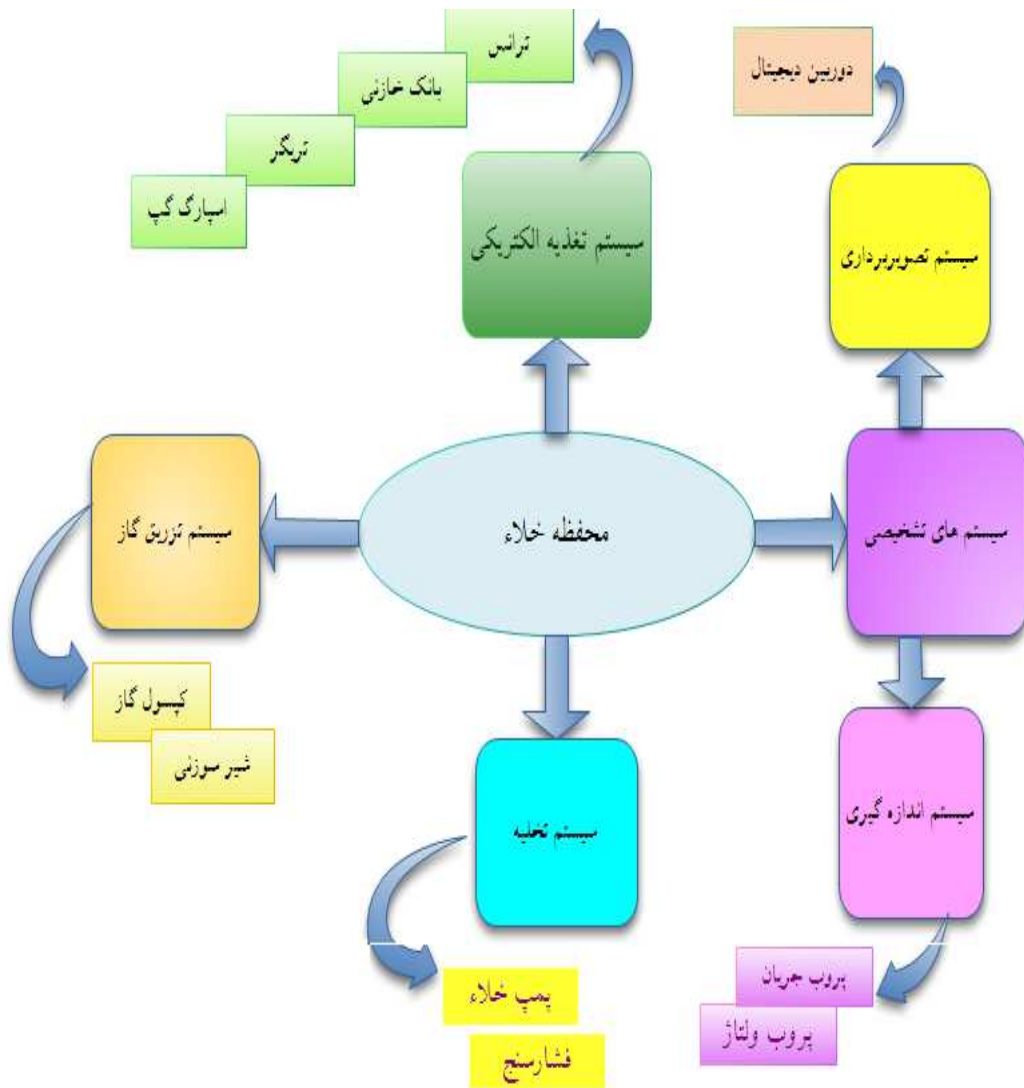
پارامترها	مقادیر
شعاع آند	۱۰ mm
شعاع کاتد	۵ mm
طول آند	۶۰ mm

۶۰ mm	طول کاتد
۴۰ mm	طول عایق
۲mm	ضخامت عایق

۱-۲-۳ ساختار کلی دستگاه پلاسمای کانونی (SHUPF)

دستگاه پلاسمای کانونی از هفت بخش اساسی تشکیل شده است که بطور شماتیک در شکل (۱-۳)

نشان داده شده است. انتخاب سیستم‌های تشخیصی با توجه به هدفی است که در مطالعه دنبال می‌شود.



شکل ۱-۳: بلوک دیاگرام دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود

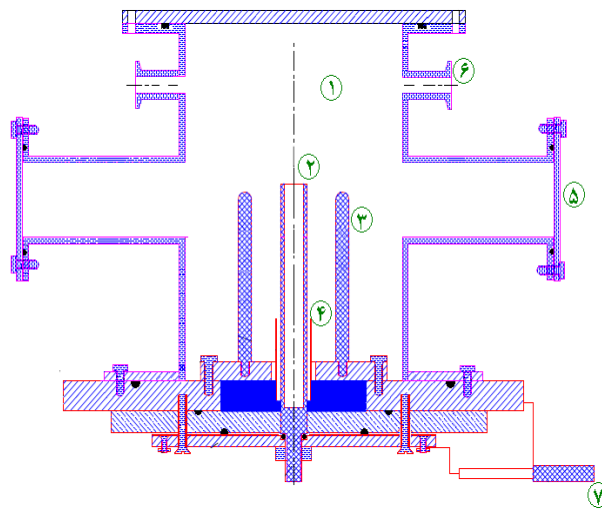
۱-۱-۲-۳ محفظه خلاء

یکی از بخش‌های مهم دستگاه پلاسمای کانونی محفظه خلاء است. در داخل محفظه خلاء، پلاسمایی با دمای زیاد و چگال تشکیل می‌شود. در شکل ۲-۳ نمایی از محفظه خلاء مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۲: محفظه خلاء

این محفظه دارای چهار بازو می‌باشد که از دو بازوی مقابل یکدیگر جهت استفاده در سیستم سایه‌نگاری لیزری و از دو بازوی دیگر برای اندازه‌گیری اشعه ایکس طراحی شده‌اند. سیستم سایه‌نگاری لیزری برای اندازه‌گیری سرعت لایه جریان به کار گرفته می‌شود. بدنه محفظه خلاء، استوانه‌ای به ارتفاع ۲۵۰ میلی‌متر، قطر ۱۶۰ میلی‌متر و از فولاد ضدزنگ (stain steel) است. الکترودها در داخل محفظه قرار دارند. ضخامت محفظه باید بگونه‌ای باشد که بتواند نیروی ناشی از اختلاف فشار ناشی از درون محفظه و فشار محیط را تحمل کند، به همین منظور از فولادی با ضخامت ۴ میلی‌متر استفاده شده است. در قسمت بالای محفظه دو دهانه (موقعیت ۶ در شکل ۳-۳) وجود دارد که یکی از آنها جهت تزریق گاز و دیگری جهت تخلیه محفظه به کار می‌رود. برای اندازه‌گیری فشار داخل محفظه از یک فشارسنج پیرانی استفاده می‌شود که هد فشارسنج از طریق سهراهی به دهانه (موقعیت ۶ در شکل ۳-۳) متصل می‌شود. قسمت پایین محفظه خلاء بطور متقارن از طریق ۱۲ عدد کابل هم محور (موقعیت ۷ در شکل ۳-۳) به قطب منفی (زمین) خازن وصل شده است به عبارت دیگر بدنه محفظه خلاء به زمین وصل شده است و از آنجاییکه کاتد به محفظه خلاء متصل می‌باشد کاتد نیز به زمین وصل است.



شکل ۳-۳: نمایی از دستگاه پلاسمای کانونی (SHUPF)

در قسمت مرکزی محفظه خلاء، آند (موقعیت ۲ در شکل ۳-۳) قرار دارد. آند استوانه‌ای از جنس مس به طول ۶ سانتی‌متر با سطح مقطع دایره به قطر ۱۹ میلی‌متر است که می‌توان آن را با آندی از جنس‌های مختلف جایگزین کرد. در اطراف آند، عایقی از جنس پیرکس به طول ۴ سانتی‌متر (موقعیت ۴ در شکل ۳-۳) است که قابلیت تعویض دارد. آند و عایق اطراف آن در شکل (۳-۳) به وضوح دیده می‌شوند.



شکل ۴-۳: آند و عایق اطراف آن

کاتد، شش عدد میله برنجی به ارتفاع ۶ سانتی‌متر و قطر ۱ سانتی‌متر که بر روی یک صفحه دایروی برنجی طراحی شده‌اند و در داخل محفظه خلاء قرار دارد (شکل ۳-۵).



شکل ۳-۵: کاتد دستگاه پلاسمای کانونی

در اثر اعمال اختلاف پتانسیلی بین آند و کاتد لایه جریان ابتدا بر روی عایق تشکیل می‌شود. سپس در اثر نیروی لورنتس این لایه به سمت بالای سطح آند حرکت کرده و در نهایت پلاسمای چگال تشکیل می‌شود.

انتهای دیگر آند که در بیرون از محفظه خلاء قرار دارد از طریق ۱۲ عدد کابل هم‌محور (موقعیت ۷ در شکل ۳-۳) به اسپارک‌گپ متصل شده است.

۲-۱-۲-۳ سیستم خلاء و فشارسنجی

سیستم پلاسمای کانونی در فشارهای پایین (از مرتبه چند تور) کار می‌کند بایستی در ابتدا محفظه خلاء را تخلیه کرد و سپس گاز مورد نظر را با فشار معلوم به آن تزریق نمود. محفظه خلاء بوسیله پمپ روتاری دومرحله‌ای مدل *VE280N* تخلیه می‌شود. این پمپ با ولتاژ ۲۲۰۷ برق شهر کار می‌کند. نرخ تخلیه آن

۲۲۶ $\frac{\text{L}}{\text{min}}$ است که با این نرخ تا فشاری در حدود 10^{-3} Torr رسید شکل (۳-۶). فشار داخل محفظه

از طریق یک فشارسنج پیرانی اندازه‌گیری می‌شود.



شکل ۳-۶: پمپ خلاء

۳-۱-۲-۳ سیستم تزریق گاز

در دستگاه پلاسمای کانونی از گازهایی چون آرگون، نیتروژن، نئون و دوتریم می‌توان بعنوان گاز کاری برای تولید پلاسمای استفاده کرد. در این پژوهش گاز آرگون با خلوص ۹۹/۹۹٪ بکار گرفته شده است. سیستم تزریق گاز شامل کپسول گاز، یک تنظیم کننده فشار و یک شیر سوزنی مدل swage lock می‌باشد. گاز آرگون پس از عبور از تنظیم کننده فشار به داخل یک لوله مسی به طول ۸۰ سانتی متر هدایت می‌شود که به شیر سوزنی متصل است و بوسیله آن میزان گاز تزریق شده به سیستم کنترل می‌شود.

۴-۱-۲-۳ سیستم تغذیه الکتریکی و کنترل الکترونیکی

به کمک سیستم تغذیه الکتریکی، ولتاژهای مورد نظر را میان آند و کاتد اعمال کنیم. این سیستم شامل ترانس و یکسوکننده‌ها، بانک خازنی، اسپارک‌گپ، تریگر و سیستم اتصال به زمین می‌باشد.

۳-۱-۲-۴ سیستم شارژ خازن

سیستم شارژ خازن از یک سیم‌پیچ ولتاژ بالا و یکسوکننده‌ها تشکیل شده است. با استفاده از این سیستم، برق شهر به ولتاژ مستقیم ۱۲ kv تبدیل می‌شود. همچنین ولتاژ خروجی قابل تغییر است. ترانس استفاده شده در این سیستم همواره در داخل روغن مخصوص ولتاژ بالا نگهداری می‌شود.

۳-۲-۱-۴-ب بانک خازنی

خازن دستگاه پلاسمای کانونی، یک خازن ولتاژ بالاست. ظرفیت این خازن $16 \mu F$ و ماکزیمم ولتاژ اعمالی $12kV$ می‌باشد. اگر اختلاف پتانسیل دو سر خازن v و ظرفیت خازن C باشد آن‌گاه انرژی ذخیره شده در خازن از رابطه $\frac{1}{2} CV^2$ محاسبه می‌شود که انرژی مربوط به این دستگاه $1/15 kJ$ است. شارژ کردن این بانک خازنی توسط دستگاه شارژر انجام می‌شود. این شارژر از برق $220 V$ شهر تغذیه می‌شود.

۳-۲-۱-۴-ت اسپارک‌گپ (گاف جرقه)

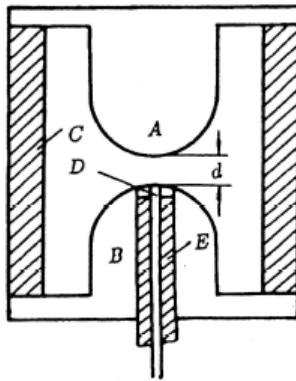
برای انتقال انرژی ذخیره شده در خازن به آند از اسپارک‌گپ استفاده شده است. پس از آن‌که خازن تا انرژی مورد نظر شارژ شد با انجام اتصال کوتاه بوسیله یک کلید (اسپارک‌گپ)، انرژی در مدار تخلیه می‌شود. در شکل (۳-۷) نمایی از اسپارک‌گپ نشان داده شده است.



شکل ۳-۷: اسپارک‌گپ (گاف جرقه)

این کلید قادر به تحمل ولتاژهای بالا و قدرت انتقال جریان چند صد کیلوآمپر را دارد. در اسپارک‌گپ جریان از طریق هوای یونیزه شده برقرار می‌شود. ساختار اصلی کلید (اسپارک‌گپ) در شکل (۳-۸) نشان داده شده است. اسپارک‌گپ بکارگرفته شده در دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود از نوع تریگاترون می‌باشد. این نوع اسپارک‌گپ شامل دو الکتروود A و B است که با فاصله d از هم جدا شده‌اند. الکتروودها یا بوسیله

جداره C که از یک ماده عایق (معمولا تفلون) ساخته شده است در یک محفظه بسته نگه داشته می‌شوند و یا بدون محافظ قرار می‌گیرند. در فاصله d بین الکترودها هوا وجود دارد. الکتروود سوم D، تریگر است و محل قرار گرفتن آن در مدار به طراحی آن بستگی دارد. نقش این الکتروود ایجاد شکست در هوای بین الکترودها و شروع تخلیه است.



شکل ۳-۸: ساختار اسپارک‌گپ نوع تریگاتورن

ولتاژ لازم بوسیله سیستم تریگر به الکتروود D اعمال می‌شود. بدین ترتیب فاصله d باید طوری تنظیم شود که قبل از رسیدن شارژ خازن به مقدار مورد نظر، شکست رخ ندهد و عمل تخلیه به طور کنترل شده و با استفاده از الکتروود D آغاز می‌شود. در ساختار تریگاتورن، الکتروود تریگر در داخل یکی از الکترودهای اصلی جاسازی شده است و بوسیله ماده عایق E از الکتروود جدا شده است.

۳-۲-۱-۴-ث سیستم تریگر

برای آن که ولتاژ بالا از یک قطب اسپارک‌گپ به قطب دیگر انتقال یابد از سیستم تریگر استفاده می‌شود. از طریق تریگر، پالس منفی (حدود 40 kV) به الکتروود میانی اسپارک‌گپ اعمال می‌شود. این تریگر به دو صورت دستی و اتوماتیک کار می‌کند. بدلیل آن که خازن باید بعد از مدتی شارژ و دشارژ شود

بهتر است از وضعیت دستی (مد پالسی) تریگرا استفاده شود. همچنین دامنه ولتاژ پالسی قابل تنظیم می‌باشد.

۳-۲-۱-۴-ج سیستم اتصال به زمین

سیستم اتصال به زمین دو سر خازن را بهم وصل می‌کند. در شکل (۳-۹) نمایی از سیستم اتصال به زمین نمایش داده شده است. این سیستم از یک آهنربا تشکیل شده است بطوریکه با اعمال ولتاژ دو سر خازن را از هم جدا می‌کند. در هنگام شارژ کردن خازن باید این سیستم روشن باشد و بلافاصله پس از تخلیه خازن بایستی آن را خاموش کرد. در هنگام خاموش بودن دستگاه پلاسمای کانونی، سیستم اتصال به زمین باید خاموش باشد زیرا موجب آسیب سیستم شارژ خازن خواهد شد.

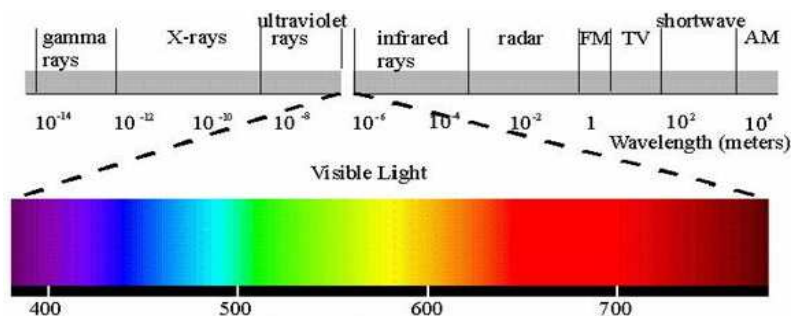


شکل ۳-۹: سیستم اتصال به زمین

۳-۲-۱-۵ سیستم تصویربرداری

تشخیص پلاسمای داغ، چگال و با طول عمری در حدود چند ده نانومتر نیازمند تجهیزات و روش‌های دقیق و کاربردی می‌باشد. استفاده از تکنیک‌های مناسب و مدرن در اندازه‌گیری پارامترهای پلاسمای آزمایشگاهی باعث درک صحیحی از اصول فیزیکی حاکم بر پدیده‌های پلاسمایی خواهد شد. طبقه‌بندی

این تکنیک‌ها بر اساس فرآیند فیزیکی و یا پارامترهای حاکم بر پلاسما می‌باشد که به طور مستقیم اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به مقیاس زمانی و ابعاد فضایی پدیده‌هایی که در دستگاه پلاسما کانونی اتفاق می‌افتند روش‌های اندازه‌گیری با قدرت تفکیک بالا امری ضروری است. همراه با تشکیل پلاسما تابش‌های الکترومغناطیسی از ریزموج تا محدوده ایکس ساخت نیز شکل می‌گیرند. در طیف الکترومغناطیسی تابش‌ها به پنج نوع عمده تقسیم می‌شوند همانطوریکه در شکل (۳-۱۰) نشان داده شده است این پنج ناحیه عبارتند از امواج رادیویی (شامل ریزموج)، نور (شامل فرابنفش، مرئی و فروسرخ)، تابش گرمایی، اشعه ایکس، اشعه گاما و اشعه کیهانی. چشم ما به ناحیه کوچکی از طیف الکترومغناطیسی (محدوده طول موجی ۳۸۰-۷۶۰ نانومتر) حساس است و با استفاده از تجهیزات و روش‌های خاصی قادر به درک نواحی مختلف طیف الکترومغناطیسی هستیم.

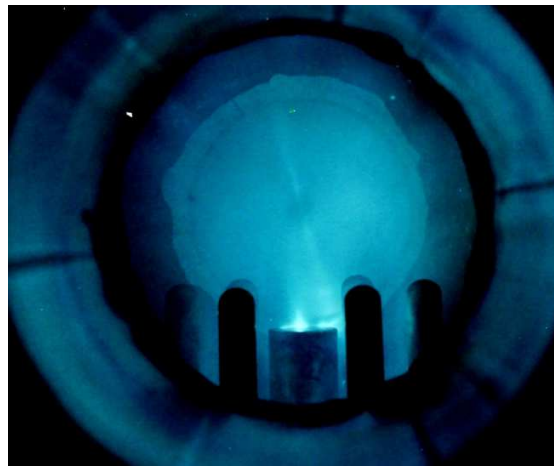


شکل ۳-۱۰: طیف الکترومغناطیسی

به منظور مطالعه ستون پلاسما و تابش‌های شکل گرفته در دستگاه پلاسما کانونی از سنجشگرهای الکتریکی و مغناطیسی، تصویربرداری به روش سایه‌نگاری لیزری، دوربین روزنه سوزنی استفاده می‌شود. تصویربرداری سریع به کمک دوربین دیجیتالی، ایده‌ای جالب برای اندازه‌گیری ستون پلاسما شکل گرفته در فشار و ولتاژهای مختلف است که در این تحقیق بکار گرفته شده است. همچنین در این تحقیق از ناحیه تنگش در ناحیه طیف مرئی تصویربرداری دیجیتالی شده است.

۳-۲-۱-۵-أ تصویربرداری در ناحیه مرئی با دوربین معمولی (آنالوگ)

طیف حاصل از پلاسمای شکل گرفته در دستگاه پلاسمای کانونی در ناحیه مرئی به ما امکان تصویربرداری به کمک دوربین آنالوگ را می‌دهد. برای تصویربرداری نیاز بود یک پنجره دید از جنس پلکسی‌گلاس^۱ طراحی و ساخته شود. با توجه به شدت نور حاصله از تشکیل پلازما با نصب فیلترهای کاهنده نور بر روی دوربین معمولی (آنالوگ) مدل *Zenit* ساخت کشور روسیه و استفاده از تکنیک بازنگهداشتن شاتر، امکان ثبت تصاویر از ستون پلازما فراهم می‌شود. قبل از تخلیه الکتریکی در دستگاه، دیافراگم دوربین در وضعیت باز قرار می‌گیرد و پس از اتمام تخلیه الکتریکی دیافراگم دوربین بسته می‌شود. با این کار نوری که شدت آن پس از عبور از فیلتر کاهش یافته است روی فیلم‌هایی با حساسیت ۱۰۰ و ۲۰۰ از شرکت فوجی و کونیکا ثبت می‌شود. در شکل (۳-۱۱) تصویر ستون پلاسمای آرگون نشان داده شده است.



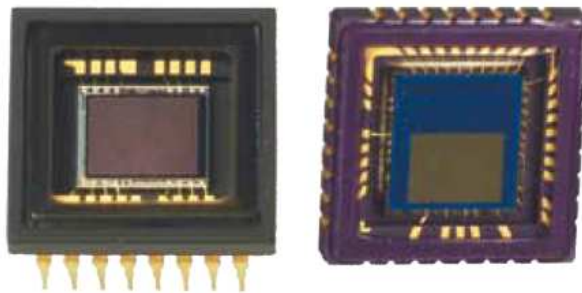
شکل ۳-۱۱: تصویر برداری از پلازما با دوربین آنالوگ

^۱ plexiglas

۳-۲-۱-۵-ب تصویربرداری در ناحیه مرئی با دوربین دیجیتال

در دوربین‌های دیجیتالی نور پس از عبور از عدسی به حسگر تصویر می‌رسد و تصویر بر روی آن ثبت می‌شود. در حسگرها اجزای تشکیل دهنده تصویر پیکسل نام دارد. پیکسل‌ها مقدار نور دریافتی را ثبت کرده و سپس آن را به فوتوالکترون تبدیل می‌کند. نوری که شدیدتر باشد الکترون‌های بیشتری تولید می‌شود. ولتاژ ایجاد شده بوسیله الکترون‌ها توسط تبدیل‌کننده آنالوگ به دیجیتال، به اعداد تبدیل می‌شوند. پردازش سیگنال تولید شده، توسط مدار الکترونیکی در دوربین صورت می‌گیرد. امروزه تکنولوژی تصویربرداری CCD^2 و $CMOS^3$

جایگزین مناسبی برای تصویربرداری با فیلم‌های متداول است که در حسگرهای تصویر به کار می‌روند. در شکل (۳-۱۲) حسگرهای تصویر CCD و $CMOS$ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۲: حسگر تصویر نوع $CMOS$ (سمت راست) و CCD (سمت چپ)

² Charg coupled diod

³ Complementary metal-oxide semiconductor

۳-۲-۱-۵-ت سیستم تصویربرداری از ستون پلاسما

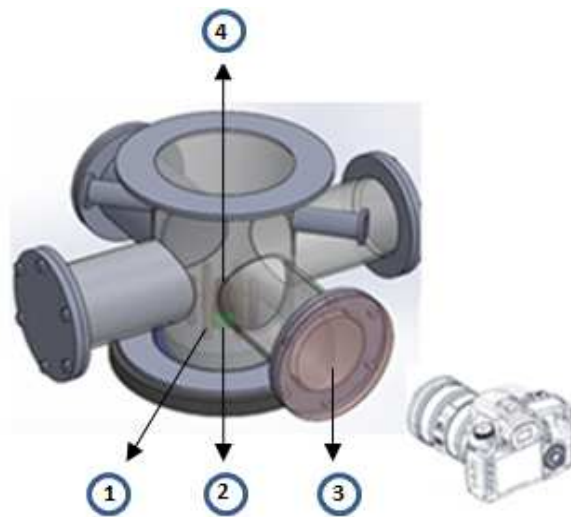
از یک دوربین دیجیتالی *DSLR* ساخت شرکت آمریکایی *Canon* جهت تصویربرداری از پلاسمای شکل گرفته استفاده می‌شود. با قرار دادن دوربین در فاصله 30 cm و نصب فیلتر روی عدسی آن، از ناحیه

پینچ

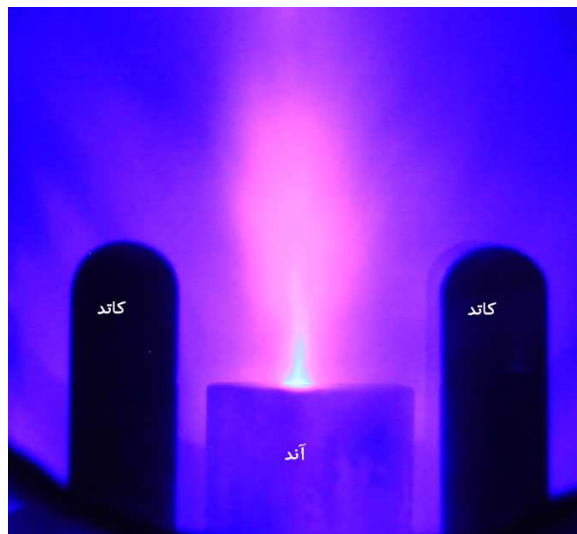
تصویربرداری انجام گرفت شکل (۳-۱۳). تصویربرداری تحت شرایط ولتاژ و فشارهای متفاوت با گاز

کاری آرگون انجام گرفته است. در هر عکس به‌خوبی می‌توان محدوده ستون پلاسمای تشکیل شده را

مشاهده کرد).



شکل ۳-۱۳: چیدمان عکسبرداری از پلاسما در دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود (*SHUPF*)، (۱) کاتد، (۲) عایق، (۳) پنجره دید (پلکسی)، (۴) آند



شکل ۳-۱۴: ستون پلاسما در ولتاژ ۹ کیلوولت و فشار ۱/۶ تور

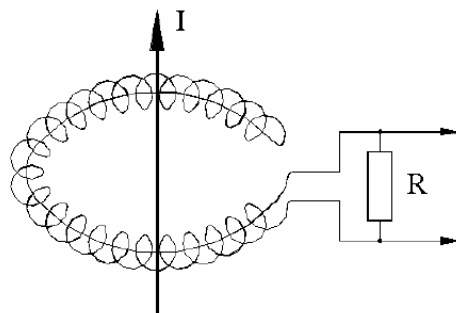
۳-۲-۱-۶ سیستم اندازه‌گیری ولتاژ و جریان

برای آن که بدانیم آیا پلاسما در یک دستگاه پلاسمای کانونی تشکیل شده است و در چه مدت زمانی تشکیل شده است باید سستی از ابزار تشخیصی استفاده کرد. تشخیص پلاسمای پالسی با طول عمر (۵۰-۲۰۰ ns) چگالی تقریباً 10^{26} ذره بر مترمکعب و دمای بالا در حدود 1 keV نیازمند تجهیزات و روش‌های تجربی خاص و دقیق است. از زمان تشکیل لایه جریان تا کانونی شدن پلاسما چند میکروثانیه طول می‌کشد و پایداری پلاسما از محدوده نانو ثانیه می‌باشد بنابراین بکارگیری ابزار اندازه‌گیری با قدرت تفکیک زمانی و مکانی مناسب امری ضروری است. در این تحقیق تنها از پروب ولتاژ بالا و پیچ‌روگوفسکی^۴ برای اندازه‌گیری زمان و کیفیت تنگش استفاده شده است. از پروب مغناطیسی برای مطالعه دینامیک لایه جریان پلاسما و ساختار آن استفاده می‌شود.

⁴ Rogofwski coils

۳-۲-۱-۶-أ پیچه روگوفسکی

برای اندازه‌گیری جریان انتقال‌یافته به ستون پلاسما از پیچه روگوفسکی استفاده می‌شود. پیچه روگوفسکی معمولاً در کاربردهایی که از تکنیک توان پالسی^۵ بهره می‌برند، بکار گرفته می‌شود تا جریان‌های بزرگ را به روش غیرمستقیم اندازه‌گیری کند. متداول‌ترین شکل پیچه روگوفسکی یک سیم‌پیچ چمبره‌ای است که به شکل یک حلقه درمی‌آید که از مرکز آن سیم برگشتی عبور می‌کند شکل (۳-۱۵) و جریان عبوری از سطح آن سیم عبوری از وسط سیم‌پیچ باعث از بین رفتن نویز شده و تغییرات جریان را اندازه‌گیری می‌کند. البته با محاسبات مربوطه می‌توان از پیچه روگوفسکی مشتق جریان را اندازه‌گیری کرد. پیچه روگوفسکی مورد استفاده دارای قطر اصلی ۱۶ cm و قطر فرعی ۱ cm می‌باشد. قطر سیم بکار برده‌شده در این پیچه ۱/۵ mm و تعداد دور آن ۲۸۰ دور می‌باشد. در این حالت ضریب کالیبراسیون ولتاژ نشان داده شده در اسیلوسکوپ $U = 1.4 V/KA$ است. به بیان دیگر ماکزیمم دامنه در خروجی اسیلوسکوپ را در عدد ۰/۲۵ باید ضرب کرد تا جریان عبوری از پلاسما برحسب کیلوآمپر بدست آید. پیچه روگوفسکی به دور یکی از سیم‌های متصل به آند، قرار گرفته است.



شکل ۳-۱۵: پیچه روگوفسکی

^۵ Pulsed power

در شکل (۱۶-۳) مدار معادل پیچه روگوفسکی نشان داده شده است. R_c و L بترتیب مقاومت و اندوکتانس سیم‌پیچ می‌باشد. I جریان تخلیه و i جریان عبوری از سیم‌پیچ هستند. معادله مدار بصورت زیر است.

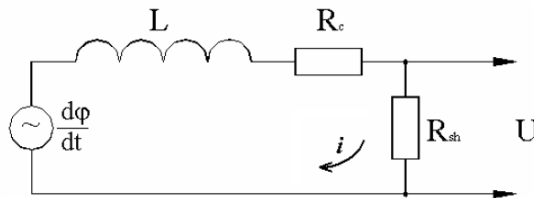
(۱-۳)

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

الف) اگر $L \frac{di}{dt} \geq (R_{sh} + R_c)i$ در اینصورت از معادله (۱-۳) میتوان نتیجه گرفت $i = \frac{k}{L_c} \times I$ (k ضریب کالیبراسیون می‌باشد) بنابراین ولتاژ خروجی با I متناسب است یعنی:

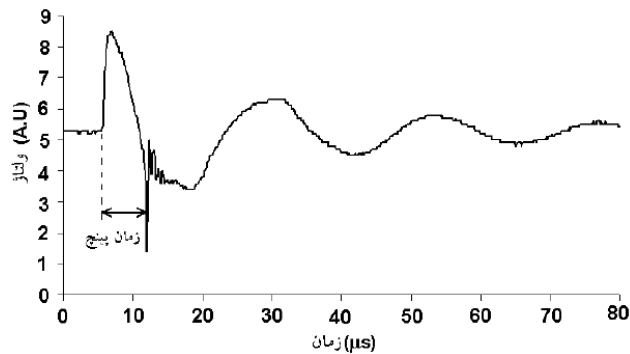
(۲-۳)

در این حالت پیچه روگوفسکی بعنوان پروب اندازه‌گیری جریان بکار می‌رود. $V_0 = R_{sh}i = \frac{R_{sh}k}{L_c} I$



شکل ۱۶-۳: مدار معادل پیچه روگوفسکی

برای آشکار سازی مشتق جریان از یک پیچه با سطح مقطع دایروی و بصورت یک استوانه استفاده می‌شود. تعداد دورهای این سیم‌پیچ ۱۰ دور است و در کنار یکی از سیم‌های متصل به آند قرار گرفته است. با استفاده از منحنی مشتق جریان، زمان پینچ را اندازه‌گیری می‌کنیم. در شکل (۱۷-۳) نمونه‌ای از منحنی مشتق جریان حاصل از دستگاه پلاسمای کانونی SHUPF نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۷: سیگنال مشتق جریان

۳-۲-۱-۶-ب کالیبراسیون پیچه روگوفسکی

برای یک پیچه روگوفسکی تعیین ضریب کالیبراسیون پارامتری مهم محسوب می‌شود که در اندازه‌گیری ضریب کالیبراسیون رابطه (۳-۳) مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$I_1 = \frac{\pi C_0 V_0 (1+f)}{T} \quad (۳)$$

C_0 ظرفیت خازن، V_0 ولتاژ اولیه خازن، T دوره تناوب سیگنال جریان (مقدار میانگین چندین تناوب)،

$f = \frac{1}{4} \left(\frac{V_5}{V_4} + \frac{V_4}{V_3} + \frac{V_3}{V_2} + \frac{V_2}{V_1} \right)$ نسبت عکس I_1 مقدار اولین پیک جریان تخلیه می‌باشد. با استفاده از

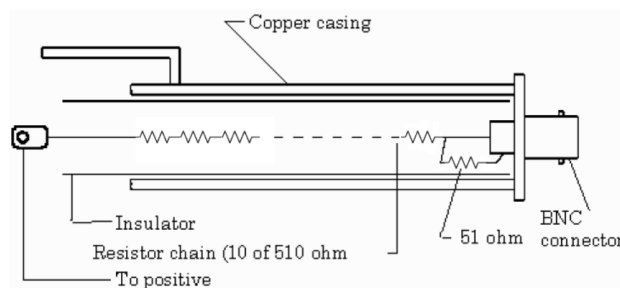
مقادیر موجود از اسلیسکوپ برای f و T می‌توان مقدار I_1 را محاسبه کرد و در نهایت ضریب

کالیبراسیون از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$k_1 = \frac{I_1}{V_1} \left(\frac{A}{V} \right) \quad (۴-۳)$$

۳-۲-۱-۶-ت پروب ولتاژ

با استفاده از پروب ولتاژ، مقدار اختلاف پتانسیل بین دو قسمت ولتاژ بالای دستگاه پلاسمای کانونی (آند) و زمین اندازه‌گیری می‌شود. پروب ولتاژ به‌عنوان مقسم ولتاژ از نوع مقاومتی می‌باشد که در شکل (۳-۱۸) نشان داده شده است. در این شکل اجزای تشکیل دهنده مقسم شامل ۱۰ عدد مقاومت ۵۱۰ اهمی و یک مقاومت شنت^۶ نشان داده شده است.

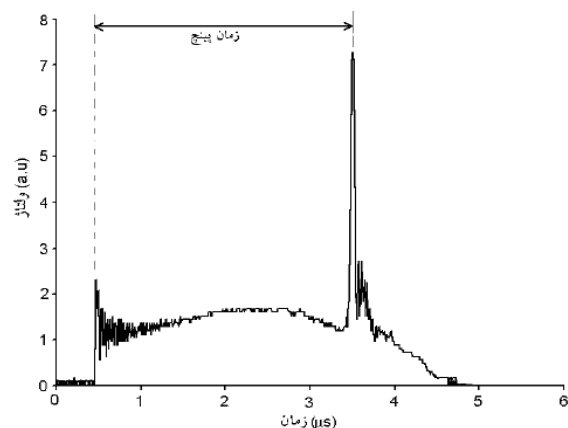


شکل ۳-۱۸: پروب ولتاژ

با استفاده از این وسیله مقدار ولتاژ تا ۱۰۰ برابر کاهش می‌یابد. این مقسم ولتاژ با یک لوله مسی پوشیده می‌شود. این لوله به‌عنوان کاهنده نویز نیز عمل می‌کند. یکی از منحنی‌هایی که در تحلیل داده‌ها خیلی مهم است، سیگنال مربوط به ولتاژ الکتریکی می‌باشد. این سیگنال از پروب ولتاژ حاصل می‌شود که جزئیات آن در فصل اول شرح داده شده است. پروب ولتاژ مستقیماً به آند متصل است. با استفاده از اطلاعات در شکل (۳-۱۹) نمونه‌ای از منحنی مربوط به ولتاژ را می‌توان مشاهده کرد. پیک اول در این شکل بیانگر مرحله شکست است که اولین مرحله در دستگاه پلاسمای کانونی می‌باشد. فاصله زمانی بین دو پیک، نشانگر مدت زمانی است که لایه جریان در فازهای شعاعی و محوری گذرانده تا پلاسمای تنگیده

^۶ shunt

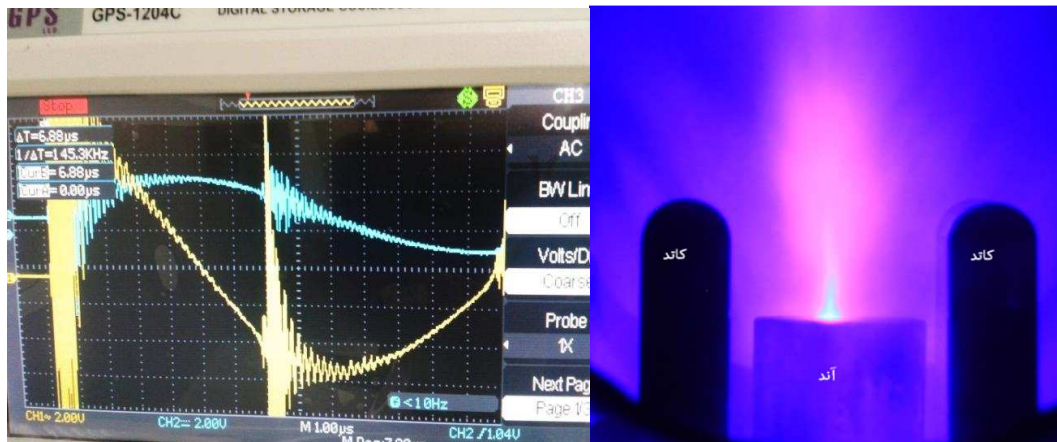
شود. فاصله زمانی بین دو پیک، زمان پینچ را نشان می‌دهد. در برخی از موارد پیک‌های دوم و سوم نیز تشکیل می‌شود که بیانگر پینچ‌های دوم و سوم است.



شکل ۳-۱۹: سیگنال ولتاژ

۳-۲-۱-۷ سیستم داده‌گیری

از طریق یک اسیلوسکوپ چهارکاناله 200 MHz ، سیگنال‌های ولتاژ، جریان و مشتق جریان قابل نمایش است و همچنین می‌توان این سیگنال‌ها را از طریق کابل *USB* ذخیره کرد. نمونه سیگنال مربوط به جریان و مشتق جریان در شکل (۳-۲۰) نشان داده شده است. منحنی زرد رنگ مربوط به جریان و منحنی آبی رنگ سیگنال مربوط به مشتق جریان می‌باشد. پیک ظاهر شده در سیگنال مشتق جریان نشانگر تشکیل پلازماست که این پیک از تغییرات سریع اندوکتانس در داخل پلازما ایجاد شده است.



شکل ۳-۲۰: نمونه سیگنال مربوط به جریان و مشتق جریان

در شکل (۳-۲۰) افت شدید در منحنی مشتق جریان بیانگر تشکیل پینچ است. این افت به دلیل تغییرات سریع اندوکتانس پلازما می‌باشد که باعث افت شدید در منحنی مشتق جریان می‌شود. فاصله زمانی بین افت شدید و نقطه خیزش مشتق جریان را زمان پینچ می‌نامند. زمان پینچ با ولتاژ کاری رابطه معکوس دارد یعنی با افزایش ولتاژ در فشار ثابت، زمان پینچ افزایش می‌یابد. شکل‌گیری پینچ در منحنی مشتق جریان بهتر دیده می‌شود.

۳-۳ عایق‌ها

در انجام آزمایشات از عایقی به جنس پیرکس و طول‌های $\frac{3}{5}$ ، 4 ، $\frac{4}{5}$ و 5 سانتی‌متر به ضخامت 2 mm و قطر داخلی 20 cm استفاده شده است. شکل (۳-۲۱). آزمایشات با گاز کاری آرگون در بازه فشاری $\frac{1}{6}$ – 1 تور با گام $\frac{0}{2}$ و ولتاژهای 7 ، 8 و 9 کیلوولت انجام شده‌اند. در آزمایشات با هر یک از عایق‌ها در هر یک از فشارهای 1 ، $\frac{1}{2}$ ، $\frac{1}{4}$ ، $\frac{1}{6}$ تور حدود 20 شات زده شد. منحنی جریان و مشتق جریان برای هر شات ذخیره گردید.



شکل ۳-۲: عایق‌هایی با طول متفاوت

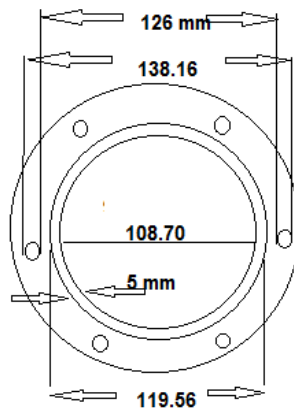
۳-۳-۱ تعویض عایق

برای تعویض عایق در آزمایشات باید به نکات زیر توجه داشت:

- اطمینان از خاموش بودن سیستم و پمپ خلاء
- باز کردن و بستن متقارن پیچ‌های سیستم
- خارج کردن صفحه کاتد قبل از خارج‌سازی عایق
- پیچاندن آهسته عایق در خلاف جهت عقربه‌های ساعت برای خارج کردن
- جایگذاری عایق جدید و پیچاندن آهسته عایق در جهت عقربه‌های ساعت
- جایگذاری صحیح و متقارن صفحه کاتد
- تمیز کردن و گریس‌کاری صحیح اورینگ‌های استفاده شده در سیستم

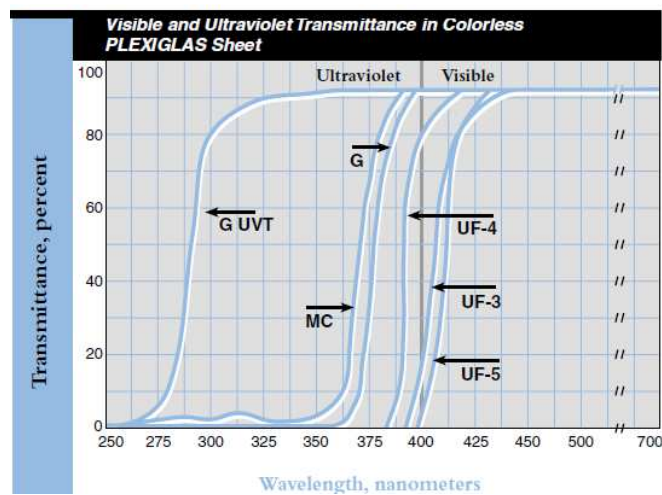
۳-۴ پنجره دید

جنس پنجره دید از پلک‌سی‌گلاس انتخاب شده است. پلک‌سی‌گلاس نام تجاری ورقه‌های پلاستیک آکرلیک است که در رنگ‌های گوناگونی در بازار وجود دارد. نوع بدون رنگ آن همانند شیشه شفاف اما سبکتر از آن بوده، به راحتی شکل می‌گیرد و در ساخت بسیاری از ادوات به کار می‌رود. جنس پلک‌سی‌گلاس به گونه‌ای است که در ناحیه طیفی مرئی دارای ۹۲٪ عبور، ۸٪ بازتاب و کمتر از ۰/۵٪ جذب می‌باشد.



شکل ۳-۲۲: نمای روبه‌رو از پنجره پلکسی‌گلاس

پلکسی‌گلاس انواع گوناگونی دارد که میزان جذب تابش UV برای هر یک از آن‌ها متفاوت است. همچنانکه در نمودار (۳-۲۳) مشاهده می‌شود، بیشترین جذب مربوط به پلکسی‌گلاس نوع $UF-4$ است. به‌دلیل خواص اپتیکی، شکل‌دهی آسان و نرخ ارزان آن به‌عنوان پنجره دید مورد استفاده قرار گرفت. پس از ساخت و طراحی پنجره دید، آن را بر روی دستگاه نصب کرده و برای تصویربرداری بکار گرفته می‌شود.



شکل ۳-۲۳: میزان تراگسیل انواع پلکسی‌گلاس در ناحیه طیفی مرئی و فرابنفش

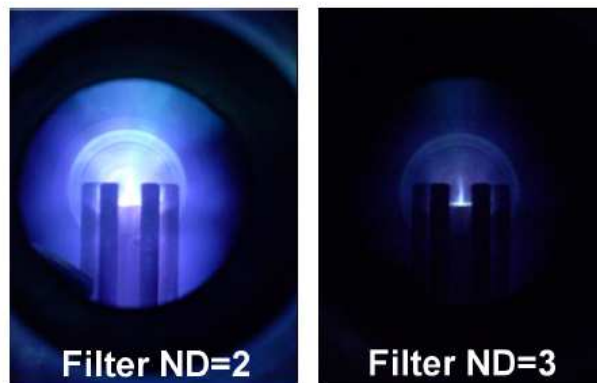
۳-۵ فیلتر

برای کاهش شدت نور حاصله از تشکیل و کانونی شدن پلازما از یک فیلتر تراکم خنثی^۷ (ND) در مقابل عدسی دوربین استفاده می‌شود. فیلترهای nd از شیشه نیمه تراوا ساخته شده و برای آنکه شدت تمامی طول‌موج‌های طیف مرئی را به یک نسبت کاهش می‌دهد و تغییری در رنگ ایجاد نمی‌کند، ND نام‌گذاری شده است. در شکل (۳-۲۴) دو نمونه از این فیلترها نشان داده شده است که فیلتر شماره ۱ نسبت به فیلتر شماره ۲ شدت نور را بیشتر می‌کاهد. در انجام آزمایشات برای تصویربرداری از ناحیه پینچ از فیلترهای ND مختلف استفاده شد تا با کاهش شدت نور، ستون پلازما و ناحیه پینچ بهتر در تصاویر ثبت شود شکل (۳-۲۵).



شکل ۳-۲۴: فیلترهای ND مختلف

⁷ Neutral density filter (ND)



شکل ۳-۲۵: تصویربرداری از ستون پلاسما با فیلترهای مختلف [۶۱]

۳-۶ روش انجام آزمایش‌ها

در این تحقیق با تغییر سه پارامتر ولتاژ آند-کاتد، فشار کاری و طول عایق؛ زمان تنگش، ارتفاع و شکل ستون پلاسما اندازه گیری شد. در انجام آزمایش‌ها ابتدا محفظه خلاء تا فشاری در حدود 0.001 torr تخلیه می‌شود. سپس با تزریق گاز آرگون، فشار درون محفظه را به مقدار مورد نظر در آزمایش می‌رسانیم. پس از شارژ خازن تا ولتاژ کاری مورد نظر بوسیله یک سیستم شارژر، انرژی ذخیره شده در خازن به وسیله یک کلید توان بالا از نوع گاف جرقه^۸ به الکترودهای دستگاه منتقل شده و تخلیه الکتریکی میان آند و کاتد با زدن کلید تریگر انجام می‌پذیرد. تخلیه‌های اولیه با هدف آماده سازی سیستم و عملکرد بهتر آن انجام می‌گیرد. مطابق جدول (۳-۲) تحت شرایط مختلف، اثر ولتاژ، فشار و طول عایق بر زمان تنگش، مورد مطالعه قرار گرفته است. زمان تنگش بوسیله نوسان‌نما اندازه‌گیری و داده‌های مربوطه ذخیره می‌شود. برای یک مجموعه شرایط (ولتاژ، فشار و طول عایق مشخص) حداقل ۲۰ مرتبه آزمایش تکرار می‌شود. تصویربرداری از ناحیه تشکیل پینچ تحت شرایط مختلف آزمایش انجام می‌گیرد و تاثیرات ولتاژ، فشار و طول عایق بر ارتفاع پلاسما بررسی می‌شود.

^۸ Spark

ولتاژ (kv)	فشار (torr)	طول عایق (cm)
۷	۱	۳/۵
۸	۱/۲	۴
۹	۱/۴	۴/۵
	۱/۶	۵

جدول ۲-۳ : شرایط انجام آزمایش‌ها

فصل چہارم

تحلیل و نتائج

۴ فصل چهارم: تحلیل و نتایج

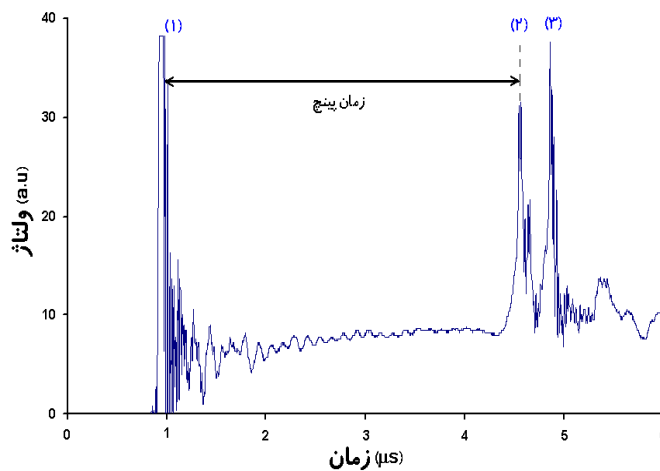
۴-۱ مقدمه

در این فصل مشاهدات آزمایشگاهی دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود (*SHUPF*)، تحلیل و نتایج اندازه‌گیری‌های بدست آمده پرداخته شده است. در بخش اول این فصل آزمایشات و نتایج اولیه از عملکرد دستگاه بیان شده است. بخش دوم نتایج حاصله از بررسی اثر فشار و ولتاژ بر زمان پینچ برای سه عایق بکارگرفته شده با طول‌های متفاوت توضیح داده شده است. بخش سوم تاثیر شرایط مختلف آزمایش (فشار، ولتاژ و طول عایق) بر ارتفاع و شکل پلاسمای به روش عکسبرداری از ناحیه پینچ بیان شده است.

۴-۲ آزمایشات اولیه در جهت بررسی عملکرد دستگاه

در بررسی عملکرد دستگاه پلاسمای کانونی (*SHUPF*)، بخش اولیه آزمایشات با عایقی بطول 4 cm در فشارهای کمتر از 1 torr و ولتاژهای $7, 8$ و 9 کیلوولت با گاز کاری آرگون صورت پذیرفت. در بررسی اثر فشار (ولتاژ) بر زمان پینچ‌شدگی ولتاژ (فشار) را ثابت نگهداشته و پارامتر فشار (ولتاژ) را تغییر می‌دهیم، برای کسب نتایج دقیق‌تر در هر فشار و ولتاژ، 10 شات می‌زنیم. یکی از پارامترهای مهم و قابل‌اندازه‌گیری در دستگاه پلاسمای کانونی، ولتاژ است که سیگنال حاصل از آن حاوی اطلاعات مفیدی در مورد دینامیک پلاسمای است. این سیگنال در عمل توسط پروب ولتاژ بدست می‌آید و پروب ولتاژ مستقیماً به آند وصل است. منحنی مربوط به ولتاژ، بیشتر در دستگاه‌های نوع مدر بکار می‌رود. با استفاده از این اطلاعات می‌توان فاصله زمانی حرکت لایه جریان بین دو فاز محوری و شعاعی را بدست آورد. در شکل (۴-۱) نمونه‌ای از سیگنال

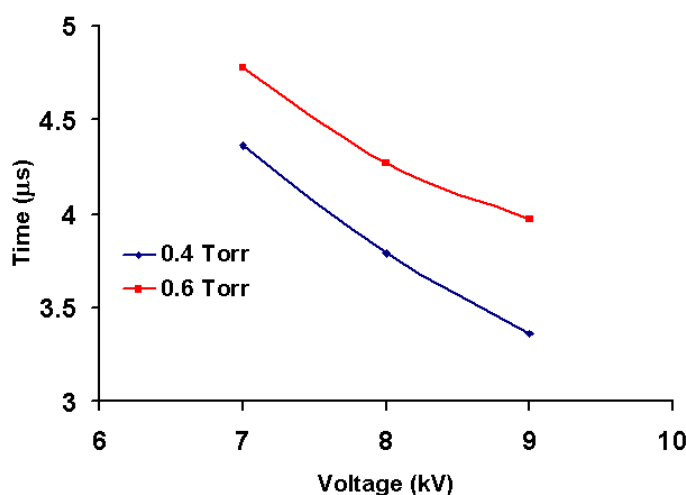
ولتاژ نشان داده شده است. زمان کانونی شدن (پینچ) پلاسما، بازه زمانی بین شروع تخلیه الکتریکی یعنی از ابتدای فاز شکست تا اولین پیک ظاهر شده (پیک (۲)) بعد از پیک (۱) (نشان داده شده در شکل ۴-۱) در سیگنال ولتاژ می‌باشد. پیک (۱) بیانگر شروع فاز شکست می‌باشد که در روی سطح عایق تشکیل می‌شود. فاصله زمانی بین پیک مربوط به فاز شکست و پیک (۲) بیانگر فاز محوری می‌باشد. بعد از پیک (۲) فاز شعاعی بلافاصله شروع شده و بعد از آن پلاسما در اثر ناپایداریهای سوسیسی و تابی از بین می‌رود. پیک شماره (۳) بیانگر این است که فرایند چند پینچی اتفاق افتاده است. این فرایند بیانگر آن است که در هنگام تخلیه الکتریکی اولیه صد درصد گاز موجود در داخل محفظه خلاء در فرایند کانونی شدن پلاسما شرکت نمی‌کند بلکه بخشی از آن در روی سطح عایق و همچنین اطراف آن باقی می‌ماند که بعد از اولین پینچ به بالای سطح آند رسیده و پلاسمای کانونی دوم نیز تشکیل می‌شود.



شکل ۴-۱: نمونه‌ای از سیگنال ولتاژ

افشارمنش و همکارانش چگالی گاز باقی‌مانده را از مرتبه $10^{16} m^3$ گزارش کرده‌اند که این مقدار حدود ده درصد از چگالی گاز اولیه داخل محفظه است.

در آزمایشات اولیه برای اندازه‌گیری زمان پینچ‌شدگی از سیگنال حاصل از پروب ولتاژ و اسیلسکوپ چهار کاناله 200 MHz با قابلیت ذخیره‌سازی اطلاعات استفاده شد. در شکل (۲-۴) منحنی تغییرات زمان پینچ بر حسب ولتاژ در این دستگاه در دو فشار 0.4 و 0.6 تور و همچنین ولتاژهای 7 ، 8 و 9 کیلوولت نشان داده شده است.



شکل ۲-۴: تغییرات زمان پینچ بر حسب ولتاژ در عایق با طول 4 cm

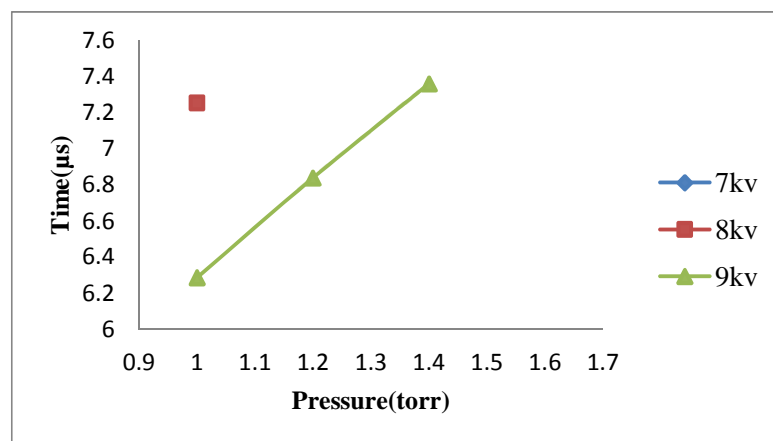
با توجه به اینکه مطالعه تاثیر ولتاژ اعمالی و همچنین فشار گاز کاری استفاده شده در آزمایشات از اهمیت زیادی در تشکیل پلازما و همچنین انتقال انرژی زیاد به ستون پلازما برخوردار می‌باشد، آزمایشات اولیه در دستگاه پلاسمای کانونی (*SHUPF*) تحت شرایط مختلف فشار و ولتاژ آزمایشات انجام گرفت. نتایج اولیه بدست آمده نشان می‌دهند که با افزایش ولتاژ زمان لازم برای پینچ شدن کاهش پیدا کرده است. با افزایش ولتاژ سرعت لایه جریان در فازهای محوری و شعاعی افزایش می‌یابد که منجر به سریع رسیدن لایه جریان به بالای سطح آند خواهد شد و این منجر به تشکیل پلازما در جریان بالا می‌شود. یکی دیگر از نتایج مربوط به شکل (۲-۴) این است که با افزایش فشار زمان رسیدن پلازما به بالای سطح آند بیشتر

خواهد شد. به بیان دیگر با افزایش فشار جرم مربوط به لایه جریان بیشتر شده در نتیجه سرعت آن کاهش یافته و زمان رسیدن لایه جریان به بالای سطح آند بیشتر خواهد شد. نتایج اولیه نشان می‌دهد با افزایش ولتاژ، زمان پینچ شدن کاهش و همچنین با افزایش فشار، مدت زمان لازم برای کانونی شدن افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج اولیه آزمایشات، دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود در فشارهای بالاتر از ۱ تور عملکرد بهتری دارد بنابراین با تغییر محدوده فشار آزمایش‌ها را انجام می‌دهیم.

۳-۴ بررسی اثر ولتاژ، فشار و طول عایق بر زمان پینچ

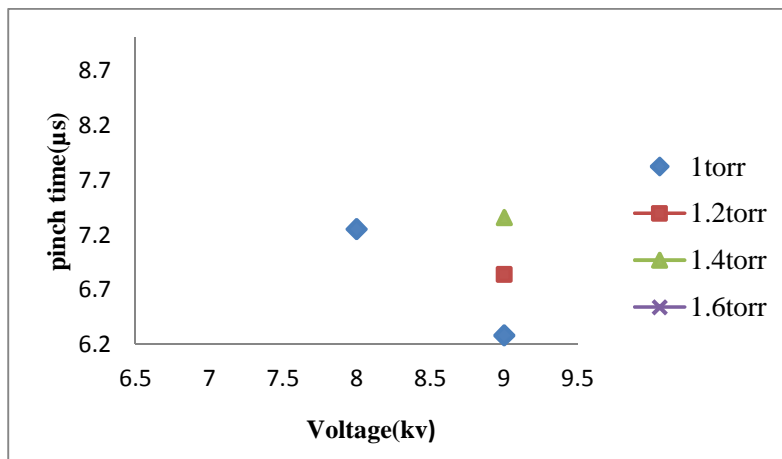
۱-۳-۴ عایق شماره ۱

آزمایشات با عایقی از جنس پیرکس بطول ۳/۵ سانتی‌متر در ولتاژهای ۷، ۸ و ۹ کیلوولت در فشارهای ۱، ۱/۲، ۱/۴ و ۱/۶ با گاز کاری آرگون انجام گرفت. در دستگاه پلاسمای کانونی بدلیل آن که وقوع پینچ از مرتبه چند صد نانوثانیه است برای اندازه‌گیری زمان تنگش از سیگنال مشتق جریان حاصل از پیچه روگوفسکی بر روی نوسان‌نما استفاده کردیم. بر اساس نمودار شکل (۳-۴) نتایج زیر از این عایق بدست آمد.



شکل ۳-۴: تغییرات زمان پینچ در اثر تغییرات فشار در عایق شماره ۱

- ✓ در ولتاژهای ۷ و ۸ کیلوولت در فشارهای ۱/۲، ۱/۴، ۱/۶ پلاسما در بالای سطح آند بعلت نداشتن تکانه کافی تشکیل نمی‌شود و پینچ‌شدگی مشاهده نمی‌شود.
- ✓ در ولتاژ ۹ کیلوولت با افزایش فشار، زمان پینچ کاهش می‌یابد.
- ✓ در ولتاژ ۹ کیلوولت و فشار ۱/۶ تور پینچی تشکیل نمی‌شود این امر بدلیل افزایش جرم لایه پلاسما و کافی نبودن انرژی در ولتاژ ۹ کیلوولت برای حرکت لایه جریان و فشرده‌سازی پلاسماست.



شکل ۴-۴: تغییرات زمان پینچ در اثر تغییرات ولتاژ در عایق شماره ۱

نتایج حاصله از شکل (۴-۴) نشان می‌دهد:

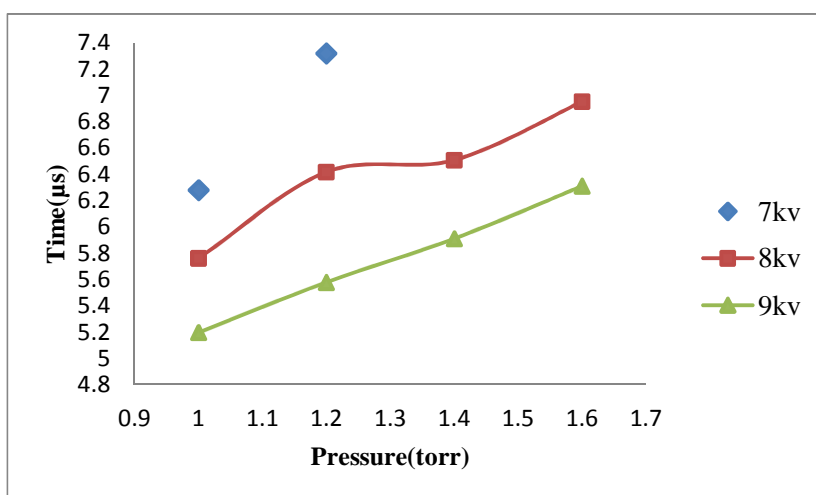
- ✓ در ولتاژ ۹ کیلوولت با افزایش فشار، زمان پینچ افزایش یافته است. به سبب آن که جرم لایه جریان افزایش یافته است و سرعت آن کاهش می‌یابد و با افزایش زمان فاز محوری، زمان پینچ افزایش می‌یابد.

✓ در ولتاژ ۷ کیلوولت در هیچ یک از فشارها، پینچی تشکیل نشده است. زیرا در این ولتاژ پیستون مغناطیسی انرژی لازم برای حرکت دادن لایه جریان به بالای سطح آند را نخواهد داشت.

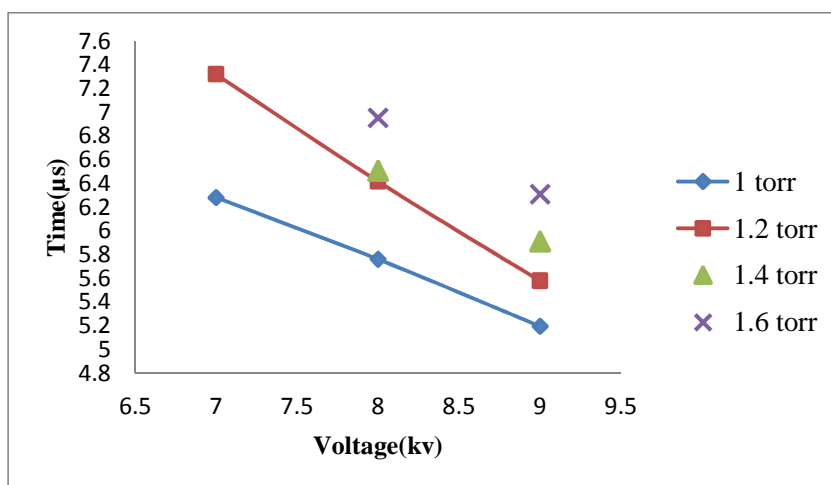
✓ در ولتاژ ۸ کیلوولت در فشارهای ۱/۴ و ۱/۶ تور، پلاسما تشکیل نشده است.

۴-۳-۲ عایق شماره ۲

عایق شماره ۲ بطول ۴ cm در دستگاه جایگذاری شده و تحت شرایط یکسانی (ولتاژ و فشار) مطابق با عایق شماره ۱ آزمایشات انجام گرفته است.



شکل ۴-۵: تغییرات زمان پینچ در اثر تغییرات فشار در عایق شماره ۲ به طول ۴



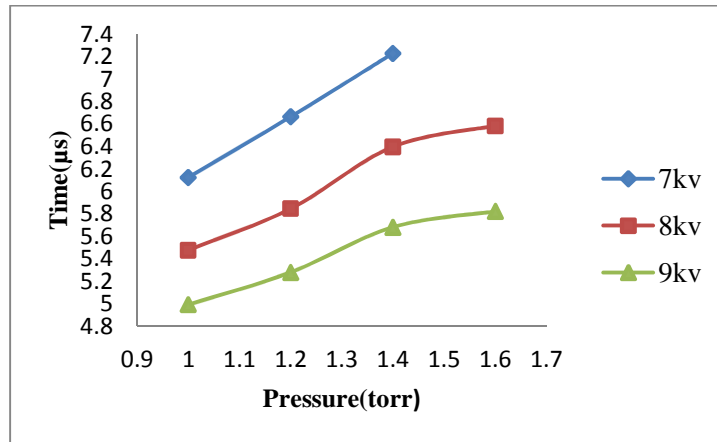
شکل ۴-۶: تغییرات زمان پینچ در اثر تغییرات ولتاژ در عایق شماره ۲

نتایج بدست آمده از عایق شماره ۲ عبارتند از:

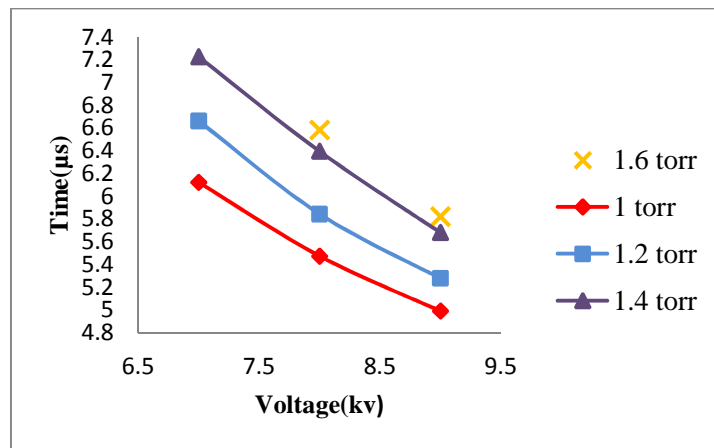
- ✓ پایین بودن میزان انرژی در ولتاژ ۷ کیلوولت در فشار ۱/۴ و ۱/۶ تور و تشکیل نشدن پلاسما
- ✓ افزایش زمان پینچ با افزایش فشار
- ✓ کاهش زمان پینچ با افزایش ولتاژ

۴-۳-۳ عایق شماره ۳

با قرار دادن عایق شماره ۳ به طول $4/5 \text{ cm}$ و شرایطی مشابه قبل آزمایشها انجام گرفت. همانطور که در شکل (۴-۷) نشان داده شده است در این عایق نیز همانند عایقهای ۱ و ۲ با افزایش فشار، زمان پینچ افزایش و با افزایش ولتاژ، زمان پینچ کاهش می یابد. نمودارهای بدست آمده در ولتاژها و فشارهای مختلف برای عایق شماره ۳ نشان می دهد در این عایق نسبت به عایقهای شماره ۱ و ۲ زمان پینچ کاهش یافته است. همچنین در ولتاژ ۷ کیلوولت و فشار ۱/۶ تور، پینچ اتفاق نمی افتد.



شکل ۴-۷: تغییرات زمان پینچ در اثر تغییرات فشار در عایق شماره ۳



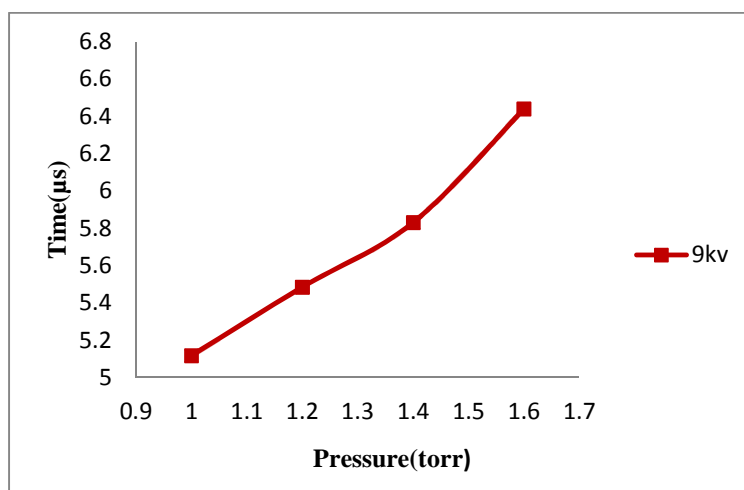
شکل ۴-۸: تغییرات زمان پینچ در اثر تغییرات ولتاژ در عایق شماره ۳

۴-۳-۴ عایق شماره ۴

۱-۴-۳-۴ بررسی اثر تغییرات فشار بر زمان کانونی شدن

آزمایش‌ها با عایقی به طول 5CM در ولتاژهای ۷، ۸ و ۹ کیلوولت در فشارهای ۱، ۱/۲، ۱/۴، ۱/۶ تور و با گاز کاری آرگون ادامه یافت. در هر ولتاژ و فشار حدود ۲۰ شات زده شده است و با متوسط‌گیری، زمان پینچ برای هر ولتاژ و فشار بدست می‌آید. پس از انجام آزمایش نمودارهای حاصل از سیگنال جریان و مشتق جریان مورد تحلیل و بررسی قرار گرفتند. در شکل (۴-۹) منحنی تغییرات زمان پینچ در اثر

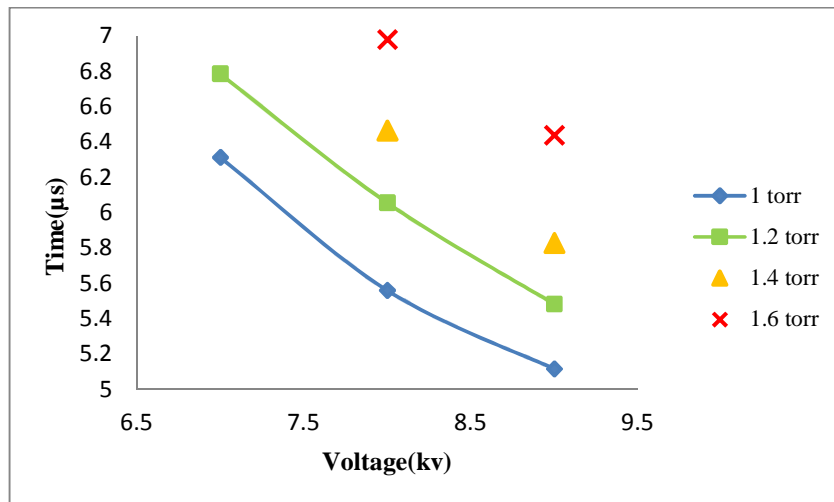
تغییرات فشار در ولتاژ ۹ کیلوولت نشان داده شده است. همان طوری که انتظار داشتیم با افزایش فشار در یک انرژی خاص، زمان فاز محوری افزایش یافته است.



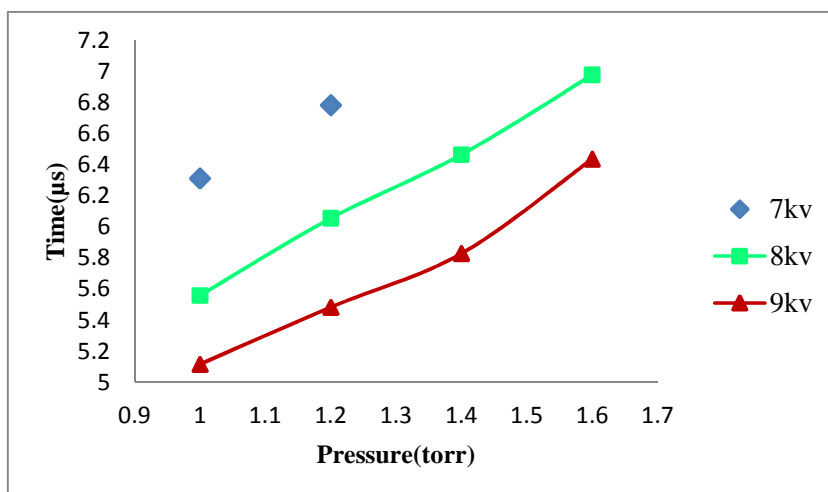
شکل ۴-۹: تغییرات زمان پینچ بر اثر فشار در ولتاژ ۹ کیلوولت

۴-۳-۲ بررسی اثر ولتاژ بر زمان کانونی شدن پلاسما

تغییرات ولتاژ به طور مستقیم بر زمان پینچ اثر می‌گذارد. افزایش ولتاژ سبب افزایش نیروی محرکه وارده بر لایه پلاسما می‌شود در نتیجه لایه پلاسما سریعتر حرکت کرده به انتهای آند می‌رسد و تنگش زودتر اتفاق می‌افتد.



شکل ۴-۱۰: تغییرات زمان پینچ در اثر ولتاژ

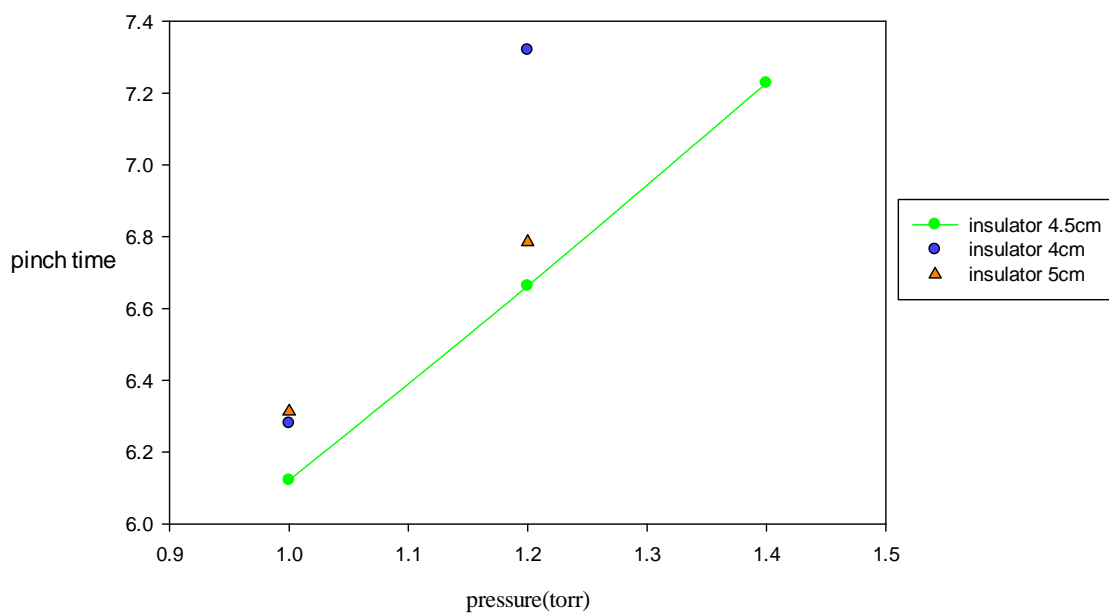


شکل ۴-۱۱: تغییرات زمان پینچ در اثر فشار

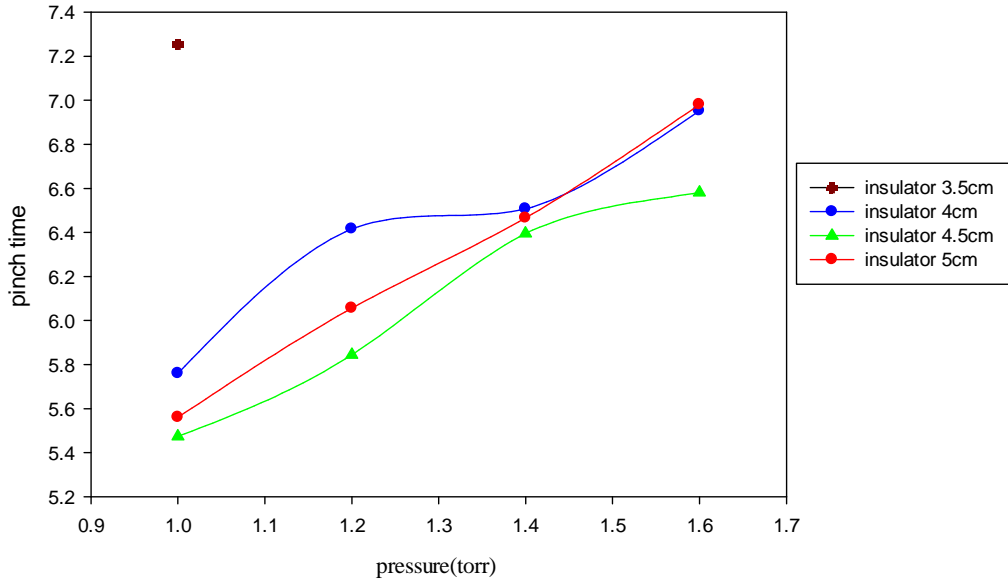
مطابق شکل (۴-۱۱) در فشارهای $1/4$ و $1/6$ در ولتاژ ۷ کیلوولت، تشکیل پلاسما مشاهده نشد و این نتیجه با توجه به تأثیر فشار بر سرعت و جرم لایه جریان قابل توجیه است. با افزایش فشار، جرم لایه جریان بیشتر شده در نتیجه سرعت آن کاهش یافته که منجر به کاهش شتاب و نرسیدن لایه به محور آند جهت تشکیل پلاسما خواهد شد. همچنین بدلیل کاهش ولتاژ، پیستون مغناطیسی انرژی لازم برای فشرده‌سازی ستون پلاسما را نخواهد داشت.

۴-۴ مقایسه زمان کانونی شدن پلاسما در عایق‌هایی با طول متفاوت

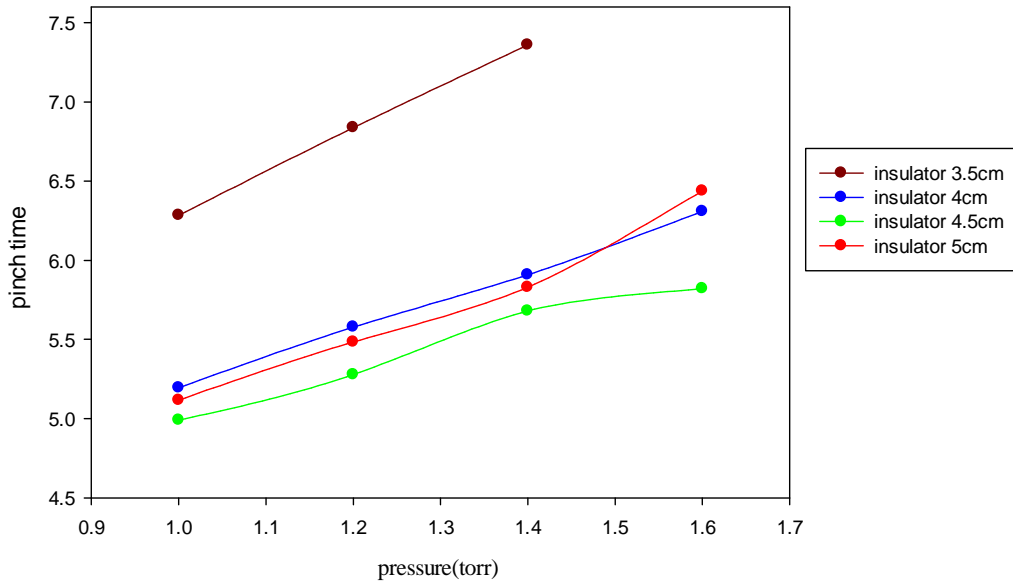
در شکل‌های ۴-۱۲ الی ۴-۱۴ تغییرات زمان تشکیل پلاسما بر حسب فشار برای چهار عایق با طول‌های متفاوت در ولتاژهای مختلف نشان داده شده است. در همه شکل‌ها افزایش فشار موجب افزایش زمان تشکیل پلاسما شده است. با افزایش فشار میزان جرم لایه جریان افزایش یافته که منجر به کاهش سرعت لایه جریان و یا افزایش زمان تشکیل پلاسما خواهد شد. همچنین زمان لازم برای تشکیل پلاسما با عایق شماره ۱ به طول ۳/۵ سانتی‌متر نسبت به دیگر عایق‌ها افزایش بیشتری یافته است. به‌عبارت دیگر با مقایسه اشکال زمان لازم برای تشکیل پلاسما در هنگام استفاده از عایق شماره ۳ به طول ۴/۵ سانتی‌متر در مقایسه با دیگر عایق‌ها کاهش یافته است. این نتایج نشان می‌دهند که استفاده از عایق شماره ۳ بهتر می‌باشد. زیرا کاهش زمان یعنی داشتن سرعت بیشتر که موجب تشکیل پلاسما در جریانهای بالاتر خواهد شد. طول بهینه عایق برای عملکرد مناسب دستگاه پلاسما کانونی SHUPF عایق به طول ۴/۵ سانتی‌متر است که در کمتر از این طول و بیشتر از آن زمان تشکیل پلاسما افزایش یافته است.



شکل ۴-۱۲: تغییرات زمان کانونی شدن برحسب فشار در ولتاژ ۷ کیلوولت



شکل ۴-۱۳: تغییرات زمان کانونی شدن برحسب فشار در ولتاژ ۸ کیلوولت

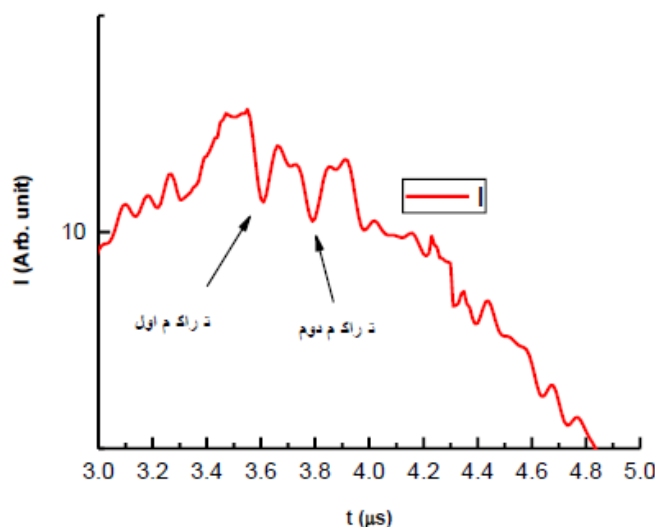


شکل ۴-۱۴: تغییرات زمان کانونی شدن برحسب فشار در ولتاژ ۹ کیلوولت

۵-۴ تصویربرداری از ناحیه پینچ

۱-۵-۴ عایق شماره ۱

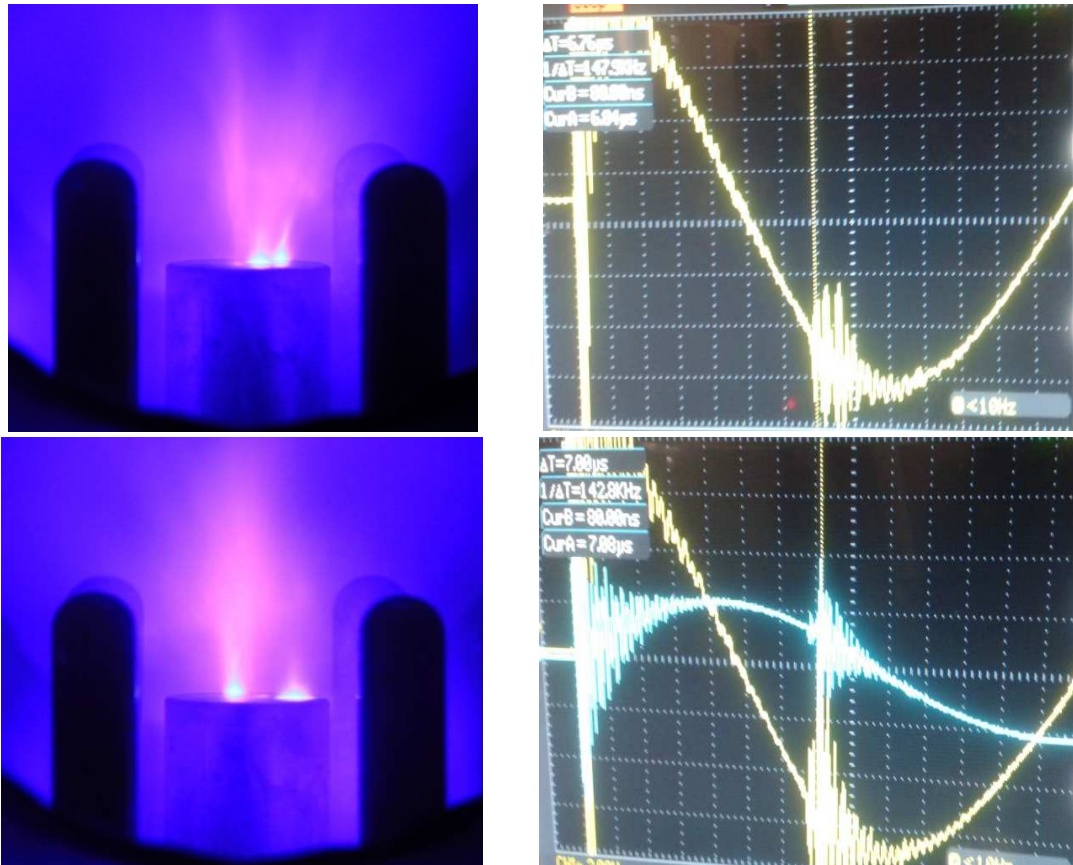
پدیده چندپینچی مربوط به تشکیل بیش از یک لایه جریان در دستگاه پلاسمای کانونی پیشتر توسط محمدی و همکارانش گزارش شده است. هنگامیکه بخشی از گاز یونیزه شده توسط لایه جریان اولیه جاروب نمی‌شود، لایه جریان دوم و یا حتی سوم شکل خواهد گرفت اما مکانیسم دقیقی برای ساختار چندپینچی وجود ندارد و تابع شرایط کاری اعم از ولتاژ، فشار و نوع گاز می‌باشد. افشارمنش و همکارانش به کمک سیگنال جریان تشکیل چندپینچی را اثبات کردند و فاصله زمانی میان دو پینچ را ۲۷۵ نانوثانیه اندازه‌گیری نمودند (شکل ۴-۱۵).



شکل ۴-۱۵: سیگنال جریان پدیده دوپینچی در ولتاژ ۱۳ کیلوولت و فشار ۲ تور [۶۲]

در هر یک از عایق‌هایی که ما استفاده کردیم به دنبال مطالعه این پدیده افت سیگنال مشتق جریان، پیک‌های سیگنال پروب ولتاژ در تشخیص و تمایز چندپینچی بکار گرفته شده است. علاوه بر آن برای ثبت پدیده چندپینچی به کمک دوربین دیجیتالی از مکان تشکیل تنگش تصویربرداری شده است (شکل ۴-۱۶).

با باز نگهداشتن شاتر دوربین در مدت زمان تخلیه الکتریکی، حسگر دوربین یک تصویر تجمعی از پلاسمای تشکیل یافته را ثبت می کند.



شکل ۴-۱۶: تصاویر چندپینچی و سیگنال مشتق جریان در فشار 1 torr ، ولتاژ 9 KV و عایق $3/5 \text{ cm}$

۴-۵-۲ عایق شماره ۲

با عکسبرداری به کمک دوربین دیجیتالی همراه با فیلترهای مناسب کاهنده شدت نور تغییرات در اندازه ستون پلازما در فشارهای مختلف در ولتاژ 9 کیلوولت مورد مطالعه قرار گرفت. در شکل (۴-۱۷) تصاویر ستون پلازما مشاهده می شود.



فشار 0.8 torr ، ولتاژ 9 KV ، طول عایق 4 cm



فشار 1 torr ، ولتاژ 9 KV و طول عایق 4 cm



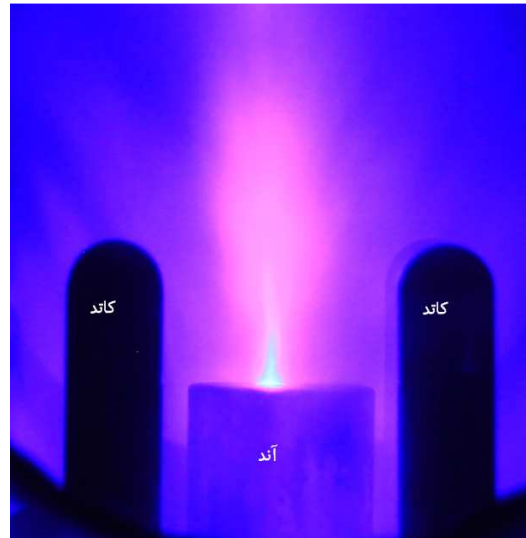
فشار 1.2 torr ، ولتاژ 9 KV ، طول عایق 4 cm



فشار 1.4 torr ، ولتاژ 9 KV ، طول عایق 4 cm



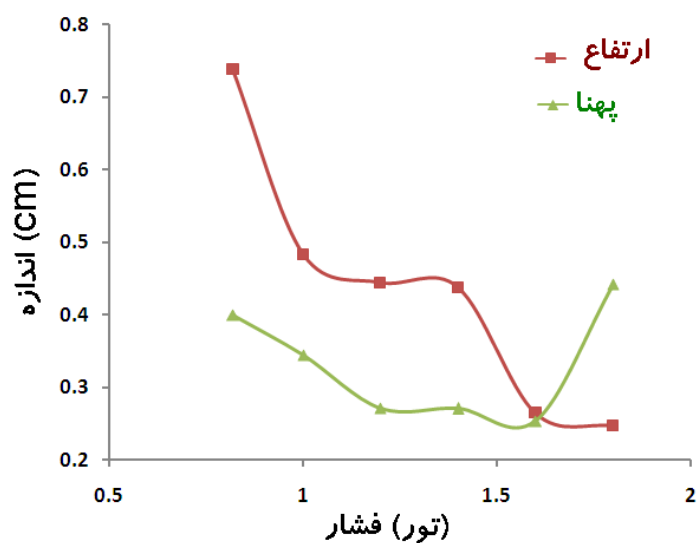
فشار $1/6$ torr ولتاژ 9 KV طول عایق 4 cm



فشار $1/8$ torr ولتاژ 9 KV طول عایق 4 cm

شکل ۴-۱۷: تصاویر ستون پلاسما در فشارهای مختلف در ولتاژ 9 کیلوولت

در منحنی شکل (۴-۱۸) تغییرات ارتفاع و پهنای ستون پلاسما بر حسب فشار نشان داده شده است. مینیمم مقدار پهنای در فشار $1/6$ تور با مقدار 0.25 سانتی متر می باشد. نتایج تجربی حاصله نشان می دهند که پهنای ستون پلاسما در همه فشارها کمتر از ارتفاع آن می باشد. این امر بیانگر این است که در راستای شعاعی و رو به سمت محور آند نیروی حاصله از فشار مغناطیسی خیلی بیشتر بوده و موجب کشیدگی ستون پلاسما در راستای محور و رو به سمت بالای آند می شود. با توجه به اینکه در بهتر کانونی شدن ستون پلاسما پهنای و ارتفاع کمترین مقدار می باشد بنابراین فشار $1/6$ تور برای این دستگاه در ولتاژ 9 کیلوولت برای گاز کاری آرگون و عایقی به طول 4 سانتی متر شرایط بهینه می باشد. در این هنگام ستون پلاسما بیشتر کانونی شده در نتیجه اشعه ایکس نرم که عمدتاً از ستون پلاسما گسیل می گردد، بیشتر خواهد شد.



شکل ۴-۱۸: منحنی تغییرات پهنا و ارتفاع پلاسما در فشارهای مختلف در ولتاژ ۹ کیلوولت

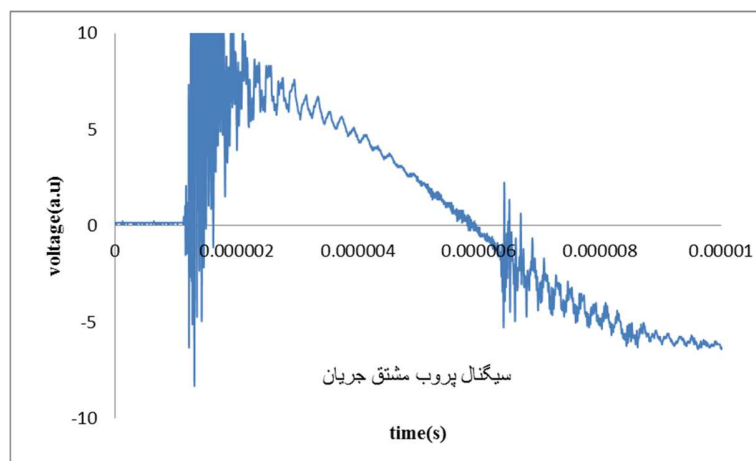
یکی دیگر از نتایج جالبی که با استفاده از این سیستم تصویربرداری گرفتیم مشاهده پدیده چندپینچی است. شکل (۴-۱۹) نمونه‌ای از تصویر پدیده چندپینچی را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۹: تشکیل دوپینچی در فشار ۱ torr و ولتاژ ۹ KV

در این شکل بطور واضح دو تا پینچ در بالای سطح آند تشکیل یافته است که اولی درست در روی محور و دومی در کنار اولی تشکیل یافته است. دلیل تشکیل چندپینچی را می‌توان به این صورت بیان نمود که

مقداری از گاز بعد از مرحله شکست از لایه جریان عقب افتاده سپس به بالای سطح آند رسیده است. یعنی دو عدد لایه جریان پشت سر هم حرکت نموده و در نهایت باعث تشکیل دو تا پینچ شده‌اند. در شکل (۴-۲۰) نمونه سیگنال مشتق جریان مربوط به پدیده چندپینچی نشان داده شده است.

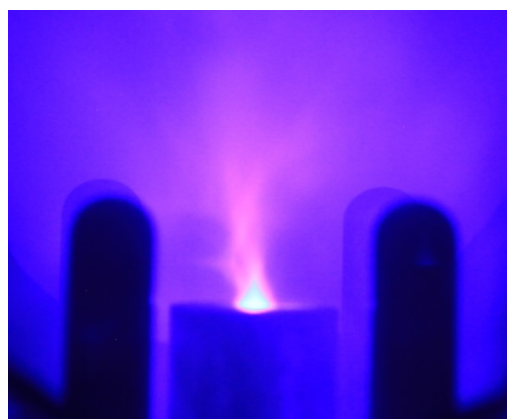


شکل ۴-۲۰: نمونه سیگنال مشتق جریان در پدیده چندپینچی در فشار ۱ تور

۴-۵-۳ عایق شماره ۳



فشار ۱/۲ torr، ولتاژ ۹ KV، طول عایق ۴/۵cm



فشار ۱ torr، ولتاژ ۹ KV، طول عایق ۴/۵cm

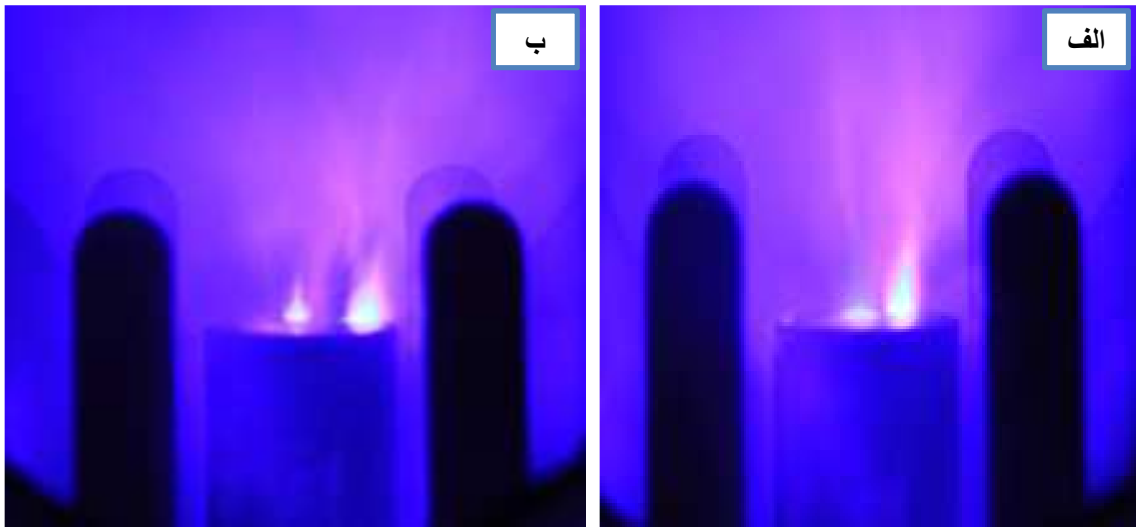
فشار $1/6$ torr، ولتاژ 9 KV، طول عایق $4/5$ cmفشار $1/4$ torr، ولتاژ 9 KV، طول عایق $4/5$ cm

شکل ۴-۲۱: تصاویر پلاسمای تشکیل یافته در عایق بطول $4/5$ سانتی‌متر

با تصویربرداری از ستون پلازما و مقایسه ابعاد پلازما در عایق $4/5$ سانتی‌متر در ولتاژ 9 کیلوولت از پهنای ستون پلازما کاسته شده است و در فشار $1/6$ تور کمترین پهنای بدست آمده است.

۴-۵-۴ عایق شماره ۴

تصویربرداری از ناحیه تشکیل پلاسمای کانونی برای عایق بطول 5 سانتی‌متر در فشار 1 تور، ولتاژ 9 کیلوولت برای ثبت پدیده دوپینچی انجام گرفت. در شکل (۴-۲۲) دو تصویر از تشکیل پینچ تحت شرایط یکسان آزمایش نشان داده شده است.



فشار ۱ torr، ولتاژ ۹ KV، طول عایق ۵cm

فشار ۱ torr، ولتاژ ۹ KV، طول عایق ۵cm

شکل ۴-۲۲: تصاویر دوپینچی در عایق به طول ۵ سانتی متر

پینچ اول بر اثر ناپایداری‌های پلاسما در حال از بین رفتن است که پینچ دوم شکل گرفته است. با استفاده از منحنی جریان مشتق، زمان پینچ برای هر یک از پینچ‌ها اندازه‌گیری شده است. فاصله زمانی میان تشکیل این دو پینچ برای شکل (۴-۲۲ب) کمتر از ۱۰۰ نانوثانیه است.

۴-۶ نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه تاثیر طول عایق، ولتاژ و فشار بر زمان پینچ پلاسما در دستگاه پلاسما کانونی SHUPF بررسی شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، عایق به طول ۴/۵ سانتی متر کمترین زمان پینچ پلاسما را داراست. از دیگر نتایج می‌توان به تاثیر تغییرات فشار و ولتاژ بر زمان پینچ در چهار طول متفاوت عایق اشاره کرد؛ با افزایش ولتاژ، زمان پینچ کاهش و با افزایش فشار زمان پینچ افزایش می‌یابد. در ادامه به مطالعه شکل پلاسما حاصله از دستگاه پلاسما کانونی به روش عکسبرداری دیجیتالی پرداختیم. با این روش موفق به ثبت تصاویر جالب توجه از پدیده چندپینچی شده‌ایم و عکسبرداری دیجیتالی را

به‌عنوان روشی موفق در مطالعه شکل پلاسمای معرفی می‌کنیم زیرا یکی از مزایای این روش، ثبت رویداد انجام گرفته برای هر شات (تخلیه الکتریکی) در دستگاه پلاسمای کانونی است.

پیشنهادات

با توجه به مطالعه اثر ارتفاع عایق بر زمان تشکیل پلاسمای و بدست آمدن طول بهینه برای عایق دستگاه پلاسمای کانونی می‌توان برای انجام مطالعاتی در آینده موضوعات زیر پیشنهاد می‌شود.

۱. بررسی اثر ارتفاع عایق بر میزان اشعه ایکس تولید شده در دستگاه پلاسمای کانونی
۲. بررسی اثر چندپینچی بر میزان اشعه ایکس
۳. مطالعه مکانیسم پدیده چندپینچی و مدلسازی این پدیده
۴. شبیه‌سازی فاز شکست و نحوه شکل‌گیری لایه جریان روی سطح عایق

- [1] J.W.mather (1971), “dense plasma focus, methods of experimental physics”; **academic press**, pp.187
- [2] S. Bing “comparative study of dynamics and x-ray emission of several plasma focus devices”, in school of science. 2000, nanyang technological university
- [3] Chen.f.f (1986), “**introduction to plasma physics and controlled fusion**”, vol. 1, springer, New York. Second edition
- [4] J.W. Mather (1965), **phys. fluids**, vol. 8(2): p. 366.
- [5] Filippov n, f.t., and vinogradov v, **fusion suppl**, (1962). pt. 2: p.577.
- [6] K. takao, t. Honda, I. kitamura, k. masugata, (2003). **Plasma sources sci. technol.** 12.p.407.
- [7] M. Hassan, a. qayyum, r. Ahmad, g. murtaza, m. zakaullah, **j. phys. d: appl.phys.** 40 (2007) p.769.
- [8] T. zhang, j. lin, a. patran, d. wong, s.m. hassan, s. mahmood, t. white, t.l. tan,s.v. springham, s. lee, p. lee, r.s. rawat, (2007) **plasma sources sci. technol.**16 250.
- [9] S. Ahmad, m. shafiq, m. zakaullah, a. waheed, (2006) **appl. phys. Lett.** 89 (6).
- [10] p. silva, j. Moreno, l. Soto, l. birstein, R.E. mayer, w. kies, (2003) **appl. phys. lett.** 8383.3269.
- [11] S. lee and et al; “a simple facility for the teaching of plasma dynamics and plasma nuclear fusion”; **am. J. physic** 56, no.1
- [12] Verma.rishi., R.s.Rawat, p. lee, s. lee, s.v. springham, t.l. tan and m. krishnan. (2009) “effect of cathode structure on neutron yield performance of a miniature plasma focus device” **physics letters .a.** 373.pp. 2568–2571
- [13] n. talukdar, n.k. neog and t.k. borthkur (2013) “**effect of anode shape on pinch Structure and x-ray emission plasma focus device**” **results in physics.** 3. 142–151
- [14] H.r. yousefi, F.M. aghamir, k. masugata, “effect of the insulator length on mather-type plasma focus devices” (2007). **Physics letters a** 361.p. 360–363
- [15] Donges a, herziger g, krompholz h, ruhl f and schonbach k (1980) “the breakdown Phase in a coaxial plasma gun” **phys.lett.** 76a, 391.

- [16] S. lee, y.h. Chen, s.p. chow, B.C. tan, H.H. Tek and s.p. thong (1972). *int. j. elect.*33, 85
- [17] H. Schmidt (1987), “formation of different phases in plasma focus” in *proc. 2nd Latin American workshop on plasma phys and contr. thermonucle fusion, Medellin*, vol.12, p. 1.
- [18] J.w. Mather (1971) “in methods of experimental physics” edited by h.griem and r.lovberg, *academic press*, vol. 9, pt. b, p. 187.
- [19] A. jeffresy and t .taniuti (1966), in *magnetohydrodynamic stability and termonuclear Containment*
- [20] Y. h. Chen and s. lee (1973) “**coaxial plasma gun in mode 1 operation**” *int. j. elect.* 35,341.
- [21] A. serban, “anode geometry and focus characteristics”, *ph.d thesis, nanyang Technological university*, (1995)
- [22] G.r. Neil and R.S. post (1981), *plasma phys.*, 23, 425
- [23] T. zhang, and ET. Al (2006), “**drive parameter as a design consideration for mather and filippov types of plasma focus**” *IEEE transactions on plasma science*, vol. 34, no.5
- [24] C. Moreno, et al. (2006). “**0.2 hz plasma-focus-based source of fast neutrons and hard x-rays for applications**”, cp875, *plasma and fusion science* edited by j. j. e. herrera-Velazquez, American institute of physics
- [25] Lee, s.h., s.l. yap, and c.s. Wong, (2010) “**euv emission study of a 600 joules small plasma focus device**”. *Aip conf. proc.*, 1250(1): p. 444-447.
- [26] C.morenot m. venere, r.b., m.del Fresno, r. Ramos, h.bruzzone, florado p.j. Gonzalez, and a.clausse, (2002) “**industrial applications of plasma focus radiation**” *Brazilian journal of physics*. 32.
- [27] Ye.p.bogolubov, m.v.k., b.d.lemeshko, v.i.mikerov, v.n.samosyuk, p.p.sidorov, d.i.yurkov,(2009) “**application of a plasma focus-based source for fast neutron and x-ray radiography**” *nuclear instruments and methods in physics research*. 605: p. 62-64.
- [28] M. akel, sh. al-hawat, s. lee, (2009) “**numerical experiments on soft x-ray emission optimization of nitrogen plasma in 3 kj plasma focus sy-1 using modified lee model**”, *j fusion energ* 28, p. 355–363
- [29] D.j. Elliott *microlithography, process technology for IC fabrication*. 1986, new York: mcgraw-hill

[30] S. hussain and et al. (2004) "**low energy plasma focus as an intense x-ray source for radiography**". *plasma science and technology*, 6(3): p. 2296.

[31] V. raspa, et al (2004), "**plasma focus as a powerful hard x-ray source for ultrafast imaging of moving metallic objects**". *Scielo*. p. 1696-1699.

[۳۲] دارستانی فراهانی. ن و عباسی دوانی. ف، (۱۳۹۰) " بررسی قابلیت دستگاه پلاسمای کانونی SHUPF1 به عنوان چشمه اشعه ایکس مناسب برای تصویربرداری درون نگرانه. کنفرانس فیزیک ایران

[33] S.hussain, et al. (2003) "**plasma focus as a high intensity flash x-ray source for biological radiography**". *Journal of fusion energy*, 22(3): p. 195

[34] I.v. fomenkov, et al (2004), "**euv discharge light source based on a dense plasma Focus operated with positive and negative polarity**". *Journal of physics d: applied Physics*, 37(23): p. 3266-3276.

[35] H.r. yousefi, y.n., h. ito and k. masugata, (2007) "**characteristic observation of the ion beams in the plasma focus device**". *Plasma and fusion research: regular articles.vol.2: p. p.s1084.*

[36] H. kellyy, a. leponey, a. m´arquezy, d. lamasz and c. oviedox (1996) "**coating on metallic samples produced by a small energy plasma focus**". *plasma sources sci. technol.* 5 704–709. Printed in the UK

[37] m. omrani, m. habibi, r. amrollahi and a. khosravi (2012) "**improvement of corrosion and electrical conductivity of 316l stainless steel as bipolar plate by tin nanoparticle implantation using plasma focus**". *international journal of hydrogen energy* 37 14676-14686

[38] G.M. el-aragi. (2010) "**neutron and ion beams emitted from plasma focus (112.5 j) device**", *plasma science and technology.vol.12, no.1.*

[39] M. sadiq, M.S., a. waheed, r. Ahmad, m. zakaullah, (2006) "**amorphization of silicon by ion irradiation in dense plasma focus**". *Physics letters*, 352 a: p. 2006

[40] S. lee, *theoretical basis: plasma focus model (radiative)-s lee model*, <http://www.intimal.edu.my/school/fas/uf/f/>.

[41] S. lee, "**scaling of the plasma focus viewpoint from dynamics**", *international plasma focus symposium at kudowa, Poland, July 1998*

[42] S. lee (1983), "**an energy-consistent snow-plough model for pinch design**". *j.phys.d:appl. phys.* 16, 2463

[43] S. lee and a. serban, "**dimensions and lifetime of the plasma focus pinch**", *IEEE Trans. on plasma phys.* 24(1996)1101-1105

- [44] S.Bing, in "comparative study of dynamics and x-ray emission", PhD thesis, nanyang technological university .chapter 5
- [45] R. shukla and a. shyam (2013) "**repetitive operation of the capacitor bank of the low-voltage miniature plasma focus at 50 hz**", review of scientific instruments 84, 106112
- [46] Donges a, herziger g, krompholz h, ruhl f and schonbach k (1980) "**the breakdown phase in a coaxial plasma gun**" phys.lett. 76a, 391.
- [47] Ming fang Lu (1996) "**different modes of plasma sheath motion in the radial compression and pinch phases in plasma focus**" j. phys. d: appl. phys. 29 p. 660–680. Printed in the UK.
- [48] m. mohammadi , r .verma, s. sobhanian, c. wong ,s. lee, s .v. springham, t. tan, p. lee and r. rawat (2007) "**neon soft x-ray emission studies from the unu-ictp plasma focus operated with longer than optimal anode length**" plasma sour. sci. tech.16 785.
- [49] M. kashani and k.sato (2002) "**cathode effects in plasma focus discharge**"
- [50] M.zakaullah and i. ahmad (1993) "**effect of insulator sleeve contamination on the low energy plasma focus performance fusion engineering and design**" 23. 359-365
- [51] s. goudarzi, s. m hoseinian and a. raeisdana (2014) "**experimental results of breakdown in "dena" plasma focus device**" conference series 516, 012031
- [52] h.r.yosefi, F.M. aghamir and k.masugata, (2007)"**effect of the insulator length on mather type plasma focus devices**" physics letters a. 361306-363
- [53] J.m. koh, et al., plasma sources sci. technol. 14 (2005) 12.
- [54] Mohammad Ali mohammadi dorbash "laser shadiwgraphic study on plasma focus device" PhD thesis, (2009)
- [55] p. lee, r.s. rawat (2003) "**effects of insulator sleeve length on neutron and x-ray emissions from deuterium filled dense plasma focus device**" fusion and plasma phys eca vol. 27a, p-1.208
- [56] H.R. yousefi, F.M. aghamir, k. masugataa (2007) "**effect of the insulator length on mather-type plasma focus devices**" physics letters a 361 p.360–363
- [57] Young June hong, min wug moon, ki baek song, Phil yong oh, byoung hee hong, Hee myung shin, eun ha choi (2007) "**influence of insulator length on the downstream electron temperature and electron density in the coaxial electrode of plasma focus device**" IEEE.

[58] I. m. ivanova-stanik, l. karpinski, m. scholz (2003) "influence of the insulator parameters on discharge in small plasma focus device" *acta physica slovacica vol. 53 no. 6, 417- 421*

[59] S. koohestani, m. habibi, r. amrollahi, r. baghdadi and a. roomi (2011) "effect of quartz and pyrex insulators length on hard-x ray signals in apf plasma focus device" *fusion energy 30:68-71*

[60] A. Tarifeño-saldivia, e. ramos-moore, p. ferrari and l. soto (2012) "understanding the insulator conditioning process fast plasma focus discharges" *journal of physics: conference series 370 012060*

[61] Ariel esteban tarifeño-saldivia "estudio experimental de una descarga plasma focus rapida operada en el rango de decenas de joules emitiendo neutrones", (2011), *PhD thesis*

[۶۲] افشارمنش محسن و حبیبی مرتضی، ۱۳۸۹ "تشکیل چند لایه جریان در دستگا پلاسمای کانونی امیرکبیر اثر آن بر تابش اشعه ایکس" انجمن فیزیک ایران

Abstract

Due to limited resources, a human needs to find new energy sources. One of these energy sources are derived from response fusion. In order to provide safe energy from the fusion process , plasma focus device for the first time in 1960 and independently in both America and the Soviet Union was built on the model of Mather and Filippof. The major difference between two models is the ratio anode radius to its length.

Using plasma focus devices can be pulsed plasma lifetime of the high-temperature and high-density produced about. The pulsed plasma focus device as a source of X-rays, energetic ions, relativistic electrons and high energy neutron (if using deuterium gas) is considered later this year. Plasma focus devices have many applications such as medical industry, ion implantation, radioisotope production (if using deuterium gas), troubleshooting bodies is the fast and lithography. Various parameters involved in the optimization of plasma focus devices. These parameters can be the geometric parameters of the anode, cathode and insulating materials used in the device is also noted. Other parameters that are easier to change, working gas pressure, gas type and what are the voltage changes. This study is important in optimizing the parameters of the device. In this thesis given the significant role of these parameters on the performance plasma focus devices, the impact on the formation of plasma high voltage insulation and pressure is investigated.

Key Word: plasma focus device, insulator, discharge current, pinch, optimum pressure
Current sheath, insulator length



Shahrood University of Technology

Faculty of physics

Effect of insulator length on pinch time at different voltages and pressures in plasma focus devices

Zahra khodabakhshi

Supervisor

Dr. M.Momeni

Dr.M.Mohammadi

**Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the
Requirements for the Degree of Master of Science (M.Sc.)
in
Atomic and Molecular Physics**

September 2014