

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده فیزیک و مهندسی هسته ای

پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک اتمی و مولکولی

مشخصه یابی الکتریکی و اپتیکی جت پلاسمای اتمسفری

نگارنده: محمد رجبی فرد

اساتید راهنما

دکتر مهدی مومنی

دکتر محمد امین بصام

استاد مشاور

خانم زهرا خدابخشی

مهر ۱۳۹۹

تقدیم بہ پدرم، مادرم و خواہران عزیزتر از جانم

منت خدای را عزوجل که ما را در زمره ی انسان ها و بندگان خویش نهاد.

سپاس بیکران از فرشته های زندگانیتم، پدر عزیز و مادر مهربانم و خواهران گرامی که بی دریغ مراد همه ی بختات یاری نموده و مصائب

بسیار را جهت رشد و تعالی من بر جان خریده اند.

و سپاس فراوان از استید گرامی جناب دکتر مهدی مومنی که در این راه، چراغ راهم بودند و جناب دکتر محمد امین بصام که همواره با

راهنمایی هایشان گره مشکلات را کشوند.

تهدنامه

اینجانب محمد رجبی فرد دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته فیزیک پلاسما دانشکده فیزیک و مهندسی هسته ای دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مشخصه یابی الکتریکی و اپتیکی جت پلاسمای اتمسفری تحت راهنمایی دکتر مهدی مومنی و دکتر محمد امین بصام 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 . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

پلاسماهای سرد غیرتعادلی فشار اتمسفری به دلیل واکنش پذیری شیمیایی بالا و داشتن دمای در حد دمای اتاق، در صنعت و پزشکی بسیار مورد توجه واقع شده‌اند. از میان انواع مختلف دستگاه‌های ساخت پلاسما، جت پلاسمای سرد اتمسفری به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد خود در کاربردهای پزشکی و زیستی بسیار متداول شده است. جت پلاسمای اتمسفری علاوه بر دارا بودن مزیت‌های کلی پلاسماهای سرد اتمسفری، برای پردازش مواد، محدود به فضای تولید پلاسما نبوده و می‌تواند هر نوع جسمی را فارغ از اندازه و ابعاد آن مورد پردازش قرار دهد. استفاده از گاز هلیوم به عنوان گاز کاری این سیستم، باعث کاهش دما در این نوع پلاسما می‌شود و آن را برای پردازش سطوح حساس به گرما بیش از پیش مطلوب می‌سازد. برای استفاده بیشتر و بهتر از این پلاسما، لازم است رفتارها و تأثیر پارامترهای وابسته به آن بررسی گردد. در این پایان نامه، رفتارهای جت پلاسمای اتمسفری موجود در آزمایشگاه پلاسمای دانشگاه شاهرود مورد بررسی قرار گرفته و رفتارهای آن در هنگام تغییرات پارامترهای الکتریکی ثبت گردیده است و عواملی همچون جریان تخلیه، طول جت پلاسما و توان پلاسما محاسبه شده‌اند. همچنین با انجام طیف سنجی‌های اپتیکی گونه‌های فعال موجود در جت پلاسما در سه ناحیه بالا، میانی و پایین دست جت ثبت و بررسی شده‌اند.

کلمات کلیدی : جت پلاسما، مشخصه یابی الکتریکی، توان پلاسما، مشخصه یابی اپتیکی، طول جت، هلیوم

فهرست

فصل ۱: کلیات	۱.....
۱-۱ مقدمه	۲.....
۲-۱ تاریخچه واژه "پلاسما"	۲.....
۱-۳ خلاصه ای از پیشرفت های پلاسما در گذر زمان	۳.....
۱-۴ علم پلاسما	۶.....
۱-۴-۱ پلاسمای زمینی غیر همجوشی	۶.....
۱-۴-۲ پلاسمای زمینی درجه همجوشی	۷.....
۱-۴-۳ پلاسمای فضایی	۷.....
۱-۵ برخورد میان ذرات	۸.....
۱-۶ میزان یونیدگی پلاسما	۹.....
۱-۷ طول دبای	۱۰.....
۱-۸ فرکانس پلاسما	۱۱.....
۱-۹ پارامترهای پلاسما:	۱۲.....
۱-۱۰ دسته بندی پلاسما	۱۳.....
۱-۱۰-۱ پلاسمای تعادلی و غیرتعادلی	۱۳.....
۱-۱۰-۲ تعادل ترمودینامیکی محلی	۱۵.....
۱-۱۱ تولید پلاسما	۱۷.....

۱۸	۱-۱۱-۱ الکتروود بدون عایق.....
۱۹	۲-۱۱-۱ تخلیه سد دی الکتریک(DBD).....
۲۰	۳-۱۱-۱ الکتروود شناور.....
۲۰	۱-۱۲-۱ مروری بر دستگاه های پلاسما.....
۲۳	۱-۱۳-۱ کاربرد پلاسمای سرد غیرتعادلی.....
۲۵	فصل ۲: جت پلاسمای اتمسفری، مروری بر مطالعات انجام شده.....
۲۷	۲-۱-۱ مطالعات انجام شده.....
۲۸	۲-۲-۱ انواع پیکربندی جت پلاسما.....
۲۸	۲-۲-۱-۱ جت پلاسما گاز نجیب.....
۳۶	۲-۲-۲ جت پلاسمای نیتروژن.....
۳۷	۲-۲-۳ جت پلاسما هوا.....
۴۲	۲-۳-۱ شیمی جت پلاسما.....
۴۴	۲-۴-۱ امواج یونیزاسیون و استریمرها.....
۴۵	۲-۴-۱-۱ گلوله پلاسمایی.....
۴۸	۲-۵-۱ ابعاد جت پلاسما.....
۴۹	۲-۶-۱ توان جت پلاسما.....
۵۱	۲-۷-۱ مقاومت پلاسما.....
۵۱	۲-۸-۱ پهنای پالس.....
۵۲	چرخه کاری.....
۵۳	۲-۹-۱ طیف سنجی انتشار نوری(OES).....
۵۵	فصل ۳: مواد و روش ها.....

۳- ۱- ساختار جت پلاسمای اتمسفری.....	۵۶
۳- ۲- ابزارهای استفاده شده.....	۵۶
۳-۲-۱- منبع تغذیه.....	۵۶
۳-۲-۲- پروب ولتاژ.....	۵۸
۳-۲-۳- جریان.....	۵۹
۳-۲-۴- اسیلوسکوپ.....	۶۰
۳-۲-۵- توان.....	۶۰
۳- ۳- پارامترهای اپتیکی.....	۶۱
۳-۳-۱- محاسبه ی دما.....	۶۱
۳-۳-۲- محاسبه ی چگالی.....	۶۳
۳- ۴- نحوه انجام آزمایش.....	۶۵
فصل ۴ : نتایج و بحث.....	۶۷
۴- ۱- نمودار ولتاژ-جریان.....	۶۸
۴- ۲- بررسی اثر افزایش ولتاژ بر پلاσμα.....	۷۰
۴-۲-۱- بررسی اثر افزایش ولتاژ بر توان جت پلاσμα.....	۷۰
۴-۲-۲- بررسی اثر افزایش ولتاژ بر طول جت.....	۷۳
۴- ۳- بررسی اثر افزایش فرکانس بر جت پلاσμα.....	۷۶
۴-۳-۱- بررسی اثر افزایش فرکانس بر توان جت پلاσμα.....	۷۶
۴-۳-۲- بررسی اثر افزایش فرکانس بر طول جت.....	۷۸
۴- ۴- بررسی اثر شار گاز بر جت پلاσμα.....	۷۹
۴-۴-۱- بررسی اثر افزایش شار گاز بر توان جت پلاσμα.....	۷۹
۴-۴-۲- بررسی اثر افزایش شار گاز بر طول جت.....	۸۰
۴-۵- بررسی طیف گسیلی جت پلاσμα.....	۸۱

۹۰.....

۴- ۶ محاسبه دما

۹۵.....

۴- ۷ نتیجه گیری

۹۷.....

منابع

فهرست جداول

- جدول ۱-۱. مشخصات دما و چگالی در انواع پلاسما [۷] ۱۴
- جدول ۳-۱. اطلاعات گونه های هلیوم جهت اندازه گیری دما [۵۰] ۶۳
- جدول ۴-۱. اطلاعات مربوط به گونه های موجود در طیف های ثبت شده جت پلاسما [۵۰] ۸۲

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱. نمودار تغییر درجه یونیزاسیون بر حسب دما [۴] ۱۰
- شکل ۲-۱. نمودار مربوط به رابطه چگالی و فاصله [۲] ۱۱
- شکل ۳-۱. نمودار نشان دهنده رابطه‌ی بین فشار و دمای ذرات [۷] ۱۶
- شکل ۴-۱. ساختار نشان دهنده تولید پلاسمای غیرحرارتی توسط الکتروود بدون عایق [۹] ۱۸
- شکل ۵-۱. ساختار DBD [۹] ۱۹
- شکل ۶-۱. ساختار الکتروود شناور برای تولید پلاسمای غیر حرارتی [۶] ۲۰
- شکل ۷-۱. محدوده تغییر برای fpe (فرکانس الکترون ها در پلاسما) و fpi (فرکانس یون) در پلاسماهای سرد [۷] ۲۰
- شکل ۸-۱. تقسیم بندی دستگاه های پلاسمایی ۲۲
- شکل ۱-۲. جت DFE [۱] ۲۹
- شکل ۲-۲. پیکربندی های مربوط به جت های DBD [۱] ۳۲
- شکل ۳-۲. جت های شبه DBD (الف) استفاده از الکتروود میله ای به عنوان آند. (ب) استفاده از الکتروود میله ای تو خالی [۱] ۳۳
- شکل ۴-۲. انواع جت های تک الکتروود (SE) [۱] ۳۴
- شکل ۵-۲. پلاسمای ایجاد شده در داخل کانال ریشه دندان [۱] ۳۵
- شکل ۶-۲. ساختار جت های مربوط به تولید پلاسما با گاز نیتروژن [۱] ۳۶
- شکل ۷-۲. پیکربندی های جت پلاسمای هوا [۵] ۳۸
- شکل ۸-۲. قرار گرفتن انگشت در سوزن پلاسمایی به عنوان الکتروود زمین [۱] ۴۰

- شکل ۲-۹. ایجاد یک میدان الکتریکی موازی با شار گاز [۳] ۴۰
- شکل ۲-۱۰. ایجاد یک میدان الکتریکی عمود بر شار گاز [۳] ۴۱
- شکل ۲-۱۱. پیکربندی جت با میدان انتهایی [۳] ۴۱
- شکل ۲-۱۲. استریمر ۴۴
- شکل ۲-۱۳. حالت تصادفی و گلوله ای از جت پلاسمای فشار اتمسفری [۱] ۴۷
- شکل ۲-۱۴. شکل گلوله پلاسمایی از نمای رو به رو و در حالت شعاعی. سمت راست: جت هلیم در هوا. سمت چپ: انتشار پس افزودن اندکی گاز نیتروژن به هلیم [۱] ۴۸
- شکل ۲-۱۵. آرایه دو بعدی جت پلازما. (A) آرایه 3×3 . (B) آرایه 8×8 [۸] ۴۹
- شکل ۲-۱۶. نمودار I-V برای اختلاف فاز های مختلف [۱۰] ۵۰
- شکل ۲-۱۷. نمونه یک سیگنال پالسی ۵۲
- شکل ۳-۱. منبع تغذیه DC-Pulse ۵۷
- شکل ۳-۲. پروب ولتاژ ۵۸
- شکل ۳-۳. پروب جریان PINTEK مدل PA-۶۷۷ ۵۹
- شکل ۳-۴. اسیلوسکوپ دیجیتال چهار کاناله GPS ۶۰
- شکل ۳-۵. طرح شماتیک چیدمان آزمایش ۶۶
- شکل ۴-۱. نمودار ولتاژ-جریان جت پلاسمای اتمسفری در منبع تغذیه DC-Pulse ۶۸
- شکل ۴-۲. نمودار ولتاژ-جریان یک پالس در منبع تغذیه DC-Pulse ۶۸
- شکل ۴-۳. نمودار ولتاژ-جریان در منبع تغذیه AC ۷۰
- شکل ۴-۴. نمودار توان بر حسب ولتاژ در فرکانس های مختلف ۷۱
- شکل ۴-۵. نمودار توان بر حسب ولتاژ در شارهای مختلف گاز هلیم ۷۲
- شکل ۴-۶. نمودار توان بر اساس ولتاژ در منبع AC ۷۳

- شکل ۴-۷. نمودار طول جت بر حسب ولتاژ در شارهای مختلف گاز هلیم..... ۷۴
- شکل ۴-۸. نمودار طول جت پلاسما بر حسب ولتاژ اعمالی..... ۷۵
- شکل ۴-۹. نمودار طول جت بر اساس ولتاژ در منبع تغذیه AC..... ۷۵
- شکل ۴-۱۰. نمودار توان جت پلاسما بر حسب فرکانس در ولتاژهای مختلف..... ۷۶
- شکل ۴-۱۱. نمودار طول جت پلاسما بر حسب فرکانس اعمالی در ولتاژهای مختلف..... ۷۸
- شکل ۴-۱۲. نمودار توان بر حسب شار ورودی گاز هلیم..... ۷۹
- شکل ۴-۱۳. نمودار طول جت پلاسما بر حسب شار ورودی گاز هلیم..... ۸۰
- شکل ۴-۱۴. نمودار طول جت بر حسب شار ورودی گاز هلیم در استفاده از منبع ولتاژ سینوسی..... ۸۱
- شکل ۴-۱۵. طیف ثبت شده جت پلاسما در سه ناحیه بالا، میانی و پایین..... ۸۳
- شکل ۴-۱۶. تغییرات طیف در قسمت بالای جت بر حسب تغییر ولتاژ اعمالی..... ۸۴
- شکل ۴-۱۷. تغییرات طیف در قسمت میانی جت بر حسب تغییر ولتاژ اعمالی..... ۸۵
- شکل ۴-۱۸. تغییرات طیف در قسمت پایین جت بر حسب تغییر ولتاژ اعمالی..... ۸۵
- شکل ۴-۱۹. تغییرات طیف در قسمت بالای جت بر حسب تغییر فرکانس اعمالی..... ۸۶
- شکل ۴-۲۰. تغییرات طیف در قسمت میانی جت بر حسب تغییر فرکانس اعمالی..... ۸۷
- شکل ۴-۲۱. تغییرات طیف در قسمت پایینی جت بر حسب تغییر فرکانس اعمالی..... ۸۷
- شکل ۴-۲۲. طیف منتشر شده از قسمت بالای جت در شارهای مختلف گاز هلیم..... ۸۸
- شکل ۴-۲۳. طیف منتشر شده از قسمت پایینی جت در شارهای مختلف گاز هلیم..... ۸۹
- شکل ۴-۲۴. طیف منتشر شده از قسمت میانی جت در شارهای مختلف گاز هلیم..... ۸۹
- شکل ۴-۲۵. نمودار $\ln(\lambda_{ij}I_{ij}hcA_{ij}g_j)$ بر حسب E_j ۹۰
- شکل ۴-۲۶. نمودار دمای الکترون بر حسب شار گاز هلیم..... ۹۱
- شکل ۴-۲۷. نمودار دما الکترون بر حسب فرکانس..... ۹۱

- شکل ۴-۲۸. پیک شاخص موجود در طیف جهت محاسبه نیم پهنای..... ۹۲
- شکل ۴-۲۹. نمودار دمای الکترون بر حسب ولتاژ اعمالی..... ۹۱
- شکل ۴-۳۰. نمودار دمای الکترون بر حسب پهنای پالس..... ۹۱
- شکل ۴-۳۱. نمودار چگالی الکترون بر اساس پهنای پالس اعمالی در سه ناحیه جت پلاسما..... ۹۳
- شکل ۴-۳۲. نمودار چگالی الکترون بر اساس ولتاژ در سه ناحیه جت پلاسما..... ۹۳
- شکل ۴-۳۳. نمودار چگالی الکترون بر اساس فرکانس اعمالی در سه ناحیه جت پلاسما..... ۹۳
- شکل ۴-۳۴. نمودار چگالی الکترون بر اساس شار گاز هلیوم در سه ناحیه جت پلاسما..... ۹۳

فصل ۱: کلیات

۱-۱ مقدمه

تأثیر فناوری پلاسما در طی چند سال گذشته تقریباً در هر جنبه ای از فعالیت های انسانی نفوذ کرده است. توسعه جنبه ها و امکان استفاده گسترده در بسیاری از برنامه های کاربردی، باعث شده است تا موضوع پلاسما بیش از پیش مورد توجه محققان، دانشمندان و صنعتگران قرار گیرد.

بیش از ۹۹ درصد جهان از پلاسما تشکیل شده است. چگالی و دمای این حالت، گستردگی بسیار زیادی را داراست. دمای الکترونی انواع مختلف آن گستره ای از ۱۰۰۰۰ تا 10^8 کلوین دارد و چگالی برخی از آنها به بیش از 10^{20} cm^{-3} می رسد. ستاره ها و فضاها بین ستاره ای، شفق قطبی و رعدو برق نمونه ای از پلاسماهای موجود در طبیعت می باشند. همچنین لامپ های گازی، دستگاه برش پلاسما، دستگاه قوس الکتریکی و غیره، نمونه هایی از پلاسماهای تولید شده در آزمایشگاه می باشند.

در این فصل به تعاریف کلی پلاسما و مشخصه های آن، دسته بندی و دستگاه های ساخت پلاسما اتمسفری می پردازیم.

۱-۲ تاریخچه واژه "پلاسما"

در اواسط قرن نوزدهم، فیزیکدان چک، جان اوانزلیستا پرکینز^۱ برای بیان مایعات شفاف که پس از برداشتن تمام اجزا، در خون باقی می ماند از واژه یونانی "پلاسما" به معنای "شکل داده شده" استفاده نمود. در حدود نیم قرن پس از آن، در سال ۱۹۲۲ دانشمند آمریکایی ایروینگ لانگمویر^۲ پیشنهاد داد که الکترون ها، یون ها و ذرات خنثی موجود در یک گاز یونیزه شده به طور مشابه می توانند به عنوان چیزی که در سیال دیگری شناور است، در نظر گرفته شده و پلاسما نامیده شوند. با این حال معلوم شد که برخلاف خون، در جایی که یک ماده سیال وجود دارد

^۱ Jan Evangelista Purkinje

^۲ Irving Langmuir

که بقیه مواد را حمل می کند، در واقع هیچ "سیالی" وجود ندارد که الکترون ها، یون ها و ذرات خنثی را در یک گاز یونیزه شده قرار دهد. واژه یونانی "پلاسما" درواقع به دلیل شکل دادن یا قالب گیری و قیاس آن با پلاسمای بیولوژیکی که یک الکتروولیت است، انتخاب شد که رفتار خودتنظیم کننده پلاسما را بر خلاف رفتار ظاهر تصادفی مایعات توصیف می کند[۱۱].

۱- ۳ خلاصه ای از پیشرفت های پلاسما در گذر زمان

در دهه های ۱۹۲۰ و ۱۹۳۰، مطالعه فیزیک پلاسما توسط محققان بسیاری که به صورت مستقل کار می کردند، آغاز شد. این کار عمدتاً به سمت درک (الف) اثر پلاسما یونیوسفر بر انتشار رادیوی موج کوتاه^۱ از راه دور و (ب) لوله های الکترونیکی گازی استفاده شده برای اصلاح، سوئیچینگ و تنظیم ولتاژ در دوره پیش نیمه هادی الکترونیک انجام شده است. در دهه ۱۹۴۰ هانس آلفن^۲ نظریه ای از امواج هیدرومغناطیسی (که اکنون به آن امواج آلفن گفته می شود) را ارائه داد و بیان کرد که این امواج در پلاسماهای اختریفیکی مهم می باشند. در اوایل دهه ۱۹۵۰، تحقیقات در مورد انرژی ذوب مغناطیسی مبتنی بر فیزیک پلاسما در مقیاس بزرگ همزمان در ایالات متحده، انگلیس و اتحاد جماهیر شوروی آغاز شد. از آنجا که این کار نتیجه ای از تحقیقات تسلیحات هسته ای بود، در ابتدا محرمانه انجام شد اما به دلیل پیشرفت اندک در تلاش هر کشور و تحقق این که تحقیقات همجوشی کنترل شده بعید به نظر می رسد یک پدیده نظامی باشد، هر سه کشور در سال ۱۹۵۸ تلاش های خود را علنی کرده و با هم همکاری نمودند. بسیاری از کشورهای دیگر نیز هم اکنون در تحقیقات همجوشی شرکت می کنند. پیشرفت همجوشی در اکثر دهه ۱۹۶۰ کند بود، اما تا پایان آن دهه، پیکربندی تجربی توکامک توسعه یافته روسیه، تولید پلاسمایی با پارامترهای به مراتب بهتر از نتایج ناپایدار دو دهه گذشته را آغاز کرد.

^۱ Short wave

^۲ Hannes Alfvén

در دهه ۱۹۷۰ و ۸۰ بسیاری از نقص‌ها برطرف شد و پیشرفت‌های خوبی صورت گرفت که باعث شد در اواخر قرن بیستم همجوشی سربه سر در توکامک‌ها تقریباً حاصل شود [۱۱].

در اوایل قرن بیست و یکم، توافقی برای ساخت رآکتور تحقیقاتی بین‌المللی حرارتی هسته‌ای (ITER)^۱، به دست آمد که قادر به تولید ۵۰۰ مگاوات توان خروجی همجوشی را داشت. به غیر از توکامک، تحقیقات دیگری نیز با موفقیت دنبال می‌شد. بسیاری از آنها شامل طرح‌های محصور مغناطیسی مربوط به برنامه‌های مورد استفاده در توکامک‌ها هستند.

به طور همزمان با تلاش همجوشی، یک مطالعه به همان اندازه مهم و گسترده در مورد پلاسماهای فضایی صورت گرفت. اندازه‌گیری پلاسماهای فضایی نزدیک به زمین مانند شفق و یونوسفر، توسط ابزارهای زمینی در اواخر قرن نوزدهم صورت گرفت. تحقیقات پلاسما فضایی، هنگامی که امکان استفاده از پلاسما در فضاپیما برای انجام کارهای معمول در اندازه‌گیری مغناطیس کره زمین، باد خورشیدی و مغناطیس سیارات دیگر فراهم شد، بسیار مورد توجه قرار گرفته شد. با استفاده از تلسکوپ‌های رادیویی، تلسکوپ‌های نوری، تداخل سنج بسیار بلندپایه و اخیراً فضاپیمای هابل و اسپیتزر^۲، تعداد زیادی از جت‌های اخترفیزیکی مشاهده شده‌اند. این جت‌ها، در حال خروج از اشیاء مغناطیسی مانند ستاره‌ها، هسته‌های کهکشانی فعال و سیاهچاله‌ها بوده‌اند. پلاسماهای فضایی اغلب به شکلی کیفی شبیه به پلاسماهای آزمایشگاهی رفتار می‌کنند، اما مقیاس‌های آزمایشگاهی بسیار ناچیز هستند.

از دهه ۱۹۶۰ تلاش مهمی در جهت استفاده از پلاسماها برای پیشرانه فضایی انجام شده است. پیشرانه‌های پلاسما با تجهیزاتی از یون‌های کوچک برای چرخش‌های کوچک فضاپیما تا پیشرانه‌های قدرتمند مغناطیسی پلاسمایی که به منبع تغذیه مناسب متصل هستند، ارائه می‌شوند که برای مأموریت‌های بین‌سیاره‌ای بسیار کارآمدند. در

^۱ International Thermonuclear Experimental Reactor

^۲ Hubble and Spitzer

حال حاضر پیشرانه های پلاسما در برخی از فضاپیماها در حال استفاده هستند و برای طراحی جدید و بلند پروازانه فضاپیماها، مورد توجه جدی قرار گرفته اند.

با شروع اواخر دهه ۱۹۸۰، کاربرد جدیدی از فیزیک پلاسما تحت عنوان "پردازش پلاسما" آغاز شد که جنبه ای مهم برای ساخت مدارهای مجتمع ریز و پیچیده مورد استفاده در دستگاه های الکترونیکی مدرن بود. این کاربرد هم اکنون نیز از اهمیت اقتصادی زیادی برخوردار است.

در دهه ۱۹۹۰ مطالعات مربوط به پلاسماهای گرد و غبار^۱ آغاز شد. دانه های گرد و غبار غوطه ور در یک پلاسما می توانند به صورت الکتریکی شارژ شوند و به عنوان گونه ذره ای با بار اضافی عمل کنند. از آنجا که دانه های گرد و غبار در مقایسه با الکترون ها یا یون ها بسیار گسترده هستند و می توانند مقادیر مختلفی را بارگیری کنند، رفتار جسمی جدیدی رخ می دهد که گاهی اوقات گسترش آنچه اتفاق می افتد در یک پلاسما منظم و گاهی کاملاً جدید است. در دهه ۱۹۸۰ و ۹۰ تحقیقات پلاسماهای غیرخنثی که از معادلات هیدرودینامیک تراکم ناپذیر تبعیت می کنند نیز انجام شده است.

هر دو پلاسمای غبار آلود و پلاسماهای غیرخنثی همچنین می توانند حالت های جمعی کاملاً عجیب و غریب را تشکیل دهند که در آن ها پلاسما به یک جامد شبیه است (به عنوان مثال، ساختارهای شبه کریستالی تشکیل می دهد). کاربرد دیگر پلاسماهای غیرخنثی به عنوان ابزاری برای ذخیره سازی مقدار زیادی پوزیترون است.

علاوه بر فعالیتهای فوق، تحقیقات در مورد پلاسماهای صنعتی از قبیل قوس، مشعل پلاسما و پلاسماهای لیزری همچنان ادامه دارد. به طور خاص، تقریباً ۴۰٪ از فولادهای تولید شده در ایالات متحده در کوره های قوس الکتریکی عظیم که قادر به ذوب کردن بیش از ۱۰۰ تن فولاد کهنه در چند دقیقه قابل بازیافت هستند. از نمایشگرهای پلاسما برای تلویزیون های صفحه تخت استفاده می شود. اینها بخشی از فعالیت ها در حوزه پلاسما

^۱ Dusty plasma

بوده و این علم تقریباً جدید، رشد تصاعدی در دهه های اخیر داشته است [۱۱]. در بخش بعدی به تعریف ماهیت پلاسما می پردازیم.

۱- ۴ علم پلاسما

بیش از ۹۹ درصد جهان هستی ما را پلاسما تشکیل می دهد. در زمین نیز نمونه هایی از پلاسماهای طبیعی همچون شفق قطبی وجود دارد اما حجم فضای پلاسمایی در زمین نسبت به دیگر نقاط کیهان بسیار کمتر است و در واقع این نکته نشان می دهد که کره زمین در فضای کیهان به مانند یک حباب غیرپلاسمایی در داخل یک فضای بزرگ پلاسمایی قرار گرفته است [۱۲]. پلاسما دامنه تغییرات عظیم پارامترهایی مانند فشار، فاصله و انرژی را داراست [۱۳]. برای درک و شناخت بهتر پلاسما، پلاسماهای موجود در کره زمین اعم از پلاسماهای طبیعی و ساخت بشر و همچنین پلاسماهای موجود در فضا را در ذیل به طور خلاصه شرح خواهیم داد:

۱-۴-۱ پلاسمای زمینی غیر همجوشی^۱

ساختن یک پلاسمای گرم و کاملاً یونیزه به منابع و مهارت قابل توجهی نیاز دارد و بنابراین، به جز پلاسمای همجوشی ویژه، اکثر پلاسمای زمینی (به عنوان مثال، قوس، علائم نئون، لامپهای فلورسنت، پلاسمای مورد استفاده در پردازش، قوس جوشکاری و ...) دارای دمای الکترونی با مقدار چندین الکترون ولت هستند و به دلایلی که بعداً ذکر خواهد شد، دارای دمای یون سردتر، اغلب در دمای اتاق هستند. این پلاسماهای "روزمره"^۲ معمولاً هیچ میدان مغناطیسی حالت پایدار تحمیل شده ندارند و میدان های مغناطیسی قابل توجهی تولید نمی کنند. به طور معمول، این پلاسماها به طور ضعیف یونیزه شده اند و تحت تأثیر فرآیندهای برخورد و تابش قرار دارند. چگالی در این پلاسما از 10^{14} تا $10^{22} m^{-3}$ است [۱۱].

^۱ Non-fusion terrestrial plasma

^۲ everyday

۱-۴-۲ پلاسمای زمینی درجه همجوشی^۱

محققان همجوشی، با استفاده از سیستم های محصور سازی پلاسما و طراحی دقیق، گران قیمت و اغلب بزرگ همراه با قدرت حرارت بالا و توجه به خلوص، موفق به ایجاد پلاسماهای هیدروژن یا دوتریم کاملاً یونیزه شده، شده اند که دمایی از دهها تا دهها هزار الکترون ولت را به دست می آورند. در دستگاه های حبس مغناطیسی^۲ معمولی (به عنوان مثال، توکامکها، استلاترها^۳، فشارهای میدان معکوس^۴، دستگاه های آینه ای^۵) یک میدان مغناطیسی خارجی به اندازه ۱ تا ۱۰ تسلا، به پلاسما تحمیل می شود. دستگاه های حبس مغناطیسی معمولاً دارای چگالی در محدوده $10^{21} - 10^{19} m^{-3}$ هستند. پلاسمای مورد استفاده در همجوشی بسیار متراکم تر است. هدف این است که به یک چگالی فوری کوتاه یک یا دو مرتبه بزرگتر از چگالی جامد ($10^{28} m^{-3}$) دست یابیم [۱۱].

۱-۴-۳ پلاسمای فضایی^۶

پارامترهای این پلاسماها طیف عظیمی را پوشش می دهند. به عنوان مثال، تراکم پلاسمای فضایی از $10^6 m^{-3}$ (فضای بین ستاره ای) تا $10^{20} m^{-3}$ (خورشید) متغیر است. اکثر پلاسمای اخترفیزیکی که مورد بررسی قرار گرفته اند دارای دما در محدوده ۱ تا ۱۰۰ الکترون ولت هستند و این پلاسماها معمولاً به طور کامل یونیزه می شوند. [۱۱]

در حالت کلی پلاسما مجموعه ای از ذرات با بار آزاد است که در جهات تصادفی در حال حرکت است که به طور متوسط خنثی است [۱۴].

^۱ Fusion-grade terrestrial plasma

^۲ magnetic confinement devices

^۳ stellarators

^۴ reversed field pinches

^۵ mirror devices

^۶ Space plasmas

به بیانی دیگر پلاسما ماده ای فراتر از حالت گازی آن است که تا حدی گرم می شود که حداقل یک الکترون از لایه آخراتم ها کنده شود، به طوری که یون های مثبت در دریایی از الکترون ها خواهند بود [۲].

همچنین می توان با اعمال یک میدان الکتریکی قوی میان دو الکترون، باعث کنده شدن الکترون از لایه اتم ها شد و پلاسما را به وجود آورد.

۱- ۵ برخورد میان ذرات

برخوردها بین ذرات به دو صورت است: ممکن است الاستیک باشد، که در این حالت حرکت در آن حفظ می شود و یا اینکه غیرالاستیک است، که در این صورت انرژی حرکت به انرژی درونی تبدیل می شود. در هر دو حالت، انرژی مبادله می شود. انرژی و فرکانس برخورد بین ذرات اتمی بر میزان انرژی ای که توسط ذرات در پلاسما جذب و یا آزاد می شود، مؤثر است. جرم یک الکترون (m_e) برابر با $9.11 \times 10^{-31} \text{ Kg}$ و جرم یک پروتون (m_p) - برابر با جرم اتم هیدروژن - برابر $1.67 \times 10^{-27} \text{ Kg}$ است.

جرم کوچک الکترون منجر به تبادل ناچیز انرژی جنبشی از الکترون ها در یک برخورد الاستیک می شود و هر دو ذره میزان حرکت خود را حفظ می کنند اما جهت آن تغییر می کند. کسری از انرژی جنبشی k منتقل شده در یک برخورد الاستیک از یک ذره با جرم m به یک ذره ثابت با جرم M می تواند از معادلات انرژی حرکت و جنبشی حاصل شود. برای ضربه به محور دو ذره k از رابطه ی زیر محاسبه می شود:

$$k = \frac{\frac{4m}{M}}{\left(1 + \frac{m}{M}\right)^2} \quad (1-1)$$

که در آن m بسیار کوچکتر از M است. مانند برخورد یک الکترون به یک ذره خنثی. با احتساب تفاوت جرم ها رابطه بالا را می توان با تقریب بسیار خوبی به صورت زیر نوشت:

$$k = \frac{\xi m}{M} \quad (1-2)$$

اگر m و M یکسان باشند، انرژی تقریباً برابری تبادلی می شود. در صورت برخورد غیرالاستیک، کسر انرژی تبدیل شده ممکن است به اندازه $M / (m + M)$ باشد و بیش از ۹۹٪ انرژی اولیه ممکن است منتقل شود.

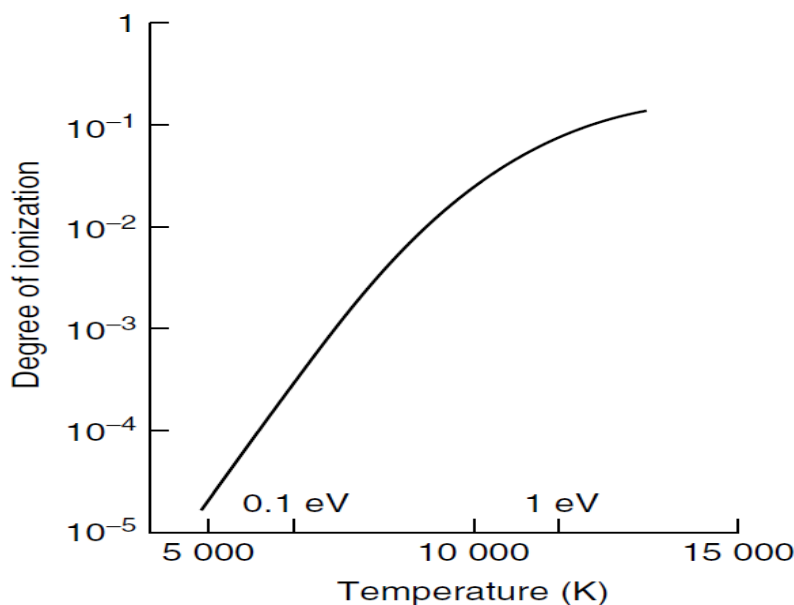
فرکانس برخورد یک پروتون در هوا در فشار اتمسفر از مرتبه $10^{-9} s^{-1}$ است. میانگین مسیر آزاد λ (فاصله بین برخوردها) یک اتم یا مولکول در هوا در فشار اتمسفر تقریباً برابر $10^{-8} m$ است و با فشار تقریباً رابطه عکس دارد، به طوری که در $0.1 Pa$ ($0.752 \times 10^{-3} Torr$)، میانگین مسیر آزاد تقریباً ۶۰ میلی متر است [۱۳].

۱-۲ میزان یونیدگی پلاسما

همانطور که قبلاً گفته شد پلاسما متشکل شده از الکترون ها، ذرات خنثی و یون های مثبت و منفی است. درجه یونیزاسیون، اندازه گیری نسبت تعداد اتم ها یا مولکول های یونیزه شده است (که معمولاً برابر با تعداد الکترون ها n_e یا یون ها n_i است) به اندازه کل اتم ها یا مولکول (n_t) است که با نماد α نشان داده می شود و رابطه ی آن به صورت زیر است:

$$\alpha = \frac{n_e}{n_t} \quad (1-3)$$

فقط بخش کوچکی از اتم‌های موجود در یک تخلیه الکتریکی یونیزه می شوند، به طور معمول ۱ در 10^5 تا 10^6 ، که این گفته در فشار گاز 133 Pa (1 Torr) با چگالی ذرات 10^{22} m^{-3} و چگالی الکترونی 10^{16} m^{-3} مطابقت دارد [۴]. تغییر درجه یونیزاسیون با دما در شکل ۱-۱ نشان داده شده است.



شکل ۱-۱. نمودار تغییر درجه یونیزاسیون بر حسب دما [۴]

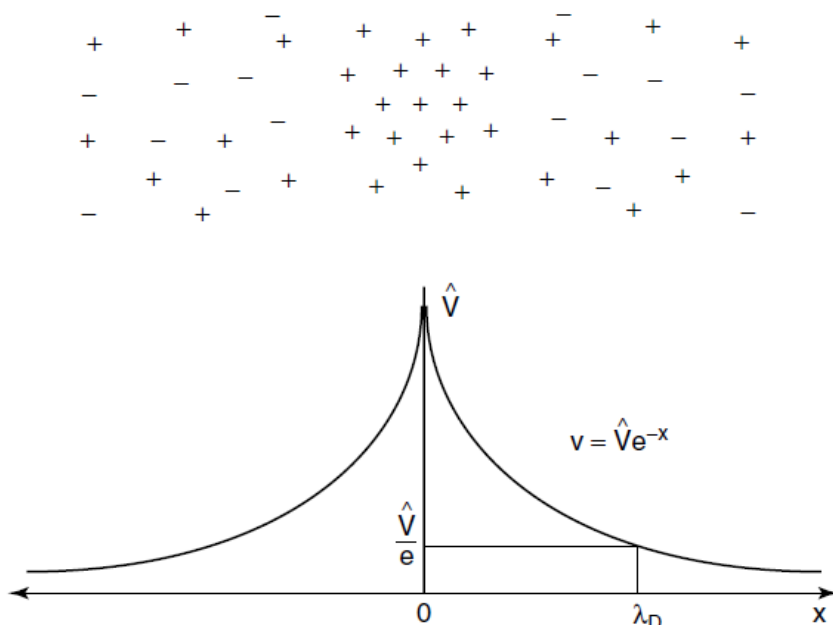
۱-۷ طول دبای

یکی از مشخصه های اساسی رفتار پلاسما، ایجاد یک حفاظ برای مقابله با پتانسیل های الکتریکی وارد بر آن است. رفتار ذرات در داخل و خارج کره دبای متفاوت است. رابطه ی طول دبای به صورت زیر است:

$$r_{De} = \left(\frac{kT_e}{4\pi N_e e^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1-4)$$

که در آن T_e و N_e و e به ترتیب دما، چگالی و مقدار بار الکترون می باشند.

برطبق رابطه، با افزایش چگالی الکترون طول دمای کاهش می یابد. شکل ۱-۲ نمودار مربوط به رابطه چگالی و فاصله را نشان می دهد.



شکل ۱-۲. نمودار مربوط به رابطه چگالی و فاصله [۲]

۱-۸ فرکانس پلاسما

یکی از اساسی ترین معیارها در پلاسما، فرکانس پلاسما است. فرکانس پلاسما برای ذرات مختلف موجود در پلاسما، متفاوت است. اما در حالت کلی فرکانس پلاسما را می توان به فرکانس الکترونی که بسیار سریع در حرکت است، اطلاق کرد. برای بدست آوردن فرکانس پلاسما می توان از رابطه زیر استفاده کرد [۱۵]:

$$\omega_p \simeq \left(\frac{4\pi N_e e^2}{m} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1-5)$$

۱-۹ پارامترهای پلاسما:

بسیاری از افراد پلاسما را با گاز داغ یکسان در نظر می گیرند، در صورتی که این دو کاملاً باهم متفاوت اند. برخی از تفاوت های آنها به صورت زیر است:

۱- پلاسما خاصیت رسانندگی دارد و رساناست در صورتی که گاز داغ یک نارسانا محسوب می شود.

۲- در گاز یک دما داریم و این در حالی است که در پلاسما دمای ذرات می تواند متفاوت باشد و به عبارتی چند دما داشته باشیم.

۳- در پلاسما تغییرات بار ، چگالی و دما اثرگذار است.

۴- پلاسما را می توان هم به صورت تک سیالی به عنوان تک سیال یون و یا الکترون، و هم دو سیالی که حرکت هر دو لحاظ شود، در نظر گرفت.

اما برای اینکه یک محیط گازی شامل اتم های خنثی و یون ها، پلاسما به شمار آید، باید یک سری شروط اولیه خاص را دارا باشد که در ذیل به آن می پردازیم:

(۱) تعداد ذرات در داخل حفاظ دمای باید بسیار زیاد باشد. چرا که اگر تعداد اندکی ذره در این قسمت قرار گیرد این ناحیه عملاً مفهومی نامعتبر خواهد داشت ($N_D \gg 1$). تعداد ذرات از رابطه (۶-۱) پیروی خواهند کرد [۲]:

$$N_D = n \frac{4}{3} \pi r_{De}^3 = 1.8 \times 10^6 \frac{T_e^{\frac{3}{2}}}{n^{\frac{1}{2}}} \quad (۶-۱)$$

(۲) طول دمای در مقایسه با ابعاد دستگاه باید بسیار کوچک باشد ($\lambda_D \ll L$) [۴].

۳) کنترل حرکت ذرات بیشتر توسط نیروهای الکترو مغناطیسی انجام پذیرد تا نیروهای هیدرودینامیکی. به عبارتی اگر بسامد نوعی نوسانات پلاسما ω و زمان متوسط بین برخوردها با اتم های خنثی τ باشد، برای آنکه گاز مانند پلاسما، و نه یک گاز خنثی، رفتار کند لازم است که رابطه ی (۷-۱) برقرار باشد: [۱۶].

$$\omega\tau \gg 1$$

$$(۷-۱)$$

۱۰-۱ دسته بندی پلاسما

۱-۱۰-۱ پلاسمای تعادلی و غیر تعادلی

یکی از مهم ترین مشخصه های گاز، فشار آن است. در یک گاز داده شده با یک دمای خاص، فشار، چگالی کل ذرات گاز و احتمال برخورد متقابل (مؤثر) میان ذرات الکترون-یون و ذرات خنثی تعریف می شود.

در گازهای با فشار بالا، برخوردهای با فرکانس بالا باعث می شود که با گذشت زمان، پلاسما به یک حالت پایدار تعادلی برسد. در تعادل گرمایی، دمای همه ی ذرات (حتی اتم های خنثی) یکسان اند [۱۷]. هسته ی خورشید و بخش های مرکزی یک رعدوبرق نمونه هایی از پلاسمای گرم در طبیعت و زباله سوز پلاسمایی و آرک الکتریکی مورد استفاده در جوشکاری پلاسمایی، نمونه هایی از پلاسماهای گرم و تعادلی ساخته دست بشر هستند.

اما اگر تولید پلاسما به گونه ای باشد که دمای الکترون و ذرات سنگین چون یون ها و ذرات خنثی با هم متفاوت باشد، می گوییم پلاسما غیر تعادلی است. در جدول ۱-۱ مشخصات دما و چگالی ذرات در انواع پلاسما را نشان می دهد [۷، ۱۸]:

جدول ۱-۱. مشخصات دما و چگالی در انواع پلاسما [۷، ۱۸]

پلاسما	مشخصات	مثال
پلاسمای دمای بالا ^۱ (پلاسمای تعادلی)	$T_e \approx T_i \approx T_g = 10^6 - 10^8 K$ $\geq 10^{20} m^{-3}$: چگالی الکترون	همجوشی پلاسما
پلاسمای دمای پایین ^۲		
پلاسمای گرمایی ^۳ (تعادل ترمودینامیکی محلی)	$T_e \approx T_i \approx T_g \leq 2 \times 10^4 K$ $10^{21} - 10^{26} m^{-3}$: چگالی الکترون	پلاسمای آرک مشعل پلاسما
پلاسمای غیر گرمایی ^۴ (غیرتعادلی)	$T_e \gg T_i$ $T_e \leq 10^5 K (\approx 10 eV)$ $T_i \approx T_g = 300 - 10^3 K$ $< 10^{10} m^{-3}$: چگالی الکترون	تخلیه درخشان کرونا سد تخلیه

راه دیگر ساخت پلاسمای غیرتعادلی استفاده از میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی از است. میدان‌های الکتریکی می‌توانند با توجه به شرایط، از نوع AC,DC و یا DC-PULSE باشند [۱۷].

^۱ High Temperature Plasma

^۲ Low Temperature Plasma

^۳ Thermal Plasma

^۴ Non-Thermal Plasma

۱-۱۰-۲ تعادل ترمودینامیکی محلی

تعادل ترمودینامیکی محلی^۱ در واقع بیانگر ایجاد یک پلاسمای تعادلی کوچک در دل پلاسمای غیر تعادلی بزرگتر است. تعادل ترمودینامیکی محلی پلاسمای، گذارها و واکنش های شیمیایی را مدنظر دارد که توسط برخوردها اداره می شوند نه واکنش های شیمیایی.

علاوه بر این پدیده های برخوردی باید ریزبرگشت پذیر باشند. این بدان معناست که هر پدیده ای باید با برگشت خودش مقداری برابر داشته باشد (برانگیختگی/بازنشر؛ یونیزاسیون/ترکیب؛ تعادل سرعتی).

زمان انتشار نیز باید به گونه ای باشد که ذرات بتوانند به تعادل برسند. یعنی برابر و یا بیشتر از زمانی باشد که ذرات برای رسیدن به تعادل نیاز دارند.

برطبق معیار گریم^۲، یک پلاسمای همگن نازک زمانی در تعادل ترمودینامیکی محلی است که چگالی الکترون رابطه (۱-۸) را برآورده کند:

$$n_e = 9.10^{23} \left(\frac{E_{\gamma_1}}{E_{H^+}} \right)^3 \left(\frac{KT}{E_{H^+}} \right) (m^{-3}) \quad (1-8)$$

E_{H^+} : انرژی یونیزاسیون اتم هیدروژن (۱۳,۵۶ eV)

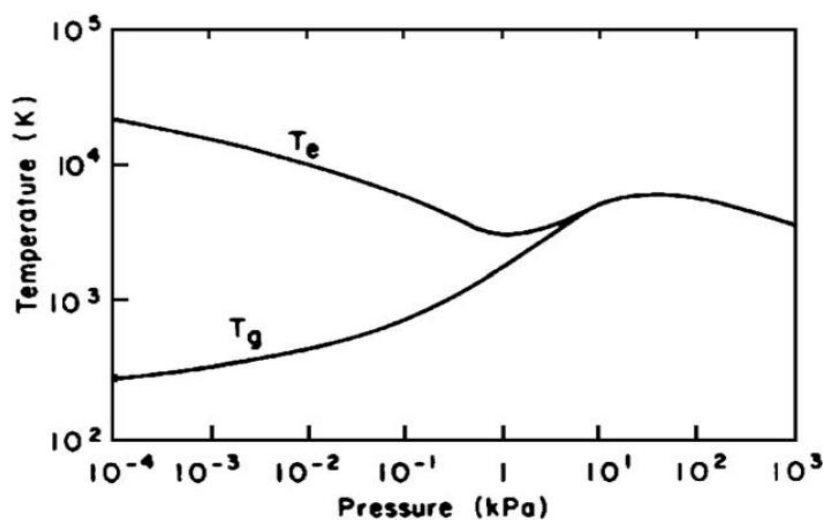
E_{γ_1} : گپ انرژی بین حالت پایه و اولین حالت برانگیخته

^۱ Local thermodynamic (or thermal) equilibrium (LTE)

^۲ Grim

این معیار نشان می‌دهد که پیوند بسیار قوی ای میان چگالی الکترون لازم برای تعادل ترمودینامیکی محلی و انرژی اولین حالت برانگیخته وجود دارد. این قوانین برای تعادل ترمودینامیکی محلی بسیار سخت گیرانه است و باعث می‌شود بیشتر پلاسماها و مخصوصا پلاسماهای با چگالی پایین در آزمایشگاه‌ها از تعادل ترمودینامیکی محلی منحرف شوند.

بنابراین می‌توان گفت وقتی که فشار محیط پایین باشد (مرتبه $10^{-4} - 10^{-1}$ Pa) دمای الکترون‌ها از دمای ذرات سنگین به مراتب بیشتر خواهد بود و این به معنای آن است که تعادل ترمودینامیکی برقرار نیست. رابطه‌ی بین فشار و دمای ذرات را در شکل ۱-۳ نشان داده شده است. برخورد های میان الکترون‌ها و ذرات سنگین از نوع غیر الاستیک است که این برخوردها نمی‌توانند دمای ذرات سنگین را بالا ببرند [۷].



شکل ۱-۳. نمودار نشان دهنده رابطه‌ی بین فشار و دمای ذرات [۷]

۱-۱۱ تولید پلاسما

همانطور که در تعریف پلاسما ذکر شد، پلاسما مجموعه ای از ذرات باردار است که این یون ها و الکترون ها را می توان به روش های مختلفی تولید کرد.

برای مثال با دادن گرما به گاز می توان جنبش ذرات را به حدی بالا برد که در برخورد های بین آنها، الکترون از ذرات خنثی کنده شده و پلاسما ایجاد گردد. هم چنین این تولید ذرات باردار، می تواند توسط تابش یک پرتو الکترومغناطیس به درون گاز صورت گیرد.

ما در این فرصت، به بررسی تولید پلاسمای غیر حرارتی در فشار اتمسفری می پردازیم که برای تولید آن از انرژی الکتریکی استفاده می شود.

با اعمال میدان الکتریکی بر ذرات گاز، مولکول ها و اتم ها، یونیزه شده و سپس با افزایش الکترون ها و در نتیجه برخورد های بیشتر، تعداد ذرات باردار به صورت تصاعدی افزایش می یابد.

تولید پلاسمای غیرحرارتی در فشار اتمسفری بسیار کار سختی است. چرا که سطح انرژی ارتعاشی و چرخشی مولکول ها، کمتر از انرژی لازم برای یونیزاسیون است. انرژی انتقالی در این برخورد ها بیشتر به انرژی ارتعاشی و چرخشی تبدیل می شود. از این رو ایجاد پلاسمای غیر حرارتی، در فشار اتمسفر به دلیل یونیزاسیون های کم، کار مشکلی است [۵].

از روش های تولید پلاسمای غیرحرارتی در فشار اتمسفری می توان به الکتروود بدون عایق^۱، تخلیه سد دی الکتریک^۲ و الکتروود شناور^۳ اشاره کرد.

^۱ Dielectric free- electrode (DFE)

^۲ Dielectric barrier discharge (DBD)

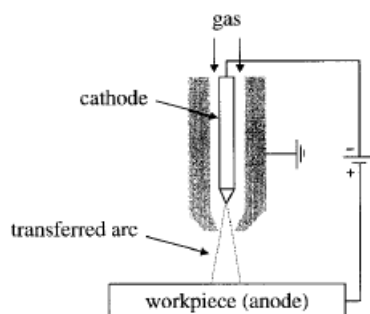
^۳ Floating electrode (FE)

۱-۱۱-۱ الکتروود بدون عایق

این روش اولین بار توسط گروه هیک^۱ برای تولید پلاسمای غیرحرارتی در فشار اتمسفری، به کار برده شد [۹، ۱۹].

پلازما توسط یک منبع تغذیه در فرکانس رادیویی تولید می شود. این روش بر مبنای دو الکتروود است که یکی از آنها به زمین متصل است و گاز به فضای بین دو الکتروود می تواند فرستاده شود.

توان این منبع بین ۵۰ تا ۵۰۰ وات است که به دلیل توان بالای به کار برده شده در تولید پلازما، دما بالا رفته و این خود باعث می شود تا در کاربردهای زیستی نتوان از آن استفاده نمود. این نوع پلازما را می توان در برش، ذوب و جوشکاری مواد فشرده به کار برد. شکل ۱-۴، ساختار این روش را نشان می دهد.

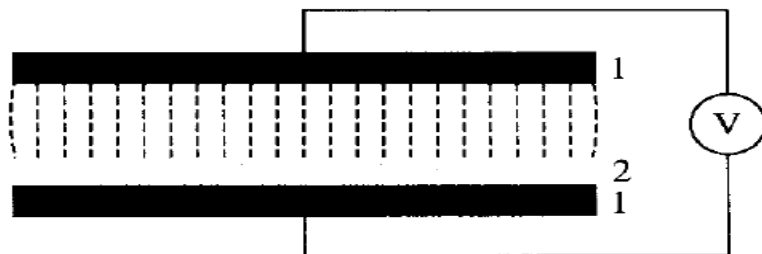


شکل ۱-۴. ساختار نشان دهنده تولید پلاسمای غیرحرارتی توسط الکتروود بدون عایق [۹]

^۱ Hick

۱-۱۱-۲ تخلیه سد دی الکتریک (DBD^۱)

روش تخلیه سد دی الکتریک یا تخلیه ی بی صدا مبتنی بر دو الکترود است که در فاصله چندین میلی متر از هم قرار گرفته‌اند که بر روی یکی یا هر دو الکترود با لایه دی الکتریک پوشانده شده است. لایه دی الکتریک باعث جلوگیری از ایجاد جریان بالا (آرک) می شود. تخلیه‌های الکتریکی معمولاً با اعمال یک ولتاژ متناوب در حدود ۲۰ کیلوولت و فرکانسی از مرتبه‌ی چندین کیلوهرتز حاصل می شوند. از DBD ها می توان برای پردازش سطح از جمله پاکسازی سطوح، لایه نشانی و ... استفاده نمود. لازم به ذکر است که دمای پلاسمای ایجاد شده توسط DBD برای کاربردهای زیستی مناسب است. شکل ۱-۵ ساختار یک DBD را نشان می دهد.

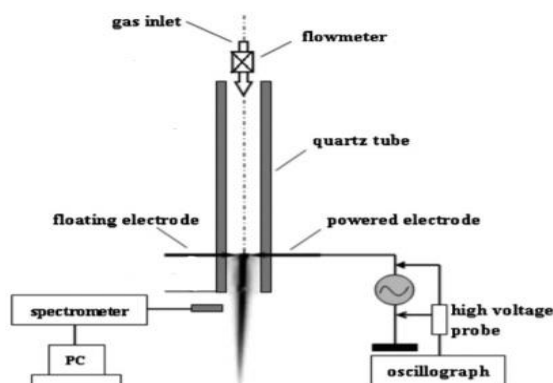


شکل ۱-۵. ساختار DBD [۹]

^۱ Dielectric Barrier Discharge

۱-۱۱-۳ الکتروود شناور

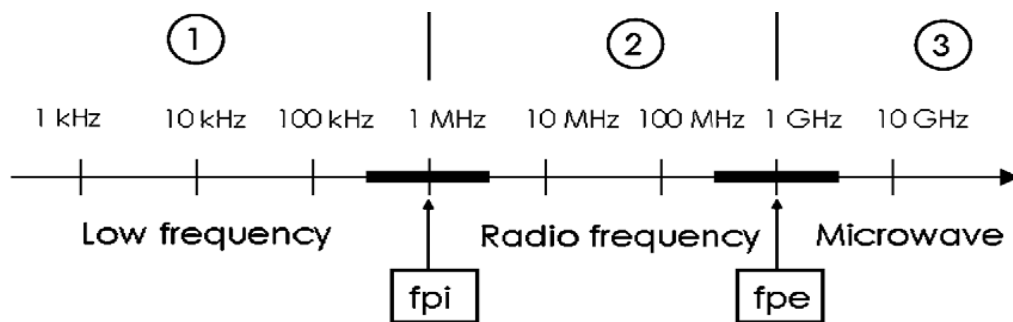
یکی دیگر از مدل‌های تولید پلاسمای غیرحرارتی استفاده از الکتروود شناور است. در این پیکربندی که در شکل ۱-۶ نشان داده است، از دو الکتروود به کار رفته، یکی متصل به منبع تغذیه و دیگری در هوا شناور است که می‌تواند نقشی مفید در متمرکز کردن انرژی الکتریکی درون کانال تخلیه ایفا کند. این روش دارای دمای پایین، ولتاژ کاری کم و پایداری بالا است [۶].



شکل ۱-۶. ساختار الکتروود شناور برای تولید پلاسمای غیر حرارتی [۶]

۱-۱۲ مروری بر دستگاه‌های پلاسما

فرکانس تحریک از آنجا که بر رفتار الکترون‌ها و یون‌ها تأثیر می‌گذارد از اهمیت برخوردار است. شکل ۱-۷، نمونه ای از محدوده تغییر برای f_{pe} (فرکانس الکترون‌ها در پلاسما) و f_{pi} (فرکانس یون) در پلاسماهای سرد (به عنوان مثال تخلیه‌های درخشش) را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۷. محدوده تغییر برای f_{pe} (فرکانس الکترون‌ها در پلاسما) و f_{pi} (فرکانس یون) در پلاسماهای سرد [۷]

۱) الکترون ها و یون ها نوسانات میدان الکتریکی را دنبال می کنند

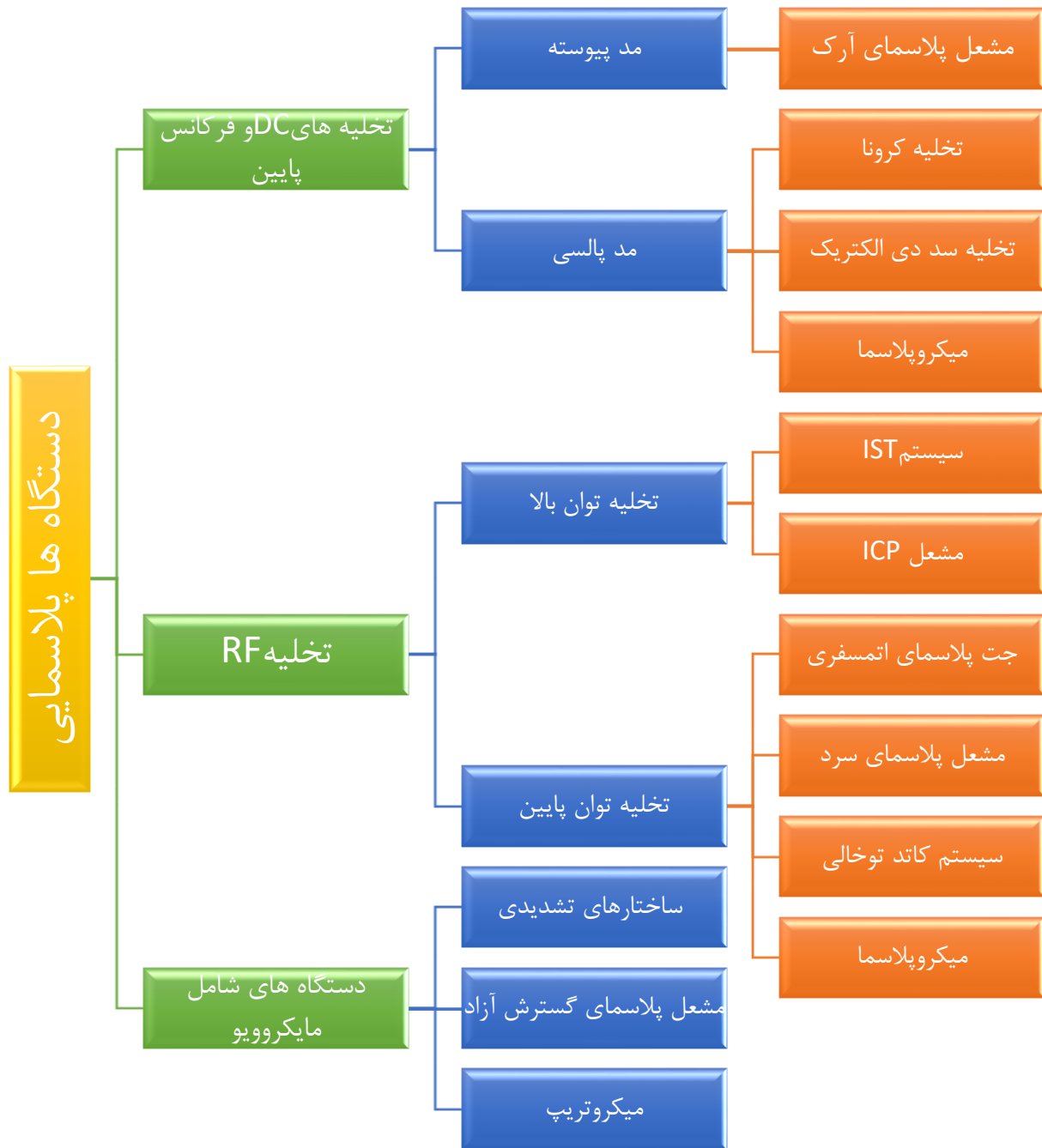
۲) الکترون ها تنها کسانی هستند که نوسانات میدان الکتریکی را دنبال می کنند. یونها تحت تأثیر میانگین محلی موضعی میدان قرار دارند.

۳) تقویت رفتارهای مشاهده شده در منطقه ۲

منابع پلاسما جوی را می توان با توجه به حالت تحریک آنها طبقه بندی کرد. سپس سه گروه برجسته می شوند:

- DC (جریان مستقیم) و تخلیه فرکانس پایین؛
- پلاسماهایی که توسط امواج فرکانس رادیویی مشتعل می شوند.
- تخلیه مایکروویو

در میان اینها، ظهور میکروپلاسما جدید و بسیار جالب است. روند کوچک سازی سیستم های پلاسما به منظور ایجاد سیستم های قابل حمل کم مصرف و کاهش هزینه های ابزار و دارا بودن کارایی مناسب از اهمیت ویژه ای برخوردار است. نمودار نشان داده شده در شکل ۱-۸ تقسیم بندی دستگاه های پلاسمایی را به طور خلاصه به ما نشان می دهد [۷]:



شکل ۸-۱. تقسیم بندی دستگاه‌های پلاسمایی

۱-۱۳ کاربرد پلاسمای سرد غیر تعادلی

همانطور که ذکر شد در پلاسماهای گرم تعادلی نظیر آرک الکتریکی، دما بسیار بالاست و این در حالی است که بسیاری از مواد نسبت به دما بسیار حساس هستند و نمی‌توان این نوع پلاسما را برای آنها به کار برد. از طرفی پلاسماهای کم فشار، شرایط سخت به دست آوردن و هم چنین هزینه های بالایی نظیر دستگاه‌های خلأ را به همراه دارند. از این رو گونه‌ی دیگری از پلاسما، تحت عنوان پلاسمای سرد اتمسفری، امروزه بسیار رایج و مورد توجه دانشمندان و صنعتگران قرار گرفته است.

این نوع از پلاسما در فشار و دمای محیط، با استفاده از میدان های الکتریکی و مغناطیسی تولید می‌شود. دمای کم این نوع پلاسما باعث شده است تا طیف کاربردهای آن بسیار وسیع گردد و بتوان از آن در صنایع پزشکی، کشاورزی، زیست محیطی، نساجی، پلیمرها، الکترونیک و... استفاده کرد.

برای نمونه در کاربردهای پزشکی می‌توان از لخته سازی خون [۲۰]، از بین بردن سلول‌های سرطانی، انتقال دارو [۲۱]، درمان بیماری‌های پوستی، ضد عفونی کردن زخم‌ها [۲۲، ۲۳] و... نام برد.

در دندان پزشکی نیز می‌توان از پلاسما در از بین بردن میکروب های دهانی [۲۴]، سفید کردن دندان‌ها [۲۵]، استریلیزاسیون ابزارهای دندان پزشکی و ترمیم کامپوزیت‌ها [۲۶] بهره برد.

همچنین می‌توان از افزایش چسبندگی سطح و افزایش رنگ پذیری در رنگرزی، افزودن خاصیت های آبدوستی، آبگریزی [۲۷]، ضد چروکی، مقاومت در برابر شعله و آهارگیری به عنوان کارایی های پلاسما در نساجی یاد کرد [۲۸].

صنایع کشاورزی و غذایی نیز در محصولات و زیرساخت های خود از علم پلاسما بهره برده‌اند. ضد عفونی کردن خاک [۲۹] و آب آلوده [۳۰] و اصلاح بذرها نمونه هایی از کاربرد پلاسما در این صنعت است. عدم استفاده از مواد

شیمیایی و در عین حال داشتن اثرات مثبت بر فرآیند جوانه زنی بذر و رشد گیاه، مزیت پلاسما نسبت به سایر روش هاست که باعث می شود آلودگی ای برای محیط زیست در پی نداشته و علم پاک به شمار رود.

همچنین تابش پلاسما بر روی نمونه های غذایی همچون زعفران، نشان داده است که پلاسما به ماندگاری بیشتر و حفظ کیفیت آن کمک شایانی کرده و راه را برای حذف مواد نگهدارنده و صادرات این نوع محصولات هموارتر نموده است [۳۱].

ایجاد انواع لایه نشانی و لایه برداری بر روی انواع سطوح را نیز می توان از کاربردهای مهم پلاسما به شمار آورد.

فصل ۲ : جت پلاسمای اتمسفری، مروری بر

مطالعات انجام شده

جت پلاسما یک مفهوم گسترده‌ای است که انواع مختلفی از پیکربندی‌ها را پوشش می‌دهد که به طور مشترک می‌توانند با استفاده از عملکرد شارگاز، توان ورودی، شکل پیکربندی الکترودها و ... گونه‌های پلاسما را توسط الکتروود تشکیل داده و تخلیه را در یک محیط باز تحقق بخشند.

دستگاههای جت پلاسما معمولی، جت حرارتی قوس الکتریکی هستند که برای کاربردهای برش، جوشکاری و سایر روشهای مواد استفاده می‌شوند. در چند دهه اخیر، علاقه به جت‌های پلاسما به طور فزاینده‌ای به فشار جوی پلاسما غیر گرمایی (سرد) جوی منتقل شده است [۹]. ویژگی بارز این پیکربندی جت، قابلیت آن در پرتاب گونه‌های پایدار پلاسما به یک محیط جداگانه است، جایی که میدان الکتریکی می‌تواند بسیار کم باشد. این ویژگی اجازه می‌دهد تا هدف مورد استفاده در دستگاه محصور نشده و در داخل آن قرار نگیرد (جسم بین شکاف تخلیه قرارگیرد). بنابراین، از جت‌های پلاسما می‌توان برای پردازش مستقیم اشیاء مختلف بدون محدودیت اندازه استفاده کرد. از طرف دیگر، جدایی مکانی منبع پلاسما و مناطق تعامل پلاسما-هدف باعث می‌شود تا آزادی بیشتری در طراحی منبع وجود داشته باشد، تغییرات و پویایی پلاسما و شیمی واکنش را تغییر داده و کنترل کند [۲۳]. حضور جت‌های پلاسما تحت فشار اتمسفر در هوای آزاد در دماهای معتدل گازی عمل می‌کند. علاوه بر آن، فعالیت شیمیایی بالای پلاسما، باعث تعدد موارد استفاده این وسیله شده است. امکان تولید ذرات باردار، گونه‌های شبه‌پایدار خنثی، رادیکال‌ها و اشعه ماوراء بنفش در دمای گاز قابل تحمل از نظر بیولوژیکی، اجازه می‌دهد که این منابع برای کاربردهای زیست پزشکی مفید باشند، مانند غیرفعال کردن باکتری‌ها روی سطوح حساس به گرما، بهبود زخم یا درمان سرطان. اما همچنین در زمینه فعال سازی سطح و اصلاح و همچنین رسوب فیلمهای نازک جتهای پلاسما تحت فشار جوی سرد دارای پتانسیل عظیمی هستند [۳۲].

۲ - ۱ مطالعات انجام شده

پلاسما در حال تبدیل شدن به یک منبع جهانی برای راه اندازی سریع آزمایشهای بین رشته ای است. در دهه گذشته، جت های پلاسمای فشار اتمسفری به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است.

توسعه دستگاه های جت پلاسما تحت فشار جوی بیش از ۵۰ سال سابقه دارد. در اواخر دهه نوزدهم، جت های پلاسما تحت فشار اتمسفری با قوس الکتریکی مورد مطالعه قرار گرفتند و برای تجاری سازی پیشنهاد شدند. یکی از پیشگامان مورد اشاره، گابریل جیانینی^۱ بود که قبلاً در سال ۱۹۵۷ چشم انداز استفاده از چنین منابع پلاسمایی با دمای بالا را برای اهداف پیشران و برای برش کاربردی می دانست. در دهه های بعد، مطالعات بنیادی بر روی این جت های حرارتی، با دمای گاز بالاتر از ۱۰۰۰ K انجام شد، تا از این طریق بینش های بدنی در مورد خصوصیات بدنی پلاسما حاصل شود. با پایان دهه نوزدهم، تلاش های زیادی صورت گرفت تا فرآیندهای پلاسما با فشار کم به شرایط فشار اتمسفر منتقل شوند و از این طریق از شر خلأهای گران قیمت خلاص شوند [۳۲].

بویژه مجموعه ای از کارهای سیستماتیک در مورد مکانیسم ها و کاربردهای جت های پلاسمای فشار جو توسط گروه لو^۲ و لاروسی^۳ و گروه کنگ^۴ منتشر شده است. یک مقاله مروری توسط گروه ولتمن^۵ ارائه شده است که یک مرور کلی درباره دستگاه ها و مسیرهای جدید جت های پلاسمای فشار جو از سال ۲۰۱۲ ارائه می دهد.

^۱ Gabriel Gianinni

^۲ Lu

^۳ Laroussi

^۴ kong

^۵ Weltmann

۲-۲ انواع پیکربندی جت پلاسما

گاز کاری یکی از اصلی ترین عواملی است که بر خصوصیات جت پلاسمای فشار اتمسفری تأثیر می گذارد و در واقع این نوع گاز کاری است که گونه های مورد نیاز ما برای پردازش اجسام و ایجاد تأثیر مطلوب بر آنها را برای ما فراهم می آورد. لذا در این تحقیق، انواع پیکربندی جت پلاسما بر اساس نوع گازی که برای اشتعال آنها استفاده می شود، گروه بندی می شوند [۱]. جت های پلاسمای ساخته شده تاکنون معمولاً از گاز های نجیب مانند آرگون و هلیوم و...، گازیترژن، هوا و دیگر گازها بهره برده اند که در اینجا به تفصیل به هر کدام پرداخته شده است:

۲-۲-۱ جت پلاسما گاز نجیب

تاکنون انواع مختلفی از جت های پلاسما با پیکربندی های مختلف که در آن اکثر جت ها با گاز نجیب و یا مخلوط گاز نجیب با گازهای واکنش پذیری مانند اکسیژن گزارش شده است. جت های پلاسمائی که با گازهای نجیب کار می کنند، می توانند به چهار دسته زیر تقسیم شوند [۱، ۵]. جت های الکتروود بدون دی الکتریک^۱ (DFE)، جت های تخلیه دی الکتریک (DBD)، جت های شبیه DBD^۲ و جت های تک الکتروود^۳ (SE) که در این بخش به توضیح این مدل ها می پردازیم:

۲-۲-۱-۱ جت الکتروود بدون دی الکتریک

یکی از اولین APNP-J^۴ ها، که توسط گروه هیک^۵ ساخته شده و توسعه یافته است، جت DFE است، که در شکل ۲-۱ نشان داده شده است. این جت توسط یک منبع پرتوی رادیویی (RF) با فرکانس ۱۳.۵۶ مگاهرتز هدایت می شود. دستگاه از یک الکتروود داخلی که به منبع تغذیه متصل و یک الکتروود بیرونی زمین شده همراه است.

^۱ Dielectric-Free Electrode Jets

^۲ DBD-Like jets

^۳ single electrode

^۴ Atmospheric-Pressure Non-equilibrium Plasma Jet

^۵ Hick

معمولاً از مخلوط گاز هلیوم با یک گاز واکنشی به عنوان گاز کاری استفاده شده و به فضای حلقوی بین دو الکترود فرستاده می‌شود. برای جلوگیری از گرم شدن جت، سیستم خنک کننده مورد استفاده قرار می‌گیرد و دمای گاز جت پلاسما از ۵۰ تا ۳۰۰ درجه سانتیگراد بسته به توان RF می‌تواند متفاوت باشد [۱].

در رابطه با جت های DFE باید به چند نکته توجه داشت:

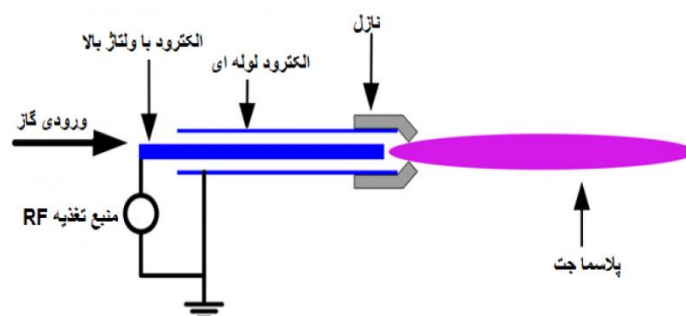
در مرحله اول، اگر شرایط عملکرد پایدار برآورده نشود، دستگاه جرقه خواهد زد.

دوم، در مقایسه با جت های DBD و شبه DBD که در ادامه مورد بحث قرار خواهد گرفت، قدرت تحویل شده به پلاسما برای جت DFE بسیار بیشتر است.

سوم، با توجه به قدرت بالای تحویل، دمای گاز پلاسما بسیار بالا و خارج از حد قابل قبول برای کاربردهای زیستی و پزشکی است.

چهارم، برای جت DFE که توسط منبع تغذیه RF هدایت می‌شود، حداکثر ولتاژ تنها چندصد ولت است، بنابراین میدان الکتریکی موجود در فضای تخلیه نسبتاً کم و جهت آن عمود بر جهت گردش گاز (شعاعی) است.

میدان الکتریکی در ناحیه پلاسما، به خصوص در طول جهت انتشار پلاسما (جهت جریان گاز) حتی کمتر از بقیه نواحی است. در پایان، از آنجایی که میدان الکتریکی در طول جهت انتشار پلاسما بسیار کم است، تولید ستون پلاسما به وسیله جریان گاز به جای پارامترهای الکتریکی هدایت می‌شود. به عبارتی از آنجایی که می‌توان، توان



شکل ۱-۲. جت DFE [۱]

بسیار بالایی را به پلاسما تحویل داد و دمای گاز نسبتاً زیاد است، پلاسما بسیار واکنش پذیر خواهد بود و این خود باعث می شود که نوع جت پلاسما برای کاربردهایی همچون پردازش مواد غیرحساس به دمای بالا، مناسب باشد [۱].

۲-۱-۲-۲ جت های DBD

برای جت های DBD، همانطور که در شکل ۲-۲ (a - e) نشان داده شده است، پیکربندی های مختلف و زیادی وجود دارد.

شکل a نشان دهنده طرحی است که برای اولین بار توسط تسک^۱ و همکاران گزارش شده است [۳۳]. در این ساختار، جت از یک لوله دی الکتریک با دو الکترود حلقه ای فلزی که در قسمت خارجی لوله قرار گرفته اند، تشکیل شده است. با جریان یافتن یک گاز کاری (Ar, He) داخل لوله دی الکتریک و روشن شدن یک منبع تغذیه با ولتاژ بالا (HV) و فرکانس در مرتبه کیلوهرتز، یک جت پلاسما سرد در هوای اطراف ایجاد می شود. توان مصرفی این نوع جت پلاسما در حد وات است و دمایی نزدیک به دمای اتاق دارد. سرعت جریان گاز حدود ۲۰ متر بر ثانیه است.

در نوع دیگری که در شکل ۲-۲ b نشان داده شده است، فقط از یک الکترود حلقه استفاده می شود. این کار سبب می شود تخلیه داخل لوله دی الکتریک ضعیف تر از حالت قبل گردد [۳۴].

در شکل ۲-۲ c الکترود حلقه ای ولتاژ بالا با یک الکترود سوزنی مرکزی که با یک لایه دی الکتریک پوشانده شده است، جایگزین می شود. با استفاده از این تنظیمات، میدان الکتریکی در امتداد ستون پلاسما افزایش می یابد.

^۱ Teschke

مطالعات والش^۱ و کنگ [۳۵] نشان می دهد که قرارگیری یک میدان الکتریکی بالا در امتداد ستون پلاسما، برای تولید ستون پلاسما طولانی و شیمی پلاسما فعال تر، بسیار مطلوب است.

در ساختار چهارم که در شکل ۲-۲ d نشان داده شده است، الکتروود حلقه زمین (قابل مشاهده در شکل ۲-۲ c) حذف می شود. بنابراین تخلیه داخل لوله ضعیف می گردد.

باید توجه داشت که، تخلیه قوی تر درون لوله تخلیه (شکل ۲-۲ a و c) به تولید گونه های واکنش پذیرتر کمک می کند. در کنار جریان گاز، گونه های واکنشی با طول عمر نسبتاً طولانی نیز ممکن است نقش مهمی در کاربردهای مختلف داشته باشند.

پیکربندی شکل ۲-۲ e، توسط لو و لاروسی [۳۶] ایجاد شده و با چهار دستگاه جت DBD قبلی متفاوت است. دو الکتروود حلقه به سطح دو دیسک دی الکتریک که مرکزشان سوراخ است (واشر مانند) متصل می شوند. سوراخ های مرکز دیسک ها به قطر حدود ۳ میلی متر هستند و فاصله بین دو دیسک دی الکتریک حدود ۵ میلی متر است. با استفاده از این دستگاه می توان یک ستون پلاسما به طول چندین سانتی متر را به دست آورد.

تمام دستگاه های جت DBD که در بالا مورد بحث قرار گرفت می توانند با منبع تغذیه جریان متناوب- کیلوهرتز (AC) یا با منبع DC پالس کار کنند. طول جت پلاسما به راحتی می تواند به چندین سانتی متر یا حتی طبق گزارش لو و همکاران به بیشتر از ۱۰ سانتی متر برسد [۳۷].

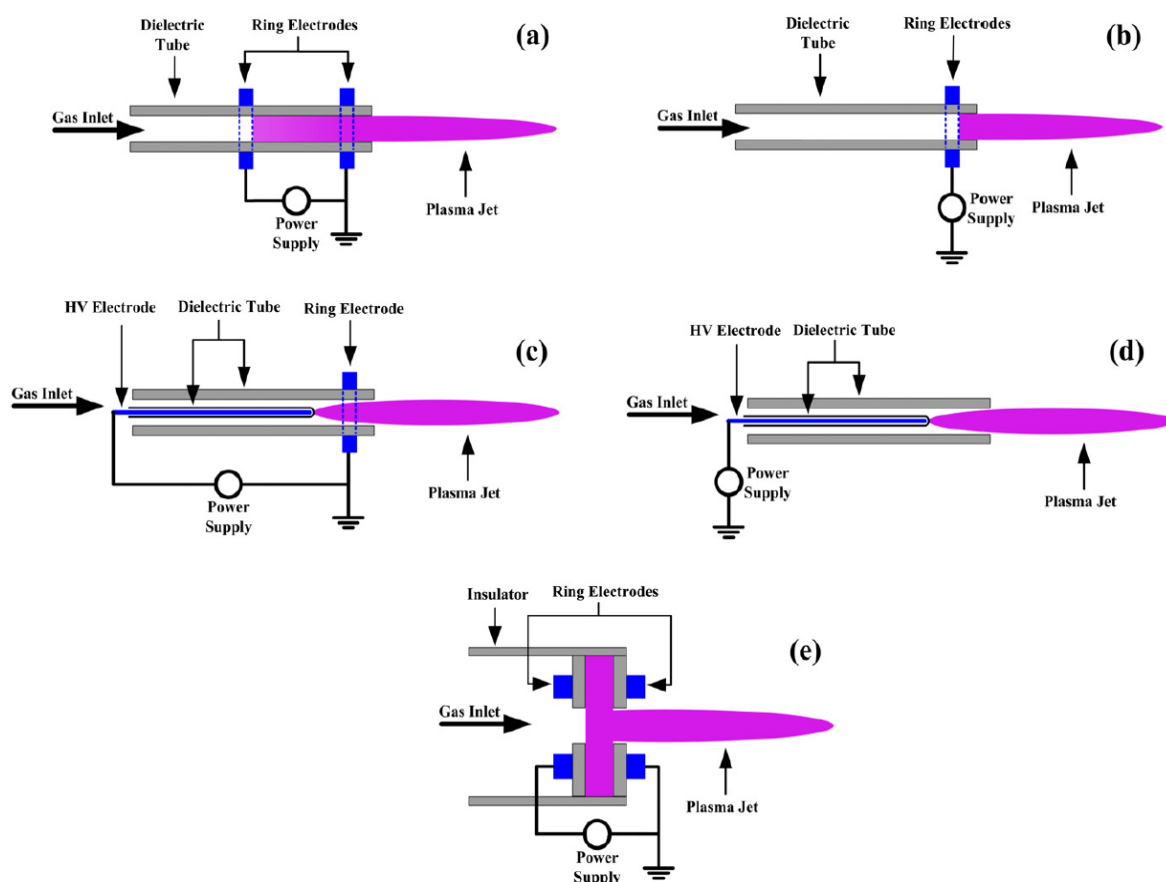
این قابلیت، عملکرد این جت های پلاسما را آسان و بسیار کاربردی می کند. چندین مزیت دیگر از جت های DBD نیز وجود دارد که در ذیل به آنها اشاره می کنیم:

اول، به دلیل توان کم تحویل داده شده به پلاسما، دمای گاز پلاسما نزدیک به دمای اتاق باقی مانده است.

^۱ Walsh

دوم، به دلیل استفاده از دی الکتریک، هیچ خطری برای ایجاد قوس وجود ندارد که آیا موردی که تحت پردازش قرار می گیرد، دور یا نزدیک نازل قرار گرفته باشد.

این دو ویژگی برای کاربردهای پزشکی، در جایی که ایمنی یک نیاز جدی است، بسیار مهم هستند.



شکل ۲-۲ پیکربندی های مربوط به جت های DBD [۱]

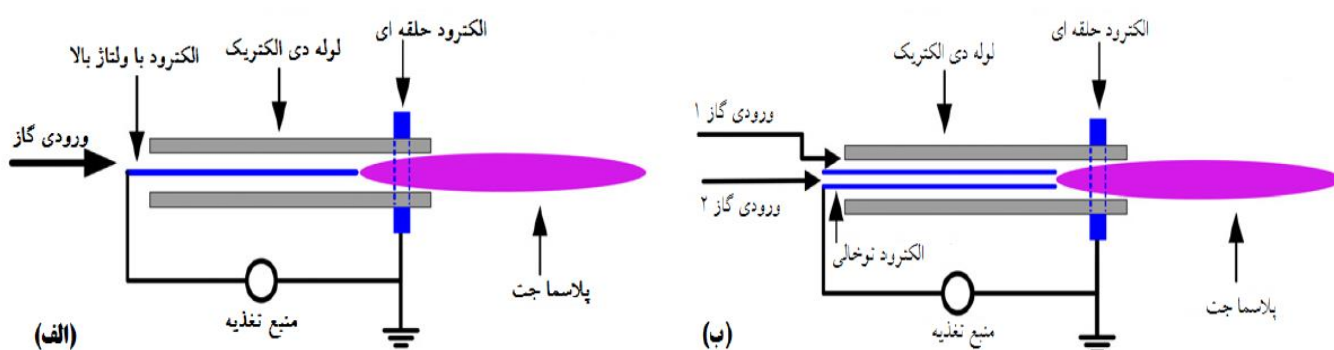
۲-۱-۲-۲ جت های شبه DBD

انواع دستگاه های جت پلاسمای شبه DBD در شکل ۲-۳ نشان داده شده است. اساس کار این دستگاه ها به گونه ای است که هنگامی که ستون پلاسما با هیچ جسمی در تماس نباشد، تخلیه کم و بیش شبیه یک DBD است. اما هنگامی که ستون پلاسما در تماس با یک جسم رسانا الکتریکی به ویژه رسانای زمین شده باشد، تخلیه بین

الکتروود ولتاژ بالا (HV) و جسم مورد پردازش، ایجاد می گردد. در چنین مواردی، دستگاه مانند یک DBD عمل نمی کند. این دستگاه ها قادرند با یک منبع تغذیه جریان متناوب کیلوهرتزی، RF و یا با یک منبع DC پالس کار کنند. در ساختار شکل ۲-۳ الف از یک الکتروود حلقه ای به عنوان کاتد (زمین شده) و یک الکتروود میله ای به عنوان الکتروود ولتاژ بالا استفاده گردیده است.

اما در شکل ۲-۳ ب یک الکتروود میله ای تو خالی جایگزین الکتروود توپر شده است. فایده این نوع پیکربندی این است که می توان دو گاز مختلف را در دستگاه مخلوط کرد. به طور معمول، از ورودی گاز ۲ برای گاز واکنشی مانند اکسیژن و ورودی گاز ۱ برای گاز نجیب استفاده می شود. مطالعات نشان داده است که ستون پلاسما با این نوع ترکیب و کنترل گاز، بسیار طولانی تر از ترکیب های از قبل انجام شده با همان درصد است [۱].

هنگامی که از جت های پلاسمای شبه DBD برای کاربردهای پزشکی همچون درمان یک سلول و یا یک بافت کامل استفاده می شود، به دلیل خطر جرقه، باید در کاربری آن بسیار دقت شود. نکته دیگری که باید به آن توجه داشت این است که اگر از این دستگاه برای پردازش مواد رسانا استفاده شود، به دلیل عدم وجود دی الکتریک توان بیشتری به پلاسما داده می شود.

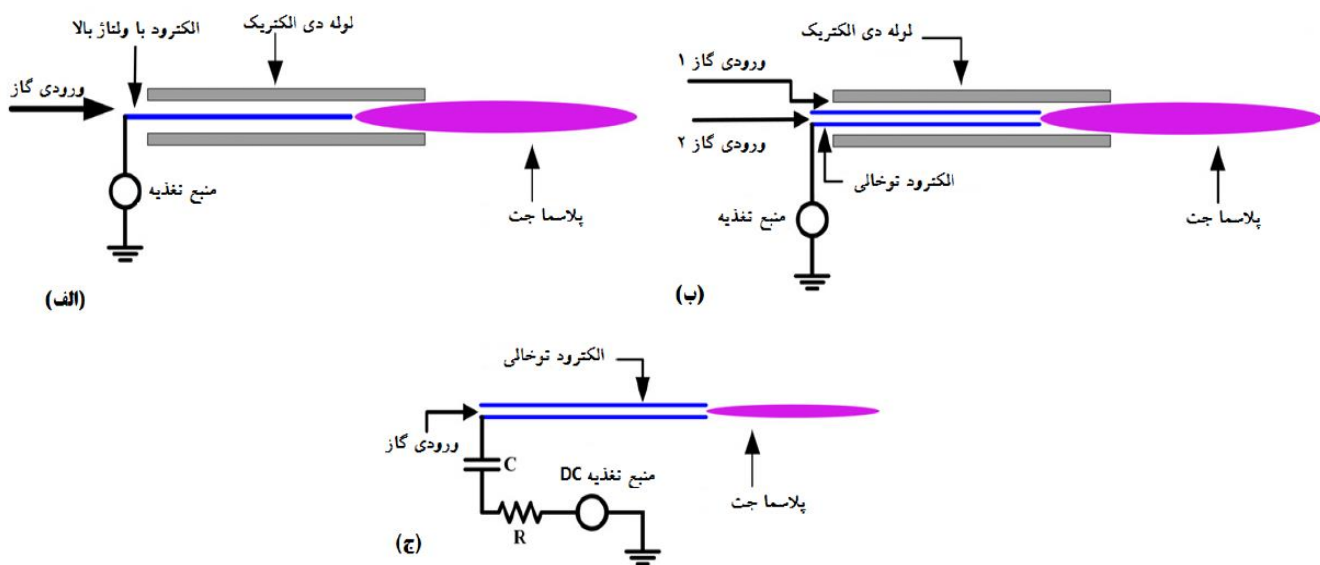


شکل ۲-۳ جت های شبه DBD الف) استفاده از الکتروود میله ای به عنوان آند.

ب) استفاده از الکتروود میله ای تو خالی [۱]

۲-۱-۲-۴ جت تک الکتروود (SE)

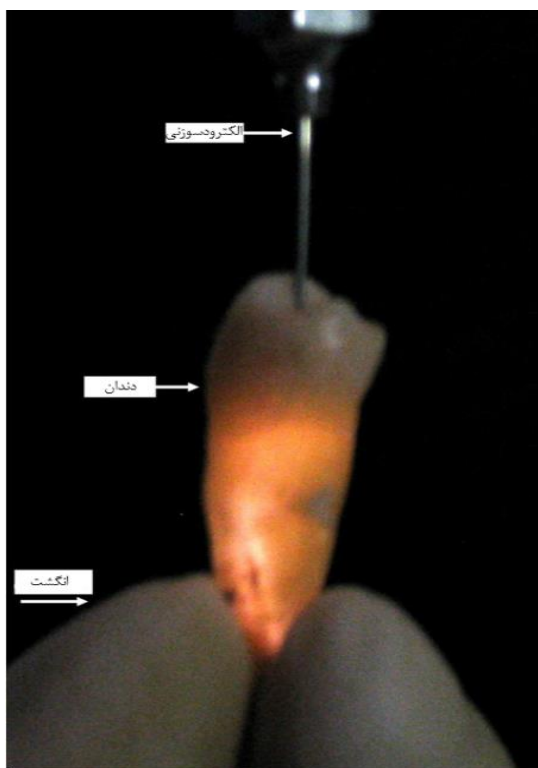
ساختار شماتیک جت های تک الکتروود، در شکل ۲-۴ (الف و ب) نشان داده شده است. این سبک جت ها مانند جت های شبه DBD هستند با این تفاوت که الکتروود حلقه ای در قسمت بیرونی لوله دی الکتریک حذف شده است. مانند موارد قبل لوله دی الکتریک جریان گاز را هدایت می کند. این مدل جت نیز می تواند با منابع تغذیه جریان مستقیم (DC)، جریان متناوب کیلو هرتزی (AC)، RF و یا منبع DC پالس کار کند.



شکل ۲-۴ انواع جت های تک الکتروود (SE) [۱]

به دلیل خطر قوس الکتریکی، ستون های پلاسما ایجاد شده در شکل الف و ب، ایمنی لازم برای کاربردهای پزشکی ندارند. برای غلبه بر این مشکل، لو و همکاران [۳۸] یک جت SE مانند نمونه در شکل ۲-۴ ج را ارائه دادند. خازن C و مقاومت R به ترتیب در حدود ۵۰ pF و ۶۰ kΩ است. مقاومت و خازن برای کنترل جریان تخلیه و ولتاژ روی الکتروود توخالی (سوزنی) استفاده می شود. این جت با منبع تغذیه پالس DC با پهنای پالس ۵۰۰ نانومتر، فرکانس تکرار ۱۰ کیلوهرتز و دامنه ۸ کیلو ولت هدایت می شود. مزیت این جت این است که می توان

توده پلاسما یا حتی الکتروود توخالی را بدون هیچ گونه خطر آسیب دید لمس کرد و از آن برای کاربردهای پزشکی بهره برد. یکی از کاربردهای بالقوه آن در دندانپزشکی مانند درمان کانال ریشه است. با توجه به هندسه کانال باریک ریشه، که به طور معمول دارای طول چند سانتی متر و قطر ۱ میلی متر یا کمتر است، پلاسما ایجاد شده توسط جت پلاسما برای ارائه عوامل واکنش دهنده به کانال ریشه جهت ضد عفونی کارآمد نیست. بنابراین، برای داشتن یک اثر ضد عفونی و باکتری زدایی بهتر، باید یک پلاسما در داخل کانال ریشه ایجاد شود. هنگامی که پلاسما در داخل کانال ریشه ایجاد می شود، عوامل واکنش دهنده، از جمله گونه های کوتاه مدت، مانند ذرات باردار، می توانند در کشتن باکتری ها نقش مفیدی داشته باشند. با استفاده از دستگاه نشان داده شده در شکل ۲-۴ ج، می توان پلاسما سرد را در داخل کانال ریشه ایجاد کرد. شکل ۲-۵ نمونه ای از این مورد را نشان می دهد.



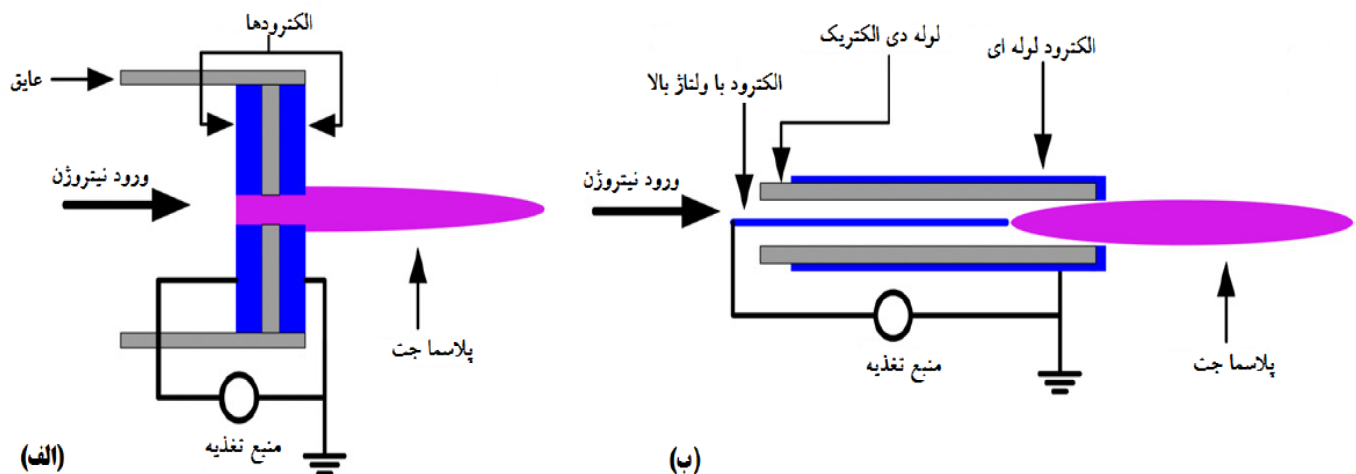
شکل ۲-۵. پلاسمای ایجاد شده در داخل کانال ریشه دندان [۱]

۲-۲-۲ جت پلاسمای نیتروژن

به دلیل تولید سخت پلاسمای نیتروژن، دستگاه‌های بسیار کمی از آن تاکنون ساخته شده‌اند. شکل ۲-۶ ساختار شماتیک این نوع جت را نشان می‌دهد. جت پلاسمای نشان داده شده در قسمت الف توسط هونگ^۱ و اوم^۲ ارائه شده است [۳۹]. این نوع جت از یک منبع تغذیه جریان متناوب ۲۰ کیلوهرتز برای ایجاد میدان الکتریکی در دو الکترود حلقه‌ای با ضخامت ۳ میلی‌متر و قطر سوراخ مرکزی ۵۰۰ میکرومتری استفاده می‌کند.

الکترودها توسط یک لایه دی الکتریک حلقه‌ای (دارای سوراخ مانند خود الکترودها) از هم جدا شده‌اند. این پیکربندی قادر است جت پلاسمای نیتروژن تا طول ۶.۵ سانتی‌متر را تولید کند.

شکل ۲-۶ ب از ساختاری متفاوت برای تولید جت پلاسمای نیتروژن بهره می‌گیرد. الکترود ولتاژ بالا، سوزنی شکل و توخالی است و الکترود زمین به شکل لوله‌ای است و بدنه‌ی دستگاه را دربر می‌گیرد. از فضای خالی الکترود ولتاژ بالا برای ورودی گاز استفاده می‌شود و لایه‌ی دی الکتریک لوله‌ای دو الکترود را از هم جدا می‌سازد.



شکل ۲-۶ ساختار جت‌های مربوط به تولید پلازما با گاز نیتروژن [۱]

^۱ Hong

^۲ Uhm

۲-۲-۳ جت پلاسما هوا

در این نوع جت از هوای فشرده شده به عنوان گاز کاری استفاده می شود اما وجود گاز الکترون گاتیو اکسیژن (O_2) باعث می شود پایداری پلاسما مختل شود. با این وجود باز هم چندین نوع از پیکربندی جت پلاسمای هوای فشار اتمسفری ساخته شده است که در این بخش به آن ها پرداخته می شود.

عبدالعلیم محمد و همکارانش [۴۰] یک دستگاه جت میکروپلاسما که توانایی کار با گازهای مختلف از جمله هوا داشت را ارائه دادند. شکل شماتیک این دستگاه در شکل ۲-۷v نشان داده شده است.

یک کانال تخلیه از طریق عایق با ضخامت حدود ۰.۵-۰.۲ میلی متر و قطر ۰.۸-۰.۲ میلی متر آند را از کاتد، که دارای یک سوراخ مرکزی با قطر یکسان است، جدا می کند. یک مقاومت $51\text{ k}\Omega$ در این دستگاه نیز به کار رفته است.

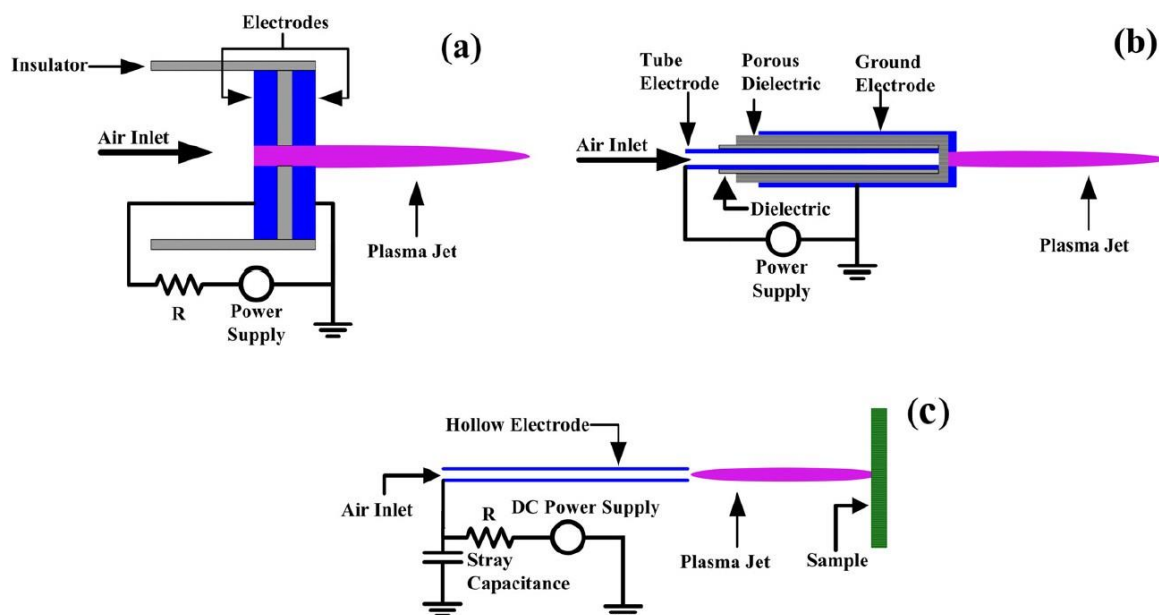
هنگامی که هوا از درون حفره جریان می یابد و ولتاژ DC چند صد ولت (حداکثر کیلوولت) بین آند و کاتد اعمال می شود (بسته به ضخامت عایق که الکترودها را از هم جدا می کند)، یک پلاسما هوا با درجه حرارت نسبتاً کم بسته به سرعت جریان گاز و جریان تخلیه، در هوای اطراف با طول بیش از ۱ سانتی متر تولید می شود. دمای گاز درون میکروگپ در حدود ۱۰۰۰ درجه کلوین است. با این حال، به محض انتشار در هوای اطراف، به سرعت کاهش می یابد و در حدود ۵۰ درجه سانتیگراد در ۵ میلی متر از نازل می شود. (سرعت جریان هوا ۲۰۰ میلی لیتر در دقیقه و جریان تخلیه ۱۹ میلی آمپر است).

هونگ و همکاران [۴۱] نوع دیگری از دستگاه جت پلاسما هوا را که در شکل ۲-۷b نشان داده شده، ارائه کردند. در این دستگاه از یک دی الکتریک آلومینا متخلخل برای جدا کردن الکتروود ولتاژ بالا (از جنس فولاد ضدزنگ) و الکتروود زمین شده بیرونی استفاده می شود. آلومینای مورد استفاده در این دستگاه تقریباً ۳۰ درصد تخلخل دارد

و متوسط قطر منافذ آن ۱۰۰ میلی متر است. الکتروود زمین شده نیز از فولاد ضدزنگ ساخته شده است و دارای یک سوراخ به قطر ۱ میلی متر است که از طریق آن جت پلاسما به هوای محیط اطراف منتقل می شود.

هنگامی که یک نیرو توسط منبع تغذیه ولتاژ بالای ۶۰ هرتزی به دستگاه اعمال می شود و سرعت جریان هوا در چندین لیتر بر دقیقه است، یک جت پلاسمای فشار اتمسفری تا حدود ۲ سانتی متر در هوای اطراف ایجاد می شود. در طی یک چرخه ولتاژ، تخلیه های متعدد وجود دارد. افزایش قدرت ورودی منجر به پالس های جریان بیشتر می شود. اما دمای گاز بسیار زیاد پلاسما یکی از عیوب این دستگاه است. برای مثال دمای پلاسما در فاصله ۱۰ میلی متری از سر نازل حدود ۶۰ درجه سانتی گراد است. این در حالی است که سرعت جریان هوا SLM ۵ است و بالطبع با کندتر شدن سرعت جریان، دمای گاز حتی بالاتر نیز می رود.

شکل ۲-۷ C طرحواره ای از جت پلاسما هوا با دو الکتروود شناور را نشان می دهد. این جت می تواند پلاسمای هوا در دمای اتاق ایجاد کند. این در حالی است که کاملاً از نظر الکتریکی ایمن می باشد و هیچ آسیبی به حیوانات یا انسان وارد نمی کند.



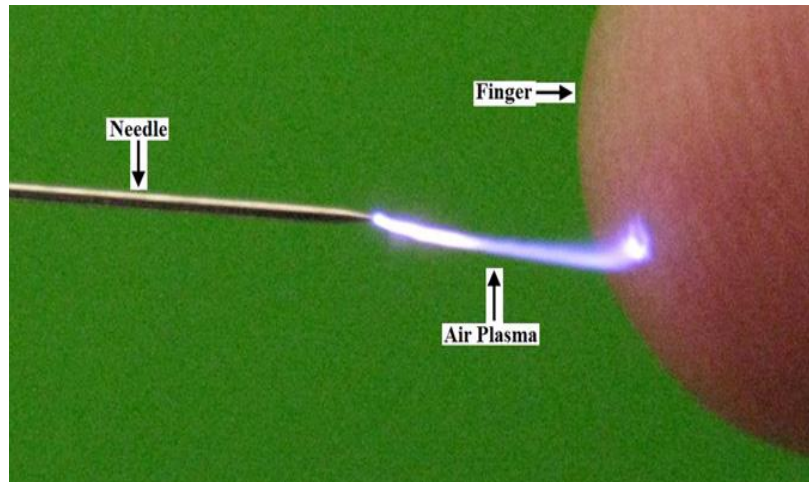
شکل ۲-۷. پیکربندی های جت پلاسمای هوا [۵]

در این نوع جت می‌توان از یک منبع جریان متناوب کیلو هرتزی (AC) و یا پالس ولتاژ DC با دامنه ۱۰-۳۰ کیلو ولت برای راه اندازی دستگاه استفاده کرد. شروع تخلیه هنگامی اتفاق می‌افتد که الکتروود ولتاژ بالا به سطح نزدیک شود. فاصله (کمتر از ۳ میلی متر) ، نوع، مدت و قطبیت ولتاژ اعمالی نیز بر ایجاد تخلیه تاثیر گذارند. این نوع جت برای پردازش‌های موضعی سه بعدی مناسب می‌باشد.

این جت توسط منبع تغذیه DC هدایت می‌شود. ولتاژ خروجی منبع تغذیه را می‌تواند بیشتر ۲۰ کیلو ولت تنظیم شود. خروجی منبع تغذیه از طریق یک مقاومت $R (120\text{ M}\Omega)$ به یک الکتروود سوزن از جنس استیل ضدزنگ (سوزن تزریق معمولی) متصل می‌شود. هنگامی که یک الکتروود زمین شده، مانند انگشت ، نزدیک سوزن قرار می‌گیرد، پلاسما ایجاد می‌شود. همانطور که در شکل ۲-۸ نشان داده شده است، پلاسما شبیه تخلیه کرونا است. با این تفاوت که این جت را می‌توان مستقیماً توسط بدن انسان لمس کرد، که در مورد تخلیه کرونا این امکان وجود ندارد. نکته ی دیگر قابل توجه این است که در این نوع جت، خطر انتقال به قوس الکتریکی وجود ندارد.

حداکثر طول پلاسما حدود ۲ سانتی متر است و پلاسما در دمای اتاق حفظ می‌شود. لازم به ذکر است که این تخلیه در واقع پالسی است. بسته به ولتاژ اعمال شده و فاصله بین نوک سوزن و شیء مورد پردازش، به صورت دوره ای با فرکانس تکرار ده ها کیلوهرتز ظاهر می‌شود.

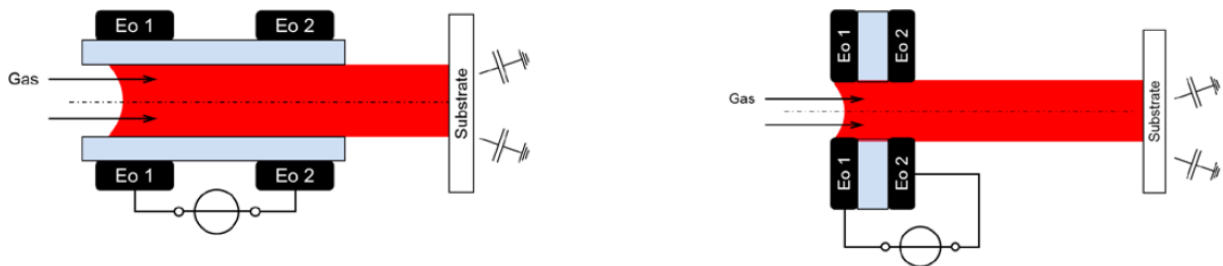
این جت های پلاسما هوا نیز می‌توانند با گاز N_2 کار کنند. از طرف دیگر ، وسیله نشان داده شده در شکل ۲-۶ الف را می‌توان با هوا نیز کار کرد. اما حداکثر طول ستون هوا پلاسما با جت نشان داده شده در شکل ۲-۶ الف حدود ۲ سانتی متر است. علاوه بر این، جت نشان داده شده در شکل ۲-۴ ج همچنین می‌تواند با هوا به عنوان گاز در حال کار باشد. اما طول پلاسما فقط چند میلی متر است.



شکل ۲-۸. قرار گرفتن انگشت در سوزن پلاسمایی به عنوان الکترود زمین [۱]

یکی دیگر از طرح های گروه بندی در مورد هندسه، جهت یابی میدان الکتریکی با توجه به جهت جریان گاز است. جهت میدان الکتریکی با توجه به جهت جریان گاز برای پیکربندی مختلف جت پلازما متفاوت است. میدان الکتریکی می تواند موازی با جریان گاز یا عمود بر جریان گاز باشد.

مطابق بررسی اجمالی صورت گرفته توسط لاو^۱ و انگل^۲ [۳] جت های پلازما را می توان به جت های میدان خطی، جت های میدان متقاطع و جت های میدان انتهایی تقسیم کرد. طراحی شماتیک پیکربندی میدان های توصیف شده را می توان در اشکال این پایان نامه یافت. در چیدمان های جت خطی، دو الکترود دایره ای موازی در اطراف یک لوله دی الکتریک چیده شده اند تا بتوانند یک میدان الکتریکی موازی با شار گاز ورودی تولید کنند (شکل ۲-۹).



شکل ۲-۹. ایجاد یک میدان الکتریکی موازی با شار گاز [۳]

^۱ Law

^۲ Anghel

همچنین می توان از یک الکتروود دایره ای واحد در ترکیب با یک صفحه بستر زمینی استفاده کرد تا یک پیکربندی میدان خطی شکل بگیرد.

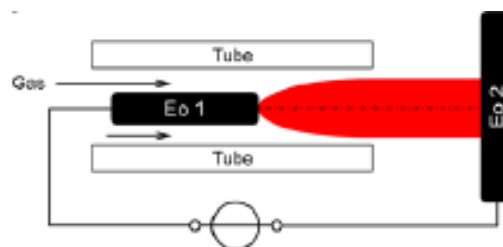
در چیدمان سطح متقاطع ، الکتروودها به صورت هم محور قرار می گیرند و یک میدان الکتریکی عمود بر شار گاز ایجاد می کنند (شکل ۲-۱۰).



شکل ۲-۱۰. ایجاد یک میدان الکتریکی عمود بر شار گاز [۳]

هنگامی که فقط یک الکتروود در یک انتهای داخل لوله دی الکتریک، یعنی در جایی که گاز وارد می شود، استفاده و قرار داده شود، پیکربندی را جت میدان انتهایی می نامند (شکل ۲-۱۱).

با استفاده از گازهای نجیب، می توان با فشار اتمسفر جت پلاسما را تولید کرد. به طور خاص با گاز هلیوم ، جت پلاسما فشار اتمسفری با طول تا ده ها سانتی متر تولید می شود. با این حال، جت های پلاسما گازهای نجیب به اندازه جت های پلاسما هوا واکنش پذیر نیستند. بنابراین، اکثر جت های پلاسمای فشار اتمسفری با گازهای نجیب مخلوط با درصد کمی از گازهای واکنشی مانند O_2 یا هوا کار می کنند.

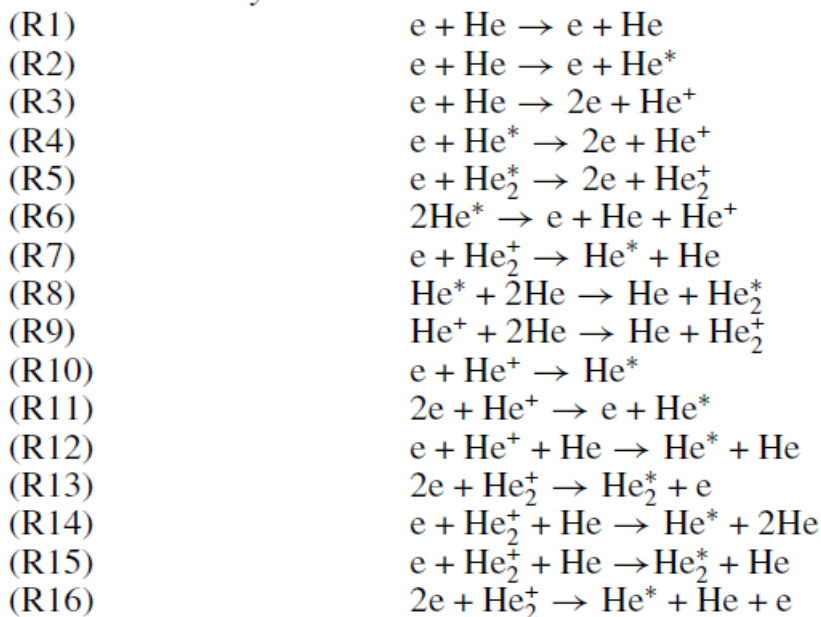


شکل ۲-۱۱. پیکربندی جت با میدان انتهایی [۳]

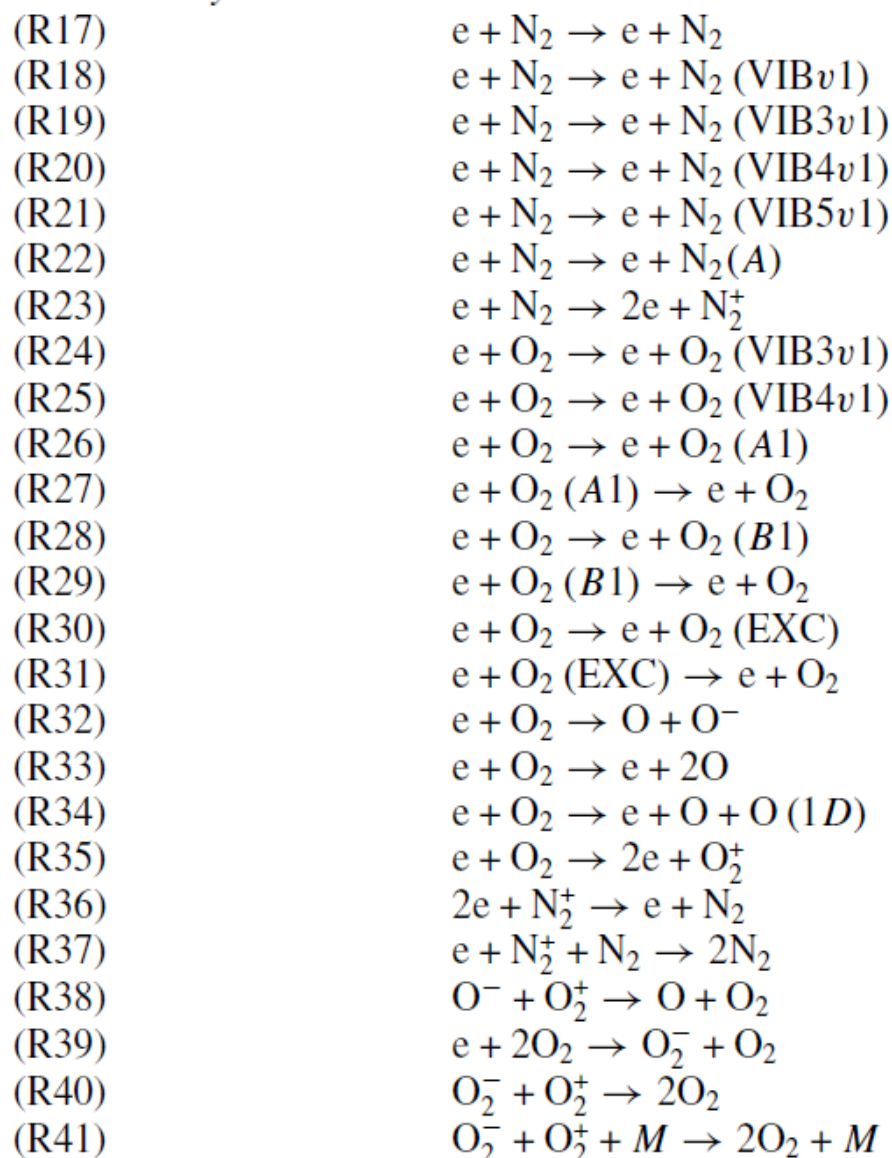
۲-۳ شیمی جت پلاسما

فعالیت های شیمیایی صورت گرفته در پلاسما مجموعه ای کامل است و تعداد زیادی از واکنش ها را شامل می شود. انواع واکنش های اصلی که در جت پلاسما اتفاق می افتد، در فاز گازی بوده و در نتیجه ی برخورد های غیرالاستیک بین الکترون ها گونه های سنگین و یا برخورد گونه های سنگین به یکدیگر است. این واکنش ها از انواع برانگیختگی اتم ها یا مولکول ها، واهلش، یونیزاسیون، تجزیه، بازترکیب، تجزیه ی پنینگ، یونیزاسیون پنینگ، تبادل بار، بازترکیب یون ها، بازترکیب الکترون-یون و بازترکیب الکترون-یون و ... می باشند. در ذیل انواع واکنش هایی که در جت پلاسمای هلیوم صورت می گیرد، نشان داده شده است [۴۲]:

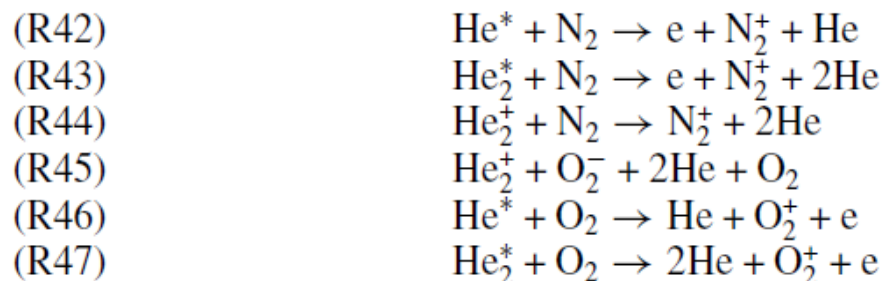
Helium chemistry



Air chemistry



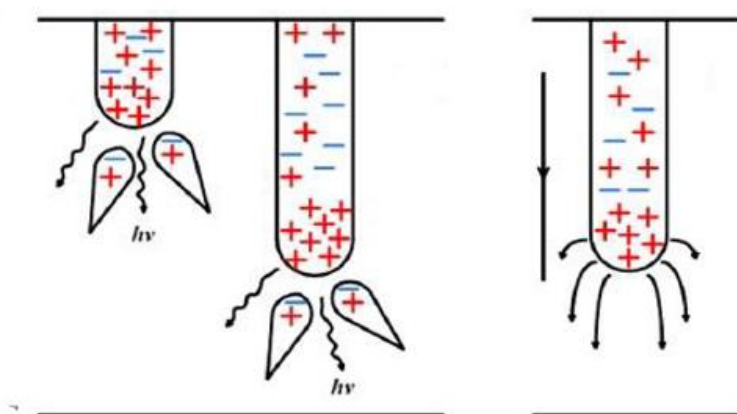
Helium–air interactions



۲- ۴ امواج یونیزاسیون و استریمرها

امواج یونیزاسیون صورت های مختلفی می توانند داشته باشند. ویژگی بارز تخلیه های فشار اتمسفری در ولتاژهای زیاد، تشکیل رشته های قوس محلی بین الکترودهای جدا شده بیش از چند میلی متر است. به این رشته ها که معمولی ترین نوع امواج یونیزاسیون هستند، استریمر گفته می شود. در حقیقت استریمر یک کانال پلاسمایی رو به رشد که سر آن معمولاً به شکل یک کره با شعاعی از مرتبه چند صد میکرومتر (در محیط های گازی فشار اتمسفری) است.

ذرات باردار به دلیل یونیزاسیون اتم ها و مولکول ها، در مقابل جبهه موج یونیزان منتشر شونده به وجود می آیند. عامل اصلی ایجاد آنها، میدان الکتریکی محلی موجود در مقابل جبهه موج است. بزرگی این میدان وابسته به چگالی حجمی بار موجود در خود موج یونیزاسیون است و حتی می تواند از میدان اعمالی خارجی نیز بزرگتر باشد. بنابراین جبهه موج یونیزاسیون با میدان الکتریکی جلوی خود می تواند محیط را یونیزه کند. در شکل ۲-۱۲ نشان داده می شود که در یونیزاسیون محیط توسط فوتون های ارسالی از سر استریمر، الکترون ها ایجاد می شوند. بعد از آن خود این الکترون ها تحت اثر میدان الکتریکی سر استریمر، برخوردهایی داشته و تولید یک بهمن الکترونی می کنند و این خود باعث افزایش طول کانال پلاسمایی می گردد.



شکل ۲-۱۲. استریمر

استریمرها در گازهای مولکولی نسبت به گازهای اتمی بسیار محتمل ترند و این به دلیل داشتن کانال های اضافی جذب انرژی (چرخش ، لرزش ، تحریک ، جداسازی و یونیزاسیون) گاز های مولکولی در مقایسه با گازهای اتمی است.

خواص استریمرها، به عنوان مثال سرعت انتشار، قطر، انشعاب و شکل، در درجه اول تحت تأثیر ولتاژ کاربری، جداسازی الکتروود و محتوای گاز مولکولی (به عنوان مثال اکسیژن در یک گاز حامل مانند هلیوم) قرار می گیرند. هر جا که پلاسما حضور داشته باشد، استریمر نیز می تواند در آنجا یافت گردد. برای نمونه حضور در طبیعت می توان به رعد و برق اشاره کرد واستریمرها را به عنوان " رعد و برق ریز " تصور کرد. 30 kA جریان در یک فلاش رعد و برق معمولی با قطر کانال جریان در حدود 0.1 متر در رعد و برق در مقایسه با 3 A جریان و قطر کانال 1 میلی متر می تواند نشان دهنده شباهت آنها در چگالی جریان باشد. علاوه بر این، استریمرها اغلب دارای انشعاب، شبیه به رعدوبرق هستند و مانند آنها پر سروصدا هستند. از دیگر نمونه های استریمر بر روی کره زمین، می توان به پلاسمای ایجاد شده در اطراف کابل های فشار قوی برق اشاره کرد.

در حالت کلی استریمرها باعث می شوند پلاسما به شدت غیر یکنواخت باشد و این برای پردازش های سطح مطلوب نیست چرا که قوس های جریان گرم می توانند به سطوح آسیب برسانند، به خصوص برای مواد نرم مانند پلیمرها. البته راهکارهای مختلفی برای جلوگیری از ایجاد و گسترش استریمرها وتشکیل پلاسماهای پایدار در فشار اتمسفر از جمله استفاده از لایه دی الکتریک و یا افزایش شار گاز و... ارائه شده است [۱۷].

۲-۴-۱ گلوله پلاسمایی

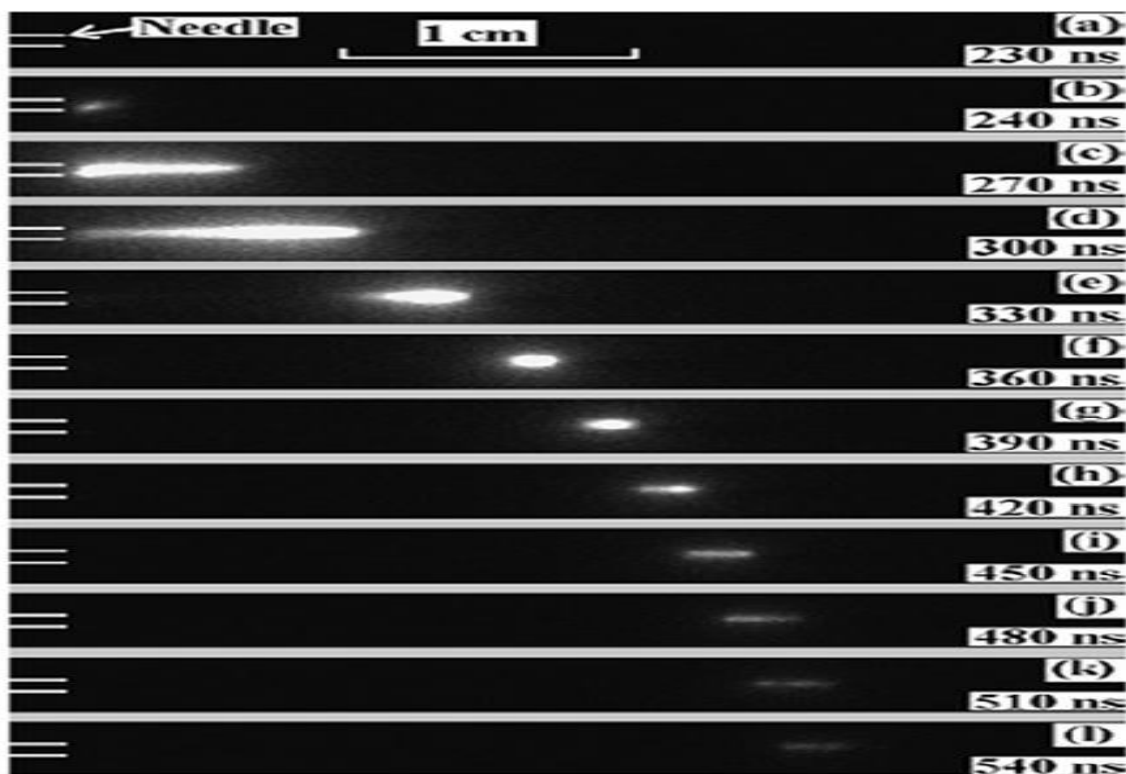
با استفاده از سیستم تصویربرداری سریع مشاهده شد تحت شرایط مناسب پلاسما به صورت بسته های مجزا به مانند گلوله های پلاسمایی دیده می شود که با سرعت های بالا منتشر میشوند. در واقع جت پلاسما، که با چشم غیر مسلح همگن به نظر می رسد، یک حجم پلاسما "گلوله" مانند با سرعت انتشار بیش از 10 کیلومتر در ثانیه است. از این رو جت پلاسما به دلیل ماهیتش، گاهی اوقات گلوله پلاسما نیز نامیده می شود.

میدان الکتریکی کاربردی، نقش مهمی در انتشار گلوله پلاسما دارد. از نظر ظاهری، ستون پلاسما مداوم از انتشار سریع ساختارهایی مانند گلوله ساخته شده است. لو و لاروسی برای توضیح رفتار گلوله ها، یک مدل استریمر پیشنهاد داده اند. گلوله پلاسما به عنوان یک موج یونیزاسیون هدایت شده در نظر گرفته می شود، که در تخلیه های بالای اتمسفر زمین نیز مشاهده می شود [۴۳].

برخلاف استریمرهای مستقیم کاتد، که به صورت تصادفی در فضای آزاد پخش می شود، در جت های پلاسمای فشار اتمسفری استریمرهای شبه گلوله، بارها و بارها در طول مسیر از پیش تعیین شده، هدایت شده و توسط پیکربندی جت پخش می شود. هنگامی که ولتاژ اعمال شده به آستانه رسید، جت پلاسما رفتار گلوله پلاسما را نشان می دهد، در حالی که در زیر آستانه ولتاژ، جت در حالت هرج و مرج عمل می کند [۴۴].

پارامترهای الکتریکی و گاز، دینامیک گلوله پلاسما را تعیین می کنند. با توجه به اینکه گلوله های پلاسمایی سرعت بسیار بالایی در هنگام انتشار دارند و تحولاتشان در حد نانو ثانیه است، برای بررسی و ثبت دینامیک زمانی آنها از سیستم تصویربرداری سریع^۱ ICCD استفاده می شود که معمولاً در هر لحظه یک توزیع دوبعدی از شدت گسیلی را ارائه می کند. اضافه نمودن یک فیلتر پالاینده نوری در مقابل دوربین ICCD ما را قادر می سازد تا توزیع دوبعدی شدت گسیلی را در یک طول موج خاص بدست آوریم و از آن برای به دست آوردن چگالی نسبی گونه های برانگیخته در پلاسما استفاده کنیم.

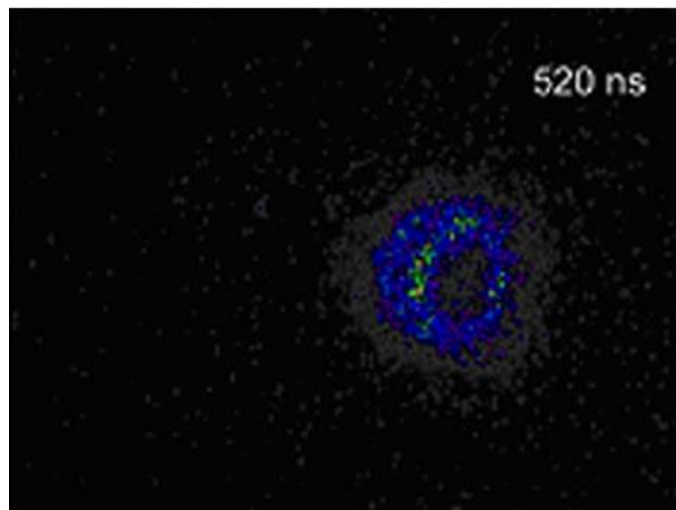
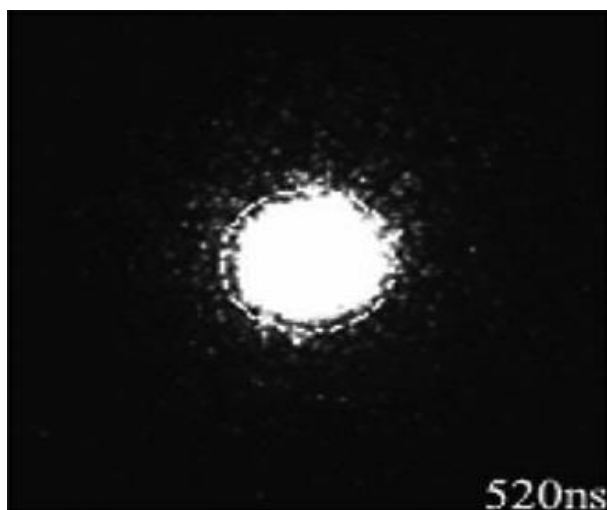
^۱ Intensified Charge Coupled Device (ICCD)



شکل ۲-۱۳. حالت تصادفی و گلوله ای از جت پلاسمای فشار اتمسفری [۱]

شکل ۲-۱۳ حالت تصادفی و گلوله ای از جت پلاسمای فشار اتمسفری را نشان می دهد که توسط ولتاژهای DC پالس با دامنه های کم و زیاد رانده می شود.

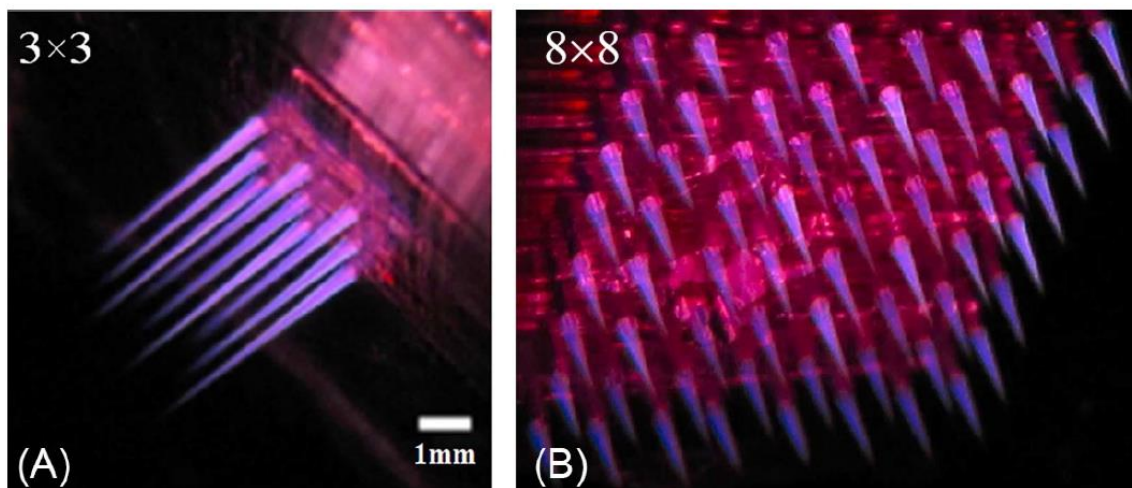
شکل گلوله پلاسمایی از نمای رو به رو و در حالت شعاعی در شکل ۲-۱۴ نشان داده شده است. هنگامی که جت هلیوم در هوا انتشار یافته است سر گلوله یک حالت دونات مانند (شبه حلقه) به خود گرفته است (شکل ۲-۱۴ راست) اما پس از آن با افزودن گاز نیتروژن به هلیوم شکل ۲-۱۴ چپ مشاهده شد که حالت حلقه توخالی از بین رفته است و این گفته آنان را که انتشار هوا را دلیل شکل حلقه ای گلوله می دانست را تایید کرد [۱].



شکل ۲-۱۴ شکل گلوله پلاسمایی از نمای رو به رو و در حالت شعاعی. سمت راست: جت هلیم در هوا. سمت چپ: انتشار پس افزودن اندکی گاز نیتروژن به هلیم [۱]

۲ - ۵ ابعاد جت پلاسما

اندازه جت پلاسمای فشار جو، می تواند بسیار انعطاف پذیر باشد. اندازه شعاعی جت پلاسما را می توان با کاهش قطر لوله دی الکتریک به محدوده میکرومتر کاهش داد. این کار مطالعات مربوط به تعامل جت های پلاسما با چند سلول بیولوژیکی یا حتی یک سلول واحد را امکان پذیر می کند. برای برنامه های کاربردی که نیاز به یک منطقه بزرگ یا درمان فله دارند ، جت پلاسمای فشار جو می تواند در امتداد سطح جسم قابل حرکت باشد یا در حالت آرایه عمل کند. عملیات تک بعدی یا دو بعدی آرایه های جت پلاسما توسط بسیاری از گروه ها مورد مطالعه قرار گرفته است. پایداری و یکنواختی عملکرد موازی چندین جت، نیازمند تعادل ولتاژ و جریان در چرخه ی مدار است. شکل ۲-۱۵ آرایه دو بعدی جت پلاسما دو نمونه از آرایه های جت پلاسما دو بعدی را نشان می دهد [۸].



شکل ۲-۱۵ آرایه دو بعدی جت پلاسما. (A) آرایه ۳×۳. (B) آرایه ۸×۸ [۸]

علاوه بر این ، مطالعات جالب اخیر در مورد تأثیر چندین جت پلاسما با قطره‌های کوچک بر روی همان محل هدف انجام شده است [۴۵]. این روش امکان ادغام چندین جت پلاسما و در نتیجه افزایش دوز ته نشینی تابش پلاسما را در یک مکان خوب فراهم می‌کند. همچنین می‌تواند ترکیب گونه‌های واکنش پذیر را با استفاده از مخلوط‌های مختلف گاز تغذیه کننده به هر جت تنظیم کند.

۲-۲ توان جت پلاسما

اینکه یک دستگاه جت پلاسما با چه اندازه ای از نیرو می‌تواند به ما پلاسما دهد، بسیار مهم است. توان متوسط پلاسما در یک چرخه را می‌توان به چند صورت محاسبه کرد:

روش اول استفاده از رابطه (۲-۱) است:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T VI dt \quad (2-1)$$

که در آن V نماد ولتاژ، I جریان و T نشانگر مقدار دوره تناوب است. لازم به ذکر است که منظور از جریان در اینجا همان جریان تخلیه است.

راه دیگر اندازه گیری توان پلاسما، استفاده از منحنی لیسازو است. منحنی لیسازو که منحنی باودیچ و یا منحنی ولتاژ - جریان نیز یاد می شود، از معادلات پارامتری زیر پیروی می کند:

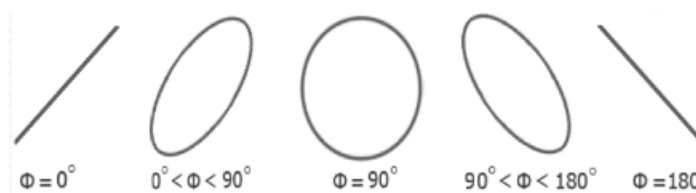
$$V = V. \sin(\omega_x t + \varphi_x) \quad (2-2)$$

$$I = I. \sin(\omega_y t + \varphi_y) \quad (2-3)$$

تغییرات کلی فاز، از تفریق دو فاز به دست می آید :

$$\varphi = \varphi_y - \varphi_x \quad (2-4)$$

نمودار I-V برای اختلاف فازهای مختلف در شکل ۲-۱۶ نشان داده شده است:



شکل ۲-۱۶. نمودار I-V برای اختلاف فازهای مختلف [۱۰]

اساس کار منحنی لیسازو استفاده از میزان بار منتقل شده در پلاسما است و مساحت سطح داخلی این نمودار میزان انرژی تخلیه را به ما نشان می دهد [۱۰].

$$E(L) = \int Q \cdot dV = A_{Lissajous} \quad (2-5)$$

۲- ۷ مقاومت پلاسما

ستون پلاسما به سطح مقطع A و طول z را می توان معادل یک مدار RC فرض کرد. برای بدست آوردن مقاومت این پلاسما می توان از اختلاف زمانی میان پیک های جریان ثبت شده در ابتدا و انتهای پلاسما استفاده کرد. اختلاف زمانی میان این دو پیک $\tau = RC$ است. از طرفی ظرفیت خازنی برای ستون پلاسما به طول z برابر $C = \epsilon \cdot A/z$ است، در نتیجه مقاومت در واحد طول را می توان به صورت رابطه (۲-۶) نوشت:

$$r = \frac{\tau}{Cz} = \frac{\tau}{\epsilon_0 A} \quad (2-6)$$

که در آن A سطح مقطع پلاسما و $\epsilon = 8.85 \times 10^{-12} F/m$ گذردهی الکتریکی است [۴۶].

۲- ۸ پهنای پالس

مدولاسیون پهنای پالس، نوعی سیگنال است که می توان آن را از IC دیجیتال مانند میکروکنترلر تولید کرد. سیگنال تولیدی یک قطار پالس بوده و این پالس ها یک شکل موج مربعی را تشکیل می دهند. به عبارت دیگر، در هر زمان معین، موج در وضعیت بالا (High) یا پایین (Low) خواهد بود. برای درک بهتر، یک سیگنال پالسی را با

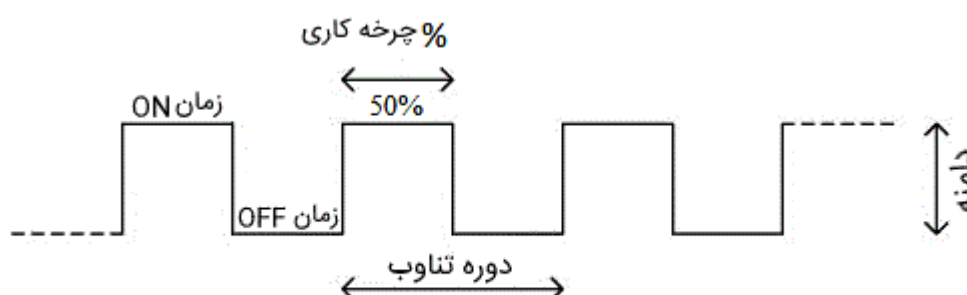
اندازه ۵ ولت در نظر بگیرید. در این صورت، سیگنال پالسی در وضعیت ۵ ولت (بالا) یا صفر ولت (پایین) است. مدت زمانی که سیگنال در وضعیت بالا قرار دارد، «زمان روشن» (On Time)، و مدت زمانی که سیگنال در وضعیت پایین است، «زمان خاموش» (Off Time) نامیده می شود.

چرخه کاری

چرخه کاری (Duty Cycle) یا سیکل وظیفه یا زمان کاری، مقدار زمان بالا بودن سیگنال نسبت به مدت یک دوره تناوب است. به این ترتیب که اگر سیگنال همواره روشن (ON) باشد، چرخه کاری آن ۱۰۰ درصد و هنگامی که کاملاً قطع (Off) باشد، مقدار چرخه کاری صفر است. اگر بخواهیم فرمول چرخه کاری را بنویسیم، داریم:

$$\text{چرخه کاری} = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} \quad (۲-۷)$$

که در آن t_{on} مدت زمان روشن بودن دستگاه، t_{off} مدت زمان خاموشی دستگاه و مجموع این دو مقدار، دوره تناوب را نشان می دهد. شکل ۲-۱۷ نمونه یک سیگنال پالسی را نشان می دهد.



شکل ۲-۱۷. نمونه یک سیگنال پالسی

۲ - ۹ طیف سنجی انتشار نوری (OES^۱)

یکی دیگر از راه های توصیف و مشخص کردن پارامترهای پلاسما استفاده از روش طیف سنجی انتشار نوری است. طیف سنجی انتشار نوری (OES) با تکنیک های متعدد، به عنوان یک روش تشخیصی ارزان و غیر مزاحم با یک چپش آزمایشی ساده، برای شناسایی پارامترهای پلاسما و گونه های واکنشی تولید شده توسط یک جت پلاسمای فشار اتمسفری استفاده می شود. در این حالت، پرتوهای ساطع شده توسط اتم های برانگیخته، مولکول ها و گونه های واکنشی در منبع پلاسما جمع آوری و تجزیه و تحلیل می شوند تا پارامترهای پلاسما مانند تراکم الکترون، دمای الکترون، دمای گاز و غیره مشخص شود. تغییر در خطوط طیفی در نتیجه تغییرات میدان الکتریکی متغیر یا ثابت (تغییر حالت) "پهن شدگی استارک"^۲ نامیده می شود. این اثر به دلیل نوسانات میدان الکتریکی در پلاسما است زیرا اتم های تابشی توسط الکترون ها و یون ها احاطه شده اند. میدان الکتریکی ذرات مجاور تأثیر مزاحمتی به ویژه در سطوح انرژی نزدیک به زنجیره یا یک میدان الکتریکی خارجی دارد. که در آن تغییر سطح اتمی رخ خواهد داد و به گسترش طیف کمک می کند [۴۷].

دمای یون ها و الکترون ها مستقیماً با میانگین انرژی جنبشی تصادفی متناسب است. در تعادل حرارتی، توزیع سرعت برای هر نوع ذره با توزیع ماکسول اداره می شود. همانطور که قبلاً ذکر شد، شرایط تعادل حرارتی در پلاسمای آزمایشگاهی سخت حاصل می شود. در این حالت وقتی تعادل ترمودینامیکی محلی در نظر گرفته می شود، برای یون ها و الکترون ها یک دمای یکسان فرض می کنیم. اما در صورت عدم وجود تعادل ترمودینامیکی محلی، الکترون ها، یون ها و اتم های موجود در پلاسما هرکدام دمای خاص خود را دارند.

^۱ Optical emission spectroscopy

^۲ Stark broadening

روش نسبت^۱، نمودار بولتزمن^۲، معادله ساها - بولتزمن^۳ و پهن شدگی داپلر^۴، چهار روش متداول برای تعیین درجه حرارت پلاسما هستند. البته دمای پلاسما را می توان با استفاده از روش های دیگری چون طیف خط پیوسته و مدل سازی عددی نیز محاسبه نمود [۴۸].

تکنیک های مختلفی برای به دست آوردن چگالی الکترونی پلاسما مانند رابطه پهن شدگی استارک و معادله ساها-بولتزمن وجود دارد. البته روش های در دسترس دیگری نیز وجود دارد که برای محاسبه چگالی الکترون مانند طیف خط پیوسته یا پراکندگی تامپسون استفاده شده است تا اندازه گیری چگالی الکترونی گذرا برای پلاسما ناشی از لیزر نشان داده شود. گزینه های دیگر مبتنی بر مدل سازی عددی پلاسما با استفاده از مدل تابش برخوردی نیز در تعیین الکترون تراکم پلاسما ناشی از لیزر استفاده شده است.

^۱ Ratio method

^۲ Boltzmann Plot

^۳ Saha - Boltzmann equation

^۴ Doppler Broadening

فصل ۳ : مواد و روش ها

در این فصل به معرفی روش ها و ابزارهای استفاده شده برای بدست آوردن نتایج تحقیقات می پردازیم:

۳-۱ ساختار جت پلاسمای اتمسفری

برای ساخت جت پلاسمای اتمسفری از مدل ساختاری جت های دی بی دی بهره بردیم. در این ساختار مطابق شکل ۲-۲-C از یک الکتروود میله به عنوان آند و یک الکتروود حلقه ای به عنوان کاتد استفاده شده است و لوله ی دی الکتریک آن از جنس کوارتز است. جنس الکتروود آند از مس و طول و قطر آن به ترتیب برابر ۱۵ و ۰.۳ سانتی متر است. قطر نوک الکتروود آند یک میلی متر است و در فاصله ی یک سانتی متری کاتد قرار گرفته است. قطر خارجی تیوب کوارتز برابر ۱ سانتی متر و قطر داخلی آن برابر ۵ میلی متر است.

۳-۲ ابزارهای استفاده شده

۳-۲-۱ منبع تغذیه

در این سری آزمایش ها ما از دو نوع منبع تغذیه پالسی (DC-Pulse) و منبع جریان متناوب (AC) استفاده نمودیم که در ذیل به توضیح مشخصات هر کدام می پردازیم:

منبع تغذیه پالسی (DC-Pulse)

منبع تغذیه پالسی مدل BK^{۹۴۰۱} ساخت شرکت پرتو نگار تجهیز امین، ولتاژ مناسب با قابلیت تغییر فرکانس و پهنای پالس، انرژی لازم برای ایجاد جت پلاسمای فشار اتمسفری را فراهم می کند.

ولتاژ ورودی این دستگاه مطابق با برق شهری، ۲۲۰-۲۴۰ ولت با فرکانس ۵۰ Hz است که می تواند ولتاژی در بازه ی ۱۰-۱ کیلوولت و با محدوده فرکانس ۴۰-۳ کیلوهرتز تولید کند. همچنین پهنای پالس این دستگاه قابل تنظیم در محدوده ۲-۳۰۰ میکروثانیه است.

توان خروجی این منبع تغذیه ۳۰۰ وات و جریان تولیدی آن حداکثر ۳۰ میلی آمپر است.

شکل ۳-۱ تصویر این منبع را نشان می دهد.



شکل ۳-۱. منبع تغذیه DC-Pulse

منبع تغذیه جریان متناوب (AC)

منبع ولتاژ جریان متناوب استفاده شده در این تحقیق نیز یک منبع ساخت دانشجویان داخل کشور است. این منبع قادر است با ولتاژ ورودی ۲۲۰ ولت شهری، چهار مقدار ولتاژ گسسته از ۷.۶، ۱۳.۶، ۱۶.۶ و ۲۰.۶ کیلو ولت را در فرکانس ثابت ۱۵/۵ KHz تولید کند.

۲-۲-۳ پروب ولتاژ

از آنجایی که ولتاژ مورد استفاده در جت پلاسمای اتمسفری، از مرتبه ی کیلوولت است، در نتیجه برای نمایش آن بر روی اسلوسکوپ باید از پروب ولتاژ جهت کاهش نسبت ولتاژ استفاده نمود. برای محاسبه ولتاژ و نشان دادن آن بر روی اسیلوسکوپ از یک پروب ولتاژ Tektronix مدل P $\times 10^5$ A با نسبت $1000\times$ مطابق شکل ۲-۳ استفاده شده است.



شکل ۲-۳. پروب ولتاژ

۳-۲-۳ جریان

یکی از پارامترهای مهم در مشخصه یابی الکتریکی جت پلاسما، به دست آوردن جریان تخلیه پلاسما است. برای محاسبه ی جریان تخلیه ، ابتدا جریان کل هنگام روشن بودن جت پلاسما محاسبه شد و سپس جریان جابجایی یا همان جریانی که در هنگام خاموش بودن پلاسما در مدار وجود دارد، از آن کم شد. خاموش بودن پلاسما با قطع کردن جریان گاز ورودی صورت گرفت. در این سری آزمایش ها برای محاسبه ی جریان از پروب جریان PINTeK مدل PA-۶۷۷ که در شکل ۳-۳ نشان داده شده است، استفاده گردید. این پروب قادر است با دو دقت 50 mV/A و 500 mV/A جریان را اندازه گیری کند.



شکل ۳-۳. پروب جریان PINTeK مدل PA-۶۷۷

۳-۲-۴ اسیلوسکوپ

برای نمایش نمودار ولتاژ و جریان و دریافت اطلاعات مربوط به آن ها از یک اسیلوسکوپ دیجیتال چهار کانال GPS-۱۲۰۴C با فرکانس ۲۰۰ MHz و سرعت نمونه برداری ۲ GS/sec استفاده شده است. شکل ۳-۴ تصویر این اسیلوسکوپ را نمایش می دهد.



شکل ۳-۴. اسیلوسکوپ دیجیتال چهار کاناله GPS

۳-۲-۵ توان

توان مصرفی یکی از مشخصات مهم در همه دستگاه هاست. در واقع این توان است که به ما نشان می دهد چقدر از انرژی تحویلی در دستگاه به عمل مورد نظر ما اختصاص یافته و چقدر اتلاف صورت گرفته است. در دستگاه جت پلاسما توان مصرفی به دو صورت قابل محاسبه است. یکی از طریق رسم نمودار لیسازو (نمودار بار خازن بر حسب ولتاژ) و دیگری از محاسبه از طریق رابطه مربوط به توان که در رابطه (۱-۲) به آن اشاره شده است. در این آزمایش برای به دست آوردن توان دستگاه جت پلاسما، از رابطه‌ی زیر که مطابق با رابطه‌ی (۱-۲) است، استفاده شد:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T VI dt$$

که در آن V ولتاژ اعمالی به الکتروود آند، I جریان تخلیه و T دوره تناوب است. دوره تناوب را می توان از عکس فرکانس محاسبه نمود.

۳-۳ پارامترهای اپتیکی

۳-۳-۱ محاسبه ی دما

برخلاف پلاسماهای گرم که دمای تمام ذرات یکسان است، در پلاسماهای سرد ذرات دماهای متفاوتی دارند. انرژی های الکترونی به دلیل جرم بسیار کم الکترون در مقایسه با ذرات سنگین هم چون یون ها و ذرات خنثی، بسیار بالاست. در نتیجه برخوردهای بسیار زیاد الکترون های پرانرژی با اتم ها و مولکول های زمینه، سطح تجزیه، یونیزاسیون و برانگیختگی افزایش می یابد. نکته ی قابل توجه این است که با انجام این واکنش ها، دمای گاز افزایش پیدا نمی کند. از این رو، این نوع از پلاسما هیچ آسیب ناشی از حرارت را به بافت های زنده وارد نمی کند. به همین خاطر، دمای گازی پلاسما و چگالی ذرات برانگیخته، از فاکتورهای مهم در تکنولوژی های پردازش سطوح و پزشکی می باشند [۱۶].

با استفاده از طیف سنجی پلاسما می توان دماهای مختلف مربوط به ذرات پلاسما را با روش های مختلف به دست آورد. دمای بیشتر الکترون های موجود در پلاسما از نوع دمای برانگیختگی الکترون هاست (T_{exc}). باید توجه داشت که دمای برانگیختگی الکترونی متفاوت از دمای الکترونی است. دمای برانگیخته الکترونی مربوط به دمای الکترون های برانگیخته است در صورتی که دمای الکترونی، دمای الکترون های آزاد (T_e) است [۴۹]. از انواع دیگر دماهای پلاسما می توان به دمای ارتعاشی مولکول ها (T_{vib})، دمای چرخشی مولکول ها (T_{rot}) و دمای گاز اصلی (T_{gas}) اشاره کرد که رابطه (۳-۱) بین آن ها برقرار است [۵۰].

$$T_e < T_{exc} < T_{vib} < T_{rot} \approx T_{gas} \quad (3-1)$$

شدت خط طیفی که فرض می شود نوری نازک است، توسط رابطه (۳-۲) داده می شود:

$$I_{ij} = \frac{hcA_{ij}g_j n}{\lambda_{ij}U(T)} e^{\left(\frac{E_j}{KT}\right)} \quad (3-2)$$

که در آن I_{ij} و λ_{ij} به ترتیب شدت و طول موج مربوط به انتقال از i به j ، h ثابت پلانک، c سرعت نور، n تراکم عددی گونه های گسیل شده، $U(T)$ تابع پارش، A_{ij} احتمال انتقال بین سطح i و j ، K ثابت بولتزمن، T دمای برانگیختگی، g_j وزن آماری سطح انرژی بالایی و E_j سطح انرژی بالایی در واحد الکترون ولت است.

از طریق رابطه (۳-۲) به دو صورت می توان دمای الکترون را به دست آورد. اگر این رابطه برای دو طول موج نوشته شود و نسبت آنها بر هم در نظر گرفته شود، ثابت ها حذف شده و دما به دست می آید. این روش که روش "نسبت" نام دارد، برای حالتی است که تعادل ترمودینامیکی در تراز بالایی به طور کامل برقرار باشد.

روش دوم محاسبه دما از طریق رابطه (۳-۲)، روش رسم نمودار بولتزمن، است. با اندکی تغییر، می توان رابطه (۳-۲) را به صورت زیر نوشت:

$$\frac{\lambda_{ij}I_{ij}}{hcA_{ij}g_j} = \frac{n}{U(T)} e^{-\frac{E_j}{KT}} \quad (3-3)$$

با گرفتن لگاریتم از طرفین معادله (۳-۳)، رابطه ی زیر به دست می آید:

$$\ln\left(\frac{\lambda_{ij}I_{ij}}{hcA_{ij}g_j}\right) = -\frac{1}{KT}(E_j) + \ln\left(\frac{n}{U(T)}\right) \quad (3-4)$$

رابطه (۳-۴) یک نمودار خطی است که اگر $\ln(\frac{\lambda_{ij} I_{ij}}{hc A_{ij} g_j})$ را بر اساس E_j رسم کنیم، از طریق شیب خط می توان دما را محاسبه کرد.

نمودار بولتزمن قله هایی را می خواهد که از همان گونه اتمی و همان مرحله یونیزاسیون سرچشمه گرفته اند. با این حال، مزیتی که نمودار بولتزمن نسبت به روش نسبت دارد این است که خطوطی که به صورت نوری ضخامت^۱ دارند می توانند به راحتی از انحراف زیاد نقاط داده در خط مستقیم اتصالات قابل شناسایی باشند.

جدول ۱-۳ اطلاعات گونه های هلیوم برای اندازه گیری دما و چگالی را به ما می دهد [۵۱]:

جدول ۱-۳. اطلاعات گونه های هلیوم جهت اندازه گیری دما [۵۱]

$\lambda_{j,i}(nm)$	Transition	$E_j(ev)$	$E_i(ev)$	g_k	$A_{ki}(S^{-1})$
۵۰۱.۵۷	$3p^1P \rightarrow 2s^1S$	۲۳.۰۸۷	۲۰.۶۱۶	۳	$1.34E+07$
۵۸۷.۵۶	$3d^3D \rightarrow 2p^3P^o$	۲۳.۰۷۴	۲۰.۹۶۴	۳	$3.93E+07$
۶۶۷.۸۱	$3d^1D \rightarrow 2p^1P^o$	۲۳.۰۷۴	۲۱.۲۱۸	۵	$6.37E+07$
۷۰۶.۵۱	$3s^3S^1 \rightarrow 2p^3P^o$	۲۲.۷۱۸	۲۰.۹۶۴	۳	$1.55E+07$
۷۲۸.۱	$3s^3S^o \rightarrow 2p^1P^o$	۲۲.۹۲۰	۲۱.۲۱۸	۱	$1.83E+07$

۳-۲-۳ محاسبه ی چگالی

پهن شدگی استارک^۲ ناشی از میدان الکتریکی یون ها و الکترون ها منجر به گسترش طیفی با نیم پهنای بیان شده در رابطه (۳-۵)، می شود:

$$\Delta\lambda_{1/2} = 2\omega\left(\frac{N_e}{1.016}\right) + 3.5\left(\frac{N_e}{1.016}\right)^{\frac{1}{4}}\left(1 - 1.2N_D^{-\frac{1}{3}}\right)\omega\left(\frac{N_e}{1.016}\right) \quad (3-5)$$

^۱ Optically thick line

^۲ Stark Broadening

که در آن $\Delta\lambda_{1/2}$ نیم پهنای پیک طیفی پهن شدگی استارک، N_e چگالی الکترون، ω پارامتر ضربه الکترون^۱ و N_D حفاظ دبای است.

معادلات اول و دوم معادله (۳-۵) به ترتیب به منبسط شدن الکترون و یون اشاره دارد و N_D نیز به عنوان تعداد ذرات موجود در کره دبای شناخته می شود که به صورت زیر به تراکم الکترون و دمای الکترون وابسته است:

$$N_D = 1.72 \times 10^{19} \left(\frac{T_e^2}{N_e} \right) \quad (3-6)$$

با این حال، معمولاً می توان معادله (۳-۵) را با نادیده گرفتن قسمت دوم ساده کرد، زیرا سهم پهن شدگی در مقایسه با الکترون، ناچیز است. در نتیجه معادله (۳-۵) را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\Delta\lambda_{1/2} = 2\omega \left(\frac{N_e}{10^{16}} \right) \quad (3-7)$$

محدودیت این تکنیک این است که فرد نیاز به دانستن مقدار پارامتر ضربه الکترون^۲ دارد و در این مورد، مرجع [۵۲] مجموعه خوبی از داده ها برای پهنای استارک و تغییرها برای بیشتر عناصر و مقدار متناظر آن با پارامتر تأثیر الکترون است.

با قرار دادن مقدار پارامتر الکترون و نیم پهنای در رابطه (۳-۷) مقدار چگالی الکترون به دست می آید.

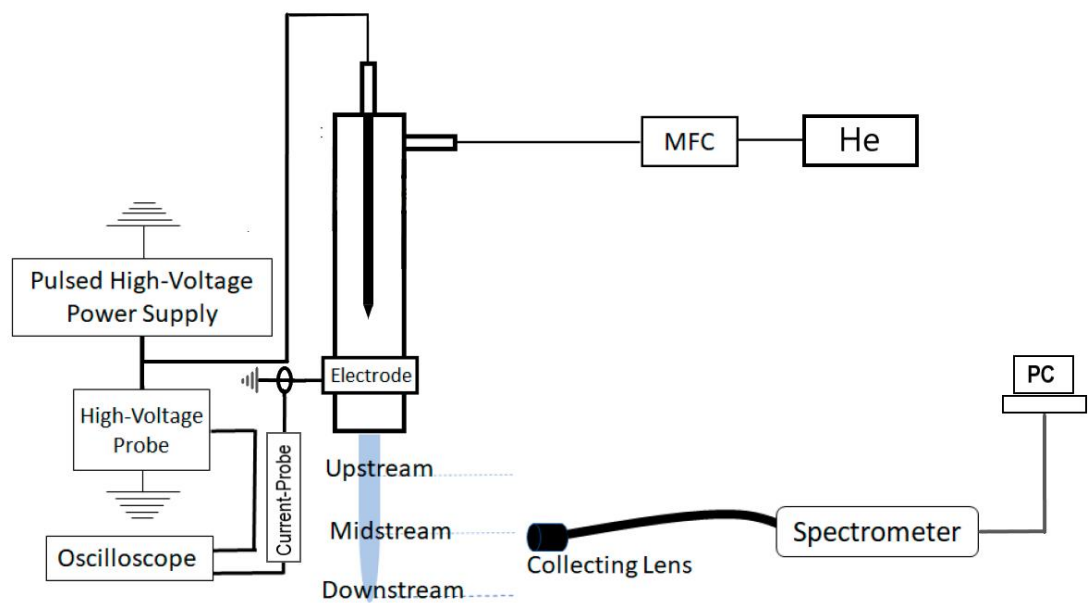
^۱ Electron impact

۳ - ۴ نحوه انجام آزمایش

شکل ۳-۵ طرح شماتیک چیدمان ابزار های اندازه گیری و جت پلاسما را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود پروب ولتاژ به الکتروود آند توسط رابط متصل شده است. پروب جریان نیز در مسیر سیم متصل به الکتروود کاتد زمین شده قرار گرفته است. پس از تنظیم و وارد کردن گاز، منبع تغذیه را روشن می کنیم تا ستون پلاسما روشن شود. با تنظیم پیچ های مربوط به ولتاژ، فرکانس و پهنای پالس می توان جت پلاسما را مشاهده نمود. پروب های ولتاژ و جریان به اسیلوسکوپ متصل شده اند و می توان اطلاعات مربوط به آنها را از اسیلوسکوپ دریافت کرد. لازم به ذکر است پس از ثبت جریان کل، جریان گاز قطع شده و پس از مکث ۱۰ ثانیه جریان جابه جایی ثبت خواهد شد.

برای دریافت طیف گسیلی از جت، لنز دریافت کننده نور مانند شکل ۳-۵ در سه قسمت بالایی، میانی و پایینی جت قرار داده شد تا گونه های فعال موجود در هر قسمت شناسایی شود. برای جلوگیری از ورود نورهای مزاحم، از یک روزنه در مسیر لنز ورودی نور استفاده شده است.

قبل از انجام آزمایش، حالت های تاریک و روشن (نور طبیعی اتاق) در برنامه طیف سنج ثبت می شود تا دقت طیف سنجی بالاتر رود.



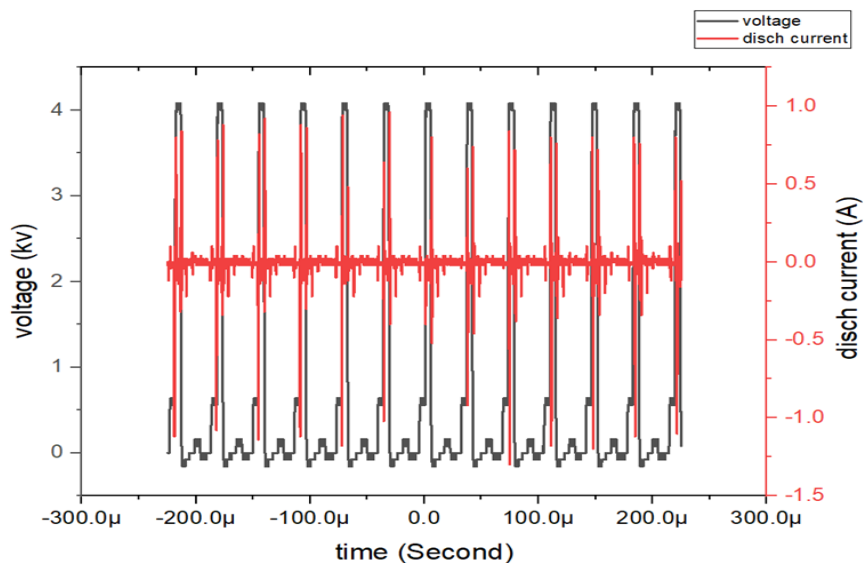
شکل ۳-۵. طرح شماتیک چیدمان آزمایش

قبل از روشن کردن سیستم، باید از برقرار شدن کامل اتصالات و همچنین وصل بودن سیم اتصال به زمین دستگاه به سیم زمین شده ساختمان اطمینان حاصل کرد. سیم های اتصال به کار رفته در این آزمایش همه از نوع سیم های ولتاژ بالا هستند.

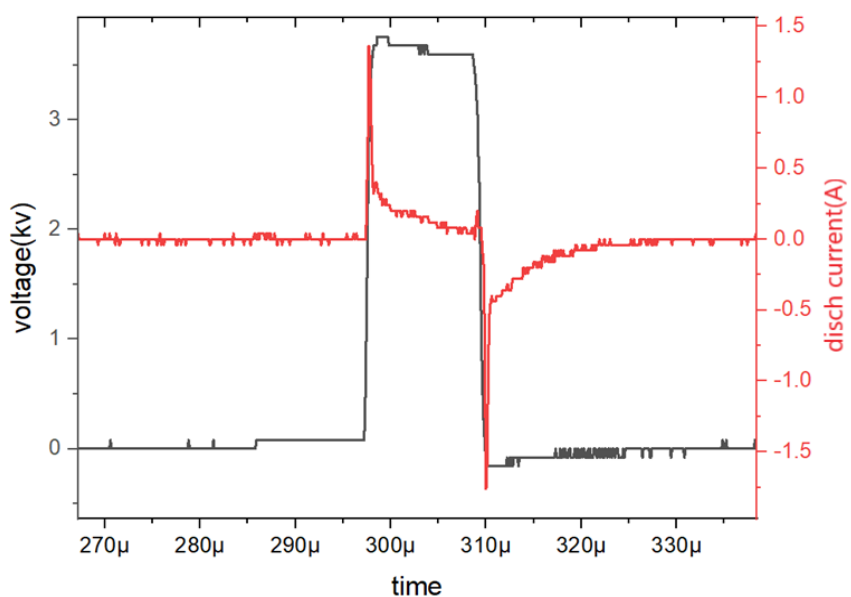
فصل ۴ : نتایج و بحث

۴-۱ نمودار ولتاژ-جریان

نمودار ولتاژ-جریان یکی از مشخصه های اصلی بررسی پارامترهای پلاسما می باشد. این مشخصه نشان دهنده سیر تکاملی پلاسما است و از عواملی چون آهنگ شارش گاز، توان ورودی و نوع گاز ورودی تاثیر می پذیرد. در شکل ۴-۱ و شکل ۴-۲، نمودار ولتاژ-جریان مربوط به منبع تغذیه پالسی نشان داده شده است.



شکل ۴-۱. نمودار ولتاژ-جریان جت پلاسمای اتمسفری در منبع تغذیه DC-Pulse



شکل ۴-۲. نمودار ولتاژ-جریان یک پالس در منبع تغذیه DC-Pulse

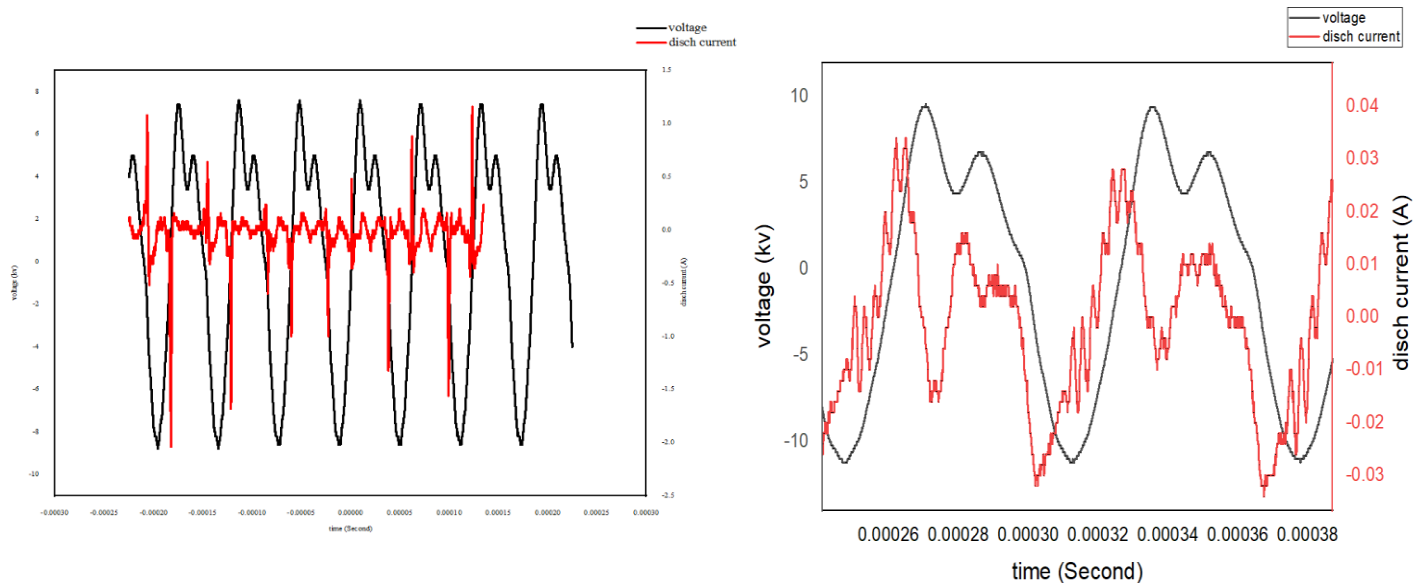
با افزایش ولتاژ اعمالی و رسیدن آن به آستانه ولتاژ شکست، پلاسما ایجاد می شود. در واقع تخلیه در بالا آمدن پالس ولتاژ اتفاق می افتد و باعث حرکت بارها از آند به سمت محدوده کاتد شده و انباشت بار صورت می گیرد. بار های انباشته شده توسط تخلیه اول (بالا آمدن پالس ولتاژ) قادر به ایجاد زمینه های کافی در این شکاف برای شروع تخلیه های ثانویه در طرف افت ولتاژ (پایین آمدن پالس) هستند [۵۳، ۵۴].

در این مرحله، انباشتگی بار، روی دیواره ی تیوب کوارتز افزایش می یابد و متأثر از آن، میدان الکتریکی در جهت مخالف ایجاد می گردد. پس از آن با افت ولتاژ اعمالی بارها در جهت عکس، به حرکت در می آیند و باعث پیک جریان منفی می شوند.

در واقع پس از شکست اولیه، یک پیک جریان داریم که سریع افت پیدا می کند. این به دلیل آن است که الکترون های تولید شده در داخل تیوب کوارتز، در طول تیوب حرکت کرده و به دیواره داخلی آن می رسند. در نتیجه ولتاژ در سرتاسر دیواره تیوب کوارتز در جهت مخالف ولتاژ کاربردی است. پس ولتاژ گاز کاهش می یابد. و در نتیجه جریان تخلیه افت پیدا می کند و به دنبال آن فرآیند یونیزاسیون کاهش می یابد (متوقف می شود) [۵۵].

هر چه دامنه ی ولتاژ بیشتر باشد، جریان سریع تر (پس از بالا رفتن ولتاژ) اتفاق می افتد و اینکه پیک جریان بالاتر می رود. اما پهنای پیک کمتر خواهد شد. چرا که ولتاژ اعمالی بزرگتر، به سمت تولید الکترون بیشتر هدایت می کند و جریان تخلیه بزرگتر می شود. دسترسی به الکترون بیشتر در ولتاژ بالاتر باعث باردار شدن سریع تیوب کوارتز می شود و کاهش سریع ولتاژ گاز را در پی خواهد داشت، پس جریان تخلیه کاهش می یابد [۵۴].

شکل ۳-۴ نمودار ولتاژ-جریان مربوط به منبع تغذیه متناوب را نشان می دهد. نمودار جریان، اختلاف فاز بسیار کمی نسبت به نمودار ولتاژ را داراست.



شکل ۳-۴. نمودار ولتاژ-جریان در منبع تغذیه AC

۴-۲ بررسی اثر افزایش ولتاژ بر پلاسما

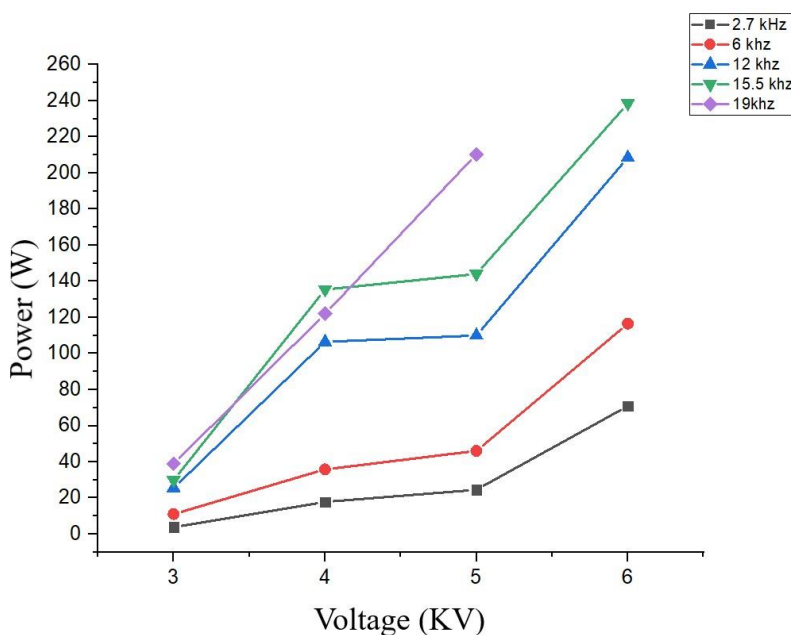
یکی از عوامل مهم تأثیرگذار در رفتار جت پلاسما، ولتاژ اعمالی به پیکربندی جت است. در این تحقیق ما به بررسی اثر افزایش ولتاژ بر توان جت پلاسما، طول جت و طیف نشری از جت پرداختیم که در زیر نتایج هر کدام نشان داده شده است:

۴-۲-۱ بررسی اثر افزایش ولتاژ بر توان جت پلاسما

در این آزمایش، اثر افزایش ولتاژ بر توان جت پلاسما در دو حالت بررسی شد:

افزایش ولتاژ در فرکانس های مختلف

در بررسی تأثیر افزایش ولتاژ بر مقدار توان مصرفی جت پلاسما در فرکانس های مختلف، ابتدا مقدار فرکانس بر روی ۲.۷ کیلوهرتز تنظیم شد و مقدار ولتاژ از ۲.۵ تا ۶.۵ کیلوولت تغییر یافت و توان محاسبه گردید. این محاسبات در شرایطی صورت گرفت که شار گاز، فرکانس و پهنای پالس ثابت بودند. میزان شار گاز ۲ slm و مقدار پهنای پالس بر روی ۱۰ میکروثانیه تنظیم شد. پس از آن اندازه فرکانس در مقادیر ۶، ۱۲، ۱۵.۵ و ۱۹ کیلوهرتز نیز قرار داده شد و آزمایش مجدد تکرار شد. نمودار نشان داده شده در شکل ۴-۴، رفتار توان جت پلاسما در اثر افزایش ولتاژ را در فرکانس های مختلف را ارائه می دهد.



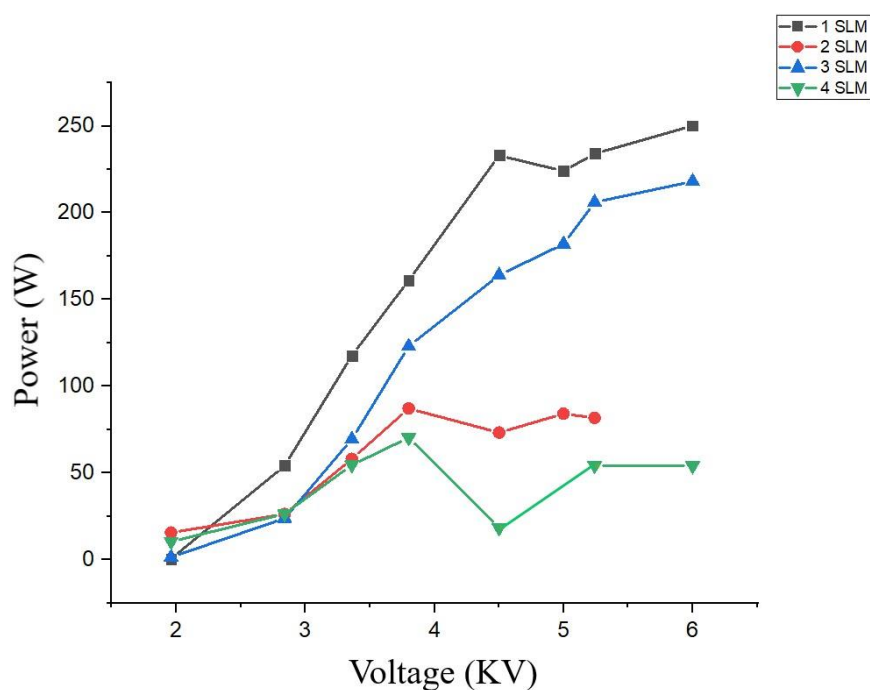
شکل ۴-۴. نمودار توان بر حسب ولتاژ در فرکانس های مختلف

همانطور که در شکل ۴-۴ مشاهده شد، با افزایش ولتاژ، توان مصرفی دستگاه افزایش می یابد. این افزایش توان به دلیل این است که ذرات و الکترون های اولیه، انرژی خود را از میدان الکتریکی ایجاد شده توسط منبع تغذیه می گیرند و افزایش ولتاژ سبب یونیزاسیون بیشتر می شود. نکته دیگر در مورد این نمودار این است که در ولتاژهای بالا، شیب نمودار تغییر کرده و افزایش می یابد. وقتی ولتاژ از ۵ به ۶ کیلوولت افزایش می یابد، اتلاف انرژی در

پیکربندی جت پلاسما صورت می‌گیرد. یکی از صورت‌های اتلاف، گرم شدن تیوب کوارتزی است که به عنوان دی‌الکتริก در نظر گرفته شده است. دلیل دیگر افزایش توان، ایجاد استریم‌های چندوجهی است که خود باعث افزایش توان مصرفی جت پلاسما می‌شود [۵۶].

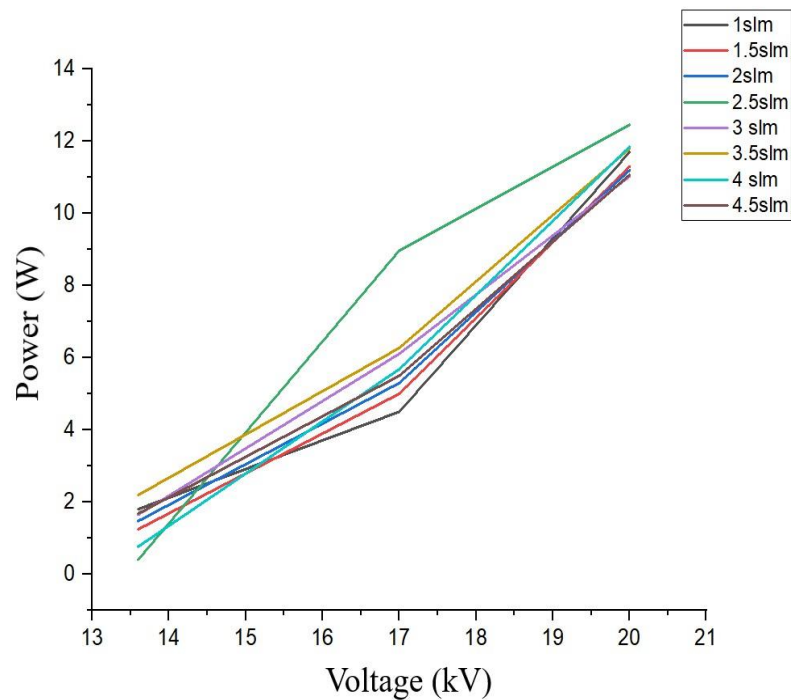
افزایش ولتاژ در شارهای مختلف

در سری دیگر آزمایش‌های بررسی تأثیر اثر ولتاژ بر توان مصرفی دستگاه جت پلاسما، افزایش ولتاژ در شارهای مختلف گاز هلیم اندازه‌گیری شد. این بار پهنای پالس و فرکانس ثابت در نظر گرفته شده و به ترتیب روی مقدارهای ۱۰ میکروثانیه و ۳.۳ کیلوهرتز تنظیم شدند. در این آزمایش رفتار توان در شارهای ۱، ۲، ۳ و ۴ لیتر بر دقیقه بررسی شد. شکل ۴-۵ نمودار توان بر حسب ولتاژ اعمالی دستگاه در شارهای مختلف را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۵. نمودار توان بر حسب ولتاژ در شارهای مختلف گاز هلیم

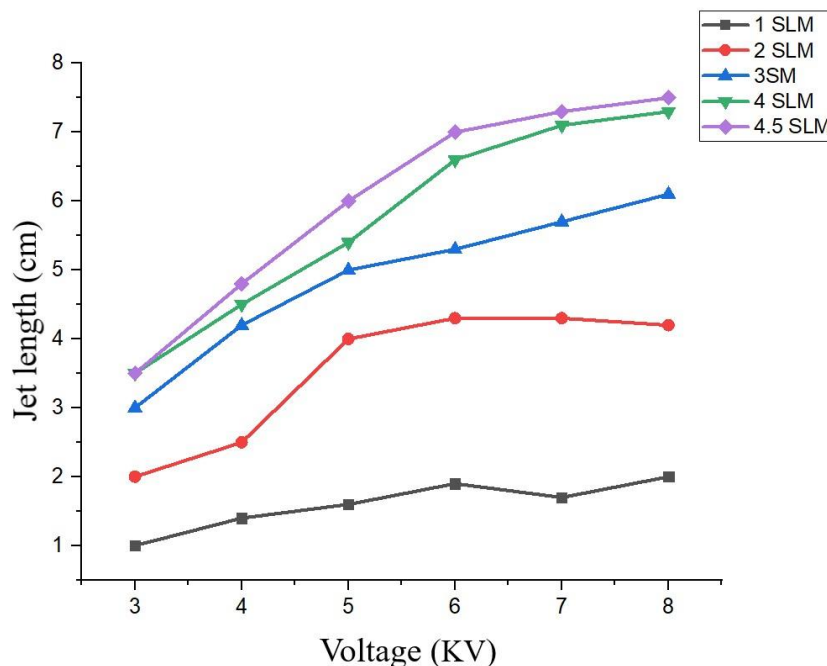
در بررسی های اندازه گیری توان بر اساس تغییرات ولتاژ با استفاده از منبع تغذیه متناوب نیز رابطه ی مستقیم ولتاژ و توان تأیید شد. شکل ۴-۶ رفتار توان بر اساس ولتاژ را در منبع تغذیه متناوب نشان می دهد.



شکل ۴-۶. نمودار توان بر اساس ولتاژ در منبع AC

۲-۲-۴ بررسی اثر افزایش ولتاژ بر طول جت

در شکل ۴-۷ اثر افزایش ولتاژ بر طول جت پلاسما نشان داده شده است. در این آزمایش، فرکانس اعمالی بر روی ۳.۳ کیلوهرتز و پهنای پالس بر روی ۱۰ میکروثانیه تنظیم شده اند. همان طور که مشاهده می شود با افزایش ولتاژ، طول جت پلاسما افزایش می یابد.

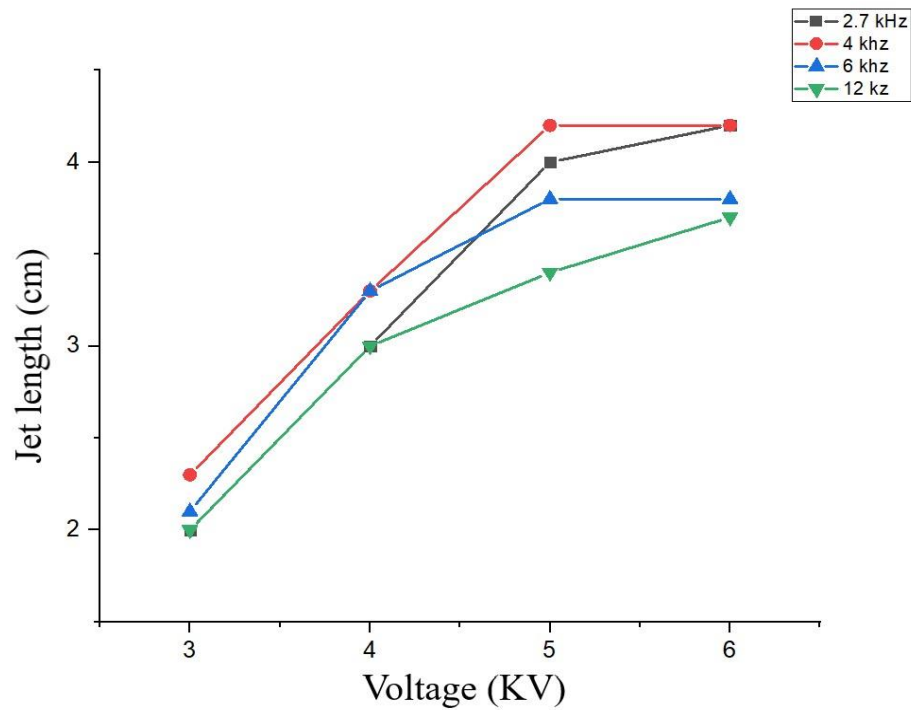


شکل ۴-۷. نمودار طول جت بر حسب ولتاژ در شارهای مختلف گاز هلیوم

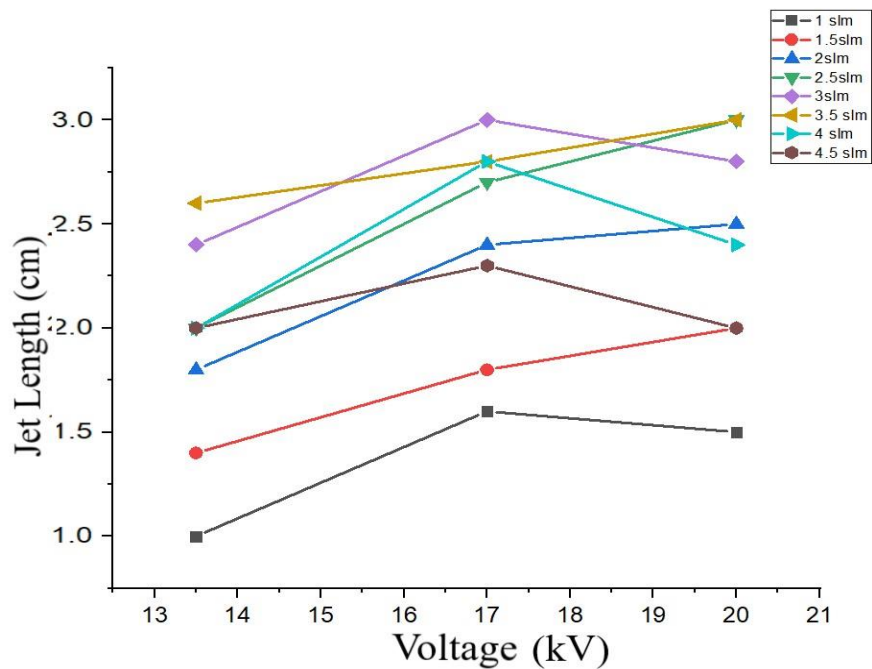
در گام اول که ولتاژ کم است، طول جت نیز بسیار کوچک است چرا که بارهای مثبت با بارهای قطبش ناشی از منطقه الکتروود زمین خنثی می شوند و باعث کوتاهی جت پلاسما می شود. با افزایش ولتاژ، ذرات باردار بیشتری در نتیجه تولید الکترون های ثانویه به وجود می در آیند که پولاریزاسیون القا شده در اطراف الکتروود زمین را اشباع می کنند و با انرژی بیشتری که دارند می توانند هوای اطراف نفوذ کنند [۵۶].

در گام دوم مشاهده می شود که بعد از یک ولتاژ خاص، با افزایش ولتاژ طول جت پلاسما تغییر محسوسی نکرده و تقریباً به یک حالت اشباع می رسد. دلیل این اتفاق، همان اتلاف انرژی صورت گرفته در جت پلاسما است. در واقع انرژی دریافتی از منبع تغذیه دیگر صرف تولید ذرات باردار نخواهد شد و به صورت های مختلفی تلف خواهد شد [۵۷]. این نکته در رفتار جت پلاسما هنگامی که در فرکانس های مختلف نیز ولتاژ افزوده شد و هم در نمودار مربوط به استفاده از منبع تغذیه جریان متناوب نیز به روشنی دیده می شود. شکل ۴-۸ رفتار جت پلاسما در

هنگام افزایش ولتاژ در فرکانس های مختلف و شکل ۴-۹ رفتار طول جت پلاسما را بر اساس ولتاژ در منبع تغذیه متناوب را نشان می دهد.



شکل ۴-۸. نمودار طول جت پلاسما بر حسب ولتاژ اعمالی



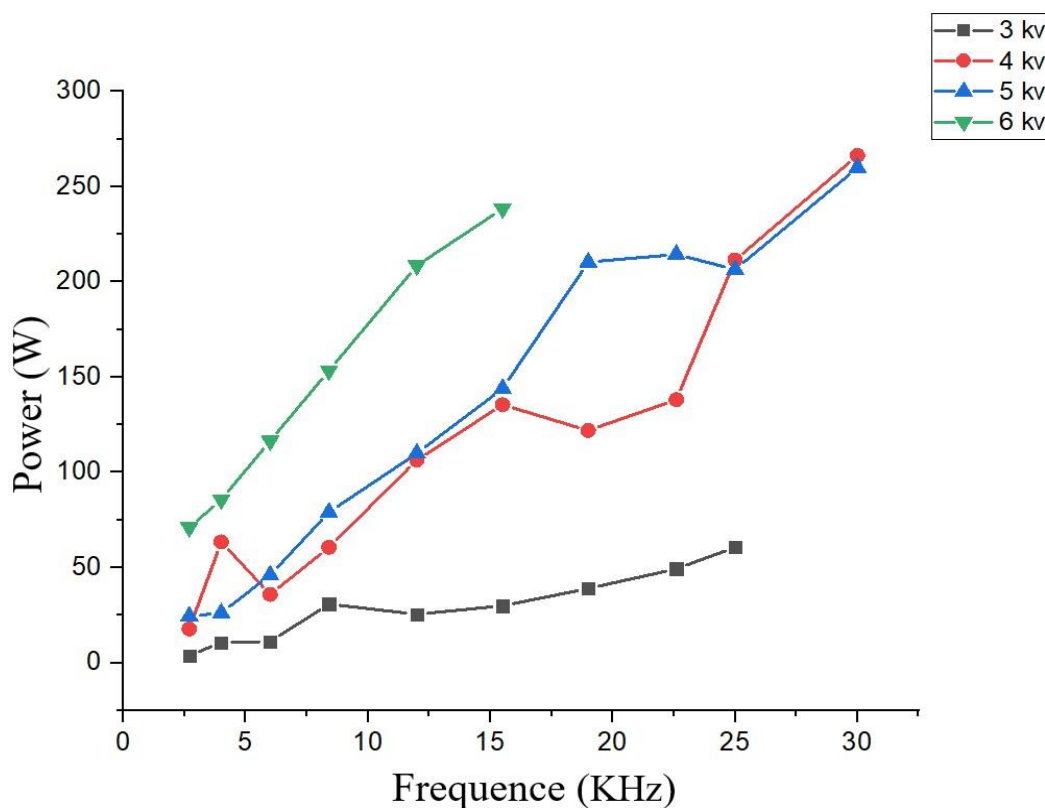
شکل ۴-۹. نمودار طول جت بر اساس ولتاژ در منبع تغذیه AC

۴-۳ بررسی اثر افزایش فرکانس بر جت پلاسما

دومین مرحله از بررسی پارامترهای الکتریکی جت پلاسما، بررسی اثر فرکانس بر جت پلاسما بود که اثرات آن بر پارامترهای اساسی جت پلاسما بررسی شد و در ادامه بیان می شود:

۴-۳-۱ بررسی اثر افزایش فرکانس بر توان جت پلاسما

شکل ۴-۱۰ اثر افزایش فرکانس بر توان مصرفی جت پلاسما را نشان می دهد.



شکل ۴-۱۰. نمودار توان جت پلاسما بر حسب فرکانس در ولتاژهای مختلف

همانطور که مشاهده می شود با افزایش فرکانس اعمالی به پلاسما، توان مصرفی نیز افزایش می یابد. دلیل این افزایش می تواند با رابطه ی عکس میان فرکانس و زمان انتقال الکترون ها (رابطه زیر) بیان شود. با افزایش فرکانس ، زمان انتقال الکترون ها کاهش می یابد و این خود باعث تجمع یون ها شده و مصرف انرژی بالاتر شود.

$$f = \frac{1}{T} \quad (4-1)$$

همچنین این موضوع می تواند با امپدانس هد که متناسب با رابطه ی (4-2) است ، توضیح داده شود.

$$Z = \frac{1}{|\omega C_D|} \quad (4-2)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (4-3)$$

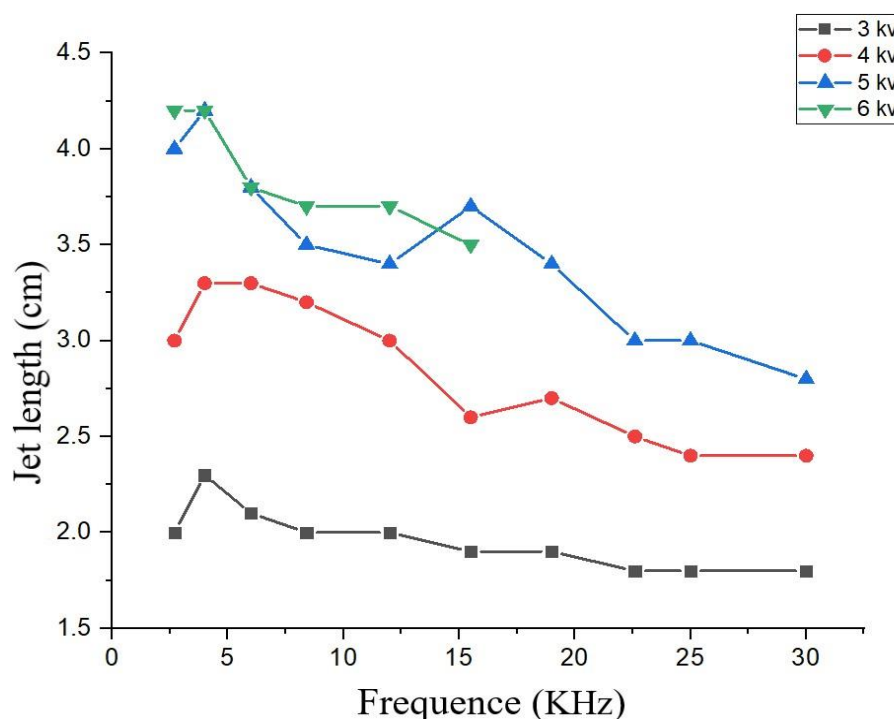
وقتی فرکانس افزایش یابد، ω افزایش پیدا می کند و در نتیجه امپدانس کاهش پیدا می کند. این کاهش امپدانس باعث افزایش جریان گشته و در نتیجه توان مصرفی دستگاه افزایش می یابد [58].

در هنگام افزایش فرکانس در مقادیر فرکانس های بالا، در ولتاژ ۵ کیلو ولت ، مشاهده شد که توان مصرفی از مقدار متناظر آن در ولتاژ ۴ کیلو ولت کمتر است. این امر می تواند یک نقطه بهینه را به ما معرفی کند. دلیل این پدیده وجود الکترون هایی با انرژی بالا برای یونیزاسیون است که دیگر نیازی به مصرف توان بیشتر برای یونیزاسیون نیست و در نتیجه توان مصرفی کاهش می یابد.

در ولتاژهای بالاتر، تشکیل استریم‌های چند وجهی، اتلاف انرژی و گرم شدن تیوپ دی الکتریک خود باعث می شود تا توان به شدت بالا رود [۵۶]. اما با توجه به اینکه با افزایش فرکانس، برخورد بین ذرات در توده پلاسما بیشتر می شود [۵۶]، تخلیه بهتر و یکنواخت تری را شاهد بودیم.

۴-۳-۲ بررسی اثر افزایش فرکانس بر طول جت

شکل ۴-۱۱ که نمایانگر رفتار طول جت پلاسما در اثر افزایش فرکانس است به ما نشان می دهد که با افزایش فرکانس طول جت نیز افزوده می شود. چرا که با افزایش برخورد ها بیشتر شده و در نتیجه ذرات باردار بیشتری تولید میگردد. اما این افزایش فقط در حد چندین میلی متر است و آنقدر فاحش نیست. با افزایش بسیار زیاد فرکانس در یک ولتاژ ثابت، واکنش ترکیب ذرات باردار نیز صورت گرفته و از تولید ذرات پیشی می گیرد. لذا افزایش فرکانس از یک حد به بالا باعث کاهش طول جت می گردد.

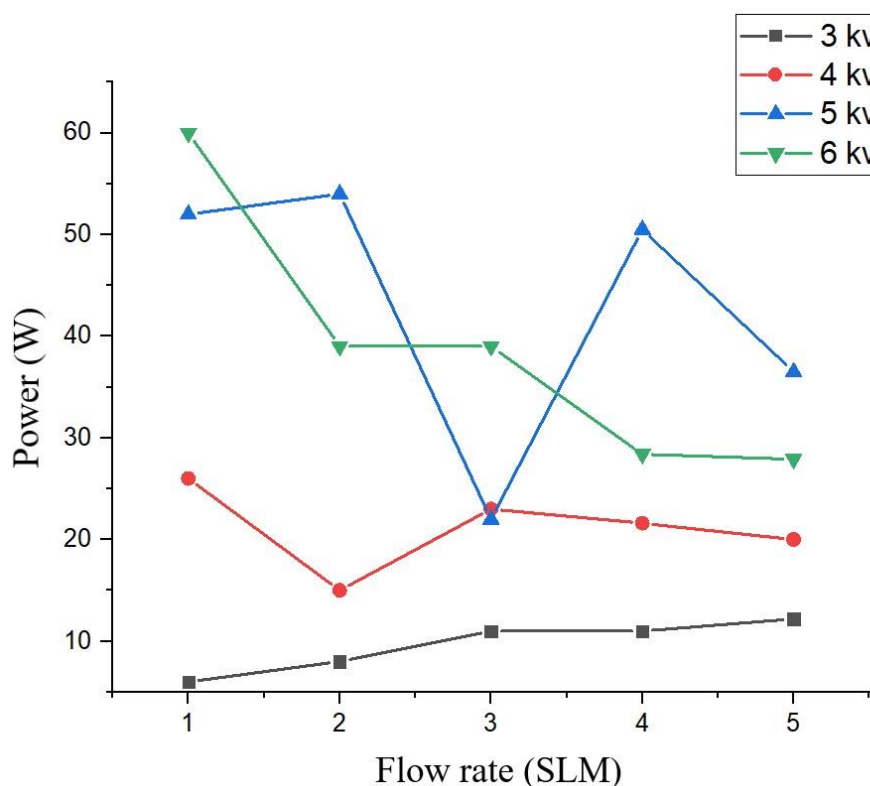


شکل ۴-۱۱. نمودار طول جت پلاسما بر حسب فرکانس اعمالی در ولتاژهای مختلف

۴ - ۴ بررسی اثر شار گاز بر جت پلاسما

۴-۴-۱ بررسی اثر افزایش شار گاز بر توان جت پلاسما

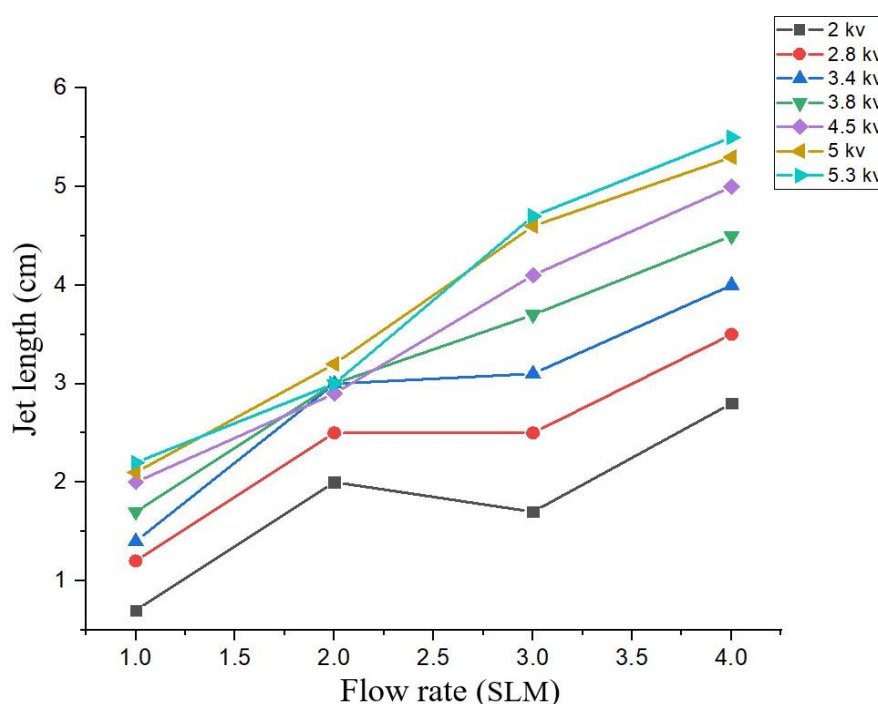
همانطور که در شکل ۴-۱۲ مشاهده می شود با افزایش شار گاز ورودی، توان جت پلاسما افزایش می یابد. افزایش شار گاز ورودی به معنای ورود بیشتر ذرات و مولکول های گاز است و دستگاه باید نیروی بیشتری جهت تولید گونه های باردار صرف کند و این خود باعث افزایش توان می شود. باید توجه داشت که افزایش بیش از حد شار گاز ورودی باعث ایجاد آرک در جت پلاسما می شود.



شکل ۴-۱۲. نمودار توان بر حسب شار ورودی گاز هلیوم

۲-۴-۴ بررسی اثر افزایش شار گاز بر طول جت

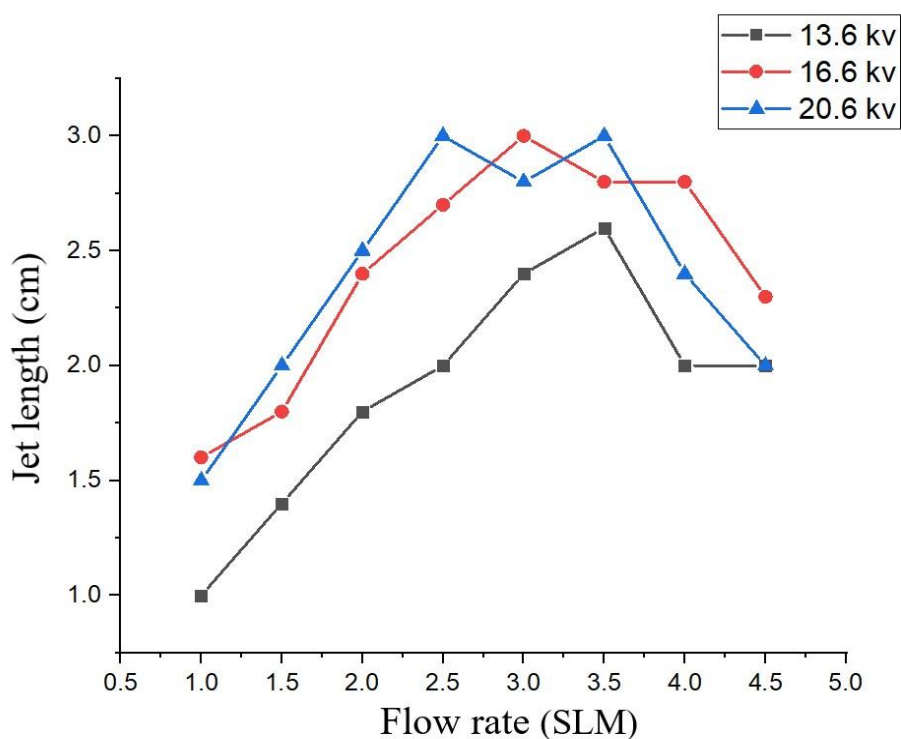
در بررسی اثر شار گاز بر طول جت پلاسما، مقدار شار گاز از ۱ slm تا ۴.۵ slm با فاصله های ۰.۵ slm بررسی و طول جت اندازه گیری شد. در این نتایج که در شکل ۴-۱۳ نشان داده شده است، مشاهده می شود که طول جت پلاسما نیز با افزایش میزان شار گاز ورودی افزایش می یابد. این افزایش به دلیل بالارفتن تعداد ذرات گاز است که تولید پلاسما را بیشتر می کند.



شکل ۴-۱۳. نمودار طول جت پلاسما بر حسب شار ورودی گاز هلیوم

اما هنگامی که این آزمایش با منبع تغذیه سینوسی در ولتاژهای بالاتر ۱۳.۶، ۱۶.۶ و ۲۰.۶ کیلوولت انجام شد، طول جت ابتدا روند افزایشی و پس از رسیدن به یک نقطه ماکزیمم روند نزولی به خود گرفت. این کاهش از آن جهت بود که افزایش آهنگ شارش گاز بیشتر از ۳ لیتر بر دقیقه، تثبیت چگالی پلاسمای تولید شده را در پی

داشت. چرا که پلاسما فرصت بازیابی در بین الکتروود ها را پیدا نمی کرد. نمودار نشان داده شده در شکل ۴-۱۴ وابستگی طول جت پلاسما را به آهنگ شارش گاز ورودی در ولتاژهای مختلف منبع تغذیه سینوسی نشان می دهد.



شکل ۴-۱۴. نمودار طول جت بر حسب شار ورودی گاز هلیوم در استفاده از منبع ولتاژ سینوسی

۴-۵ بررسی طیف گسیلی جت پلاسما

به منظور درک بهتر از گونه های موجود در نواحی مختلف جت پلاسما، لنز دریافت کننده نور در سه قسمت بالا، میانی و پایین دست جت قرار داده شد و طیف گسیلی مربوط به هر کدام از این نواحی ثبت گردید.

در جدول ۱-۴ تمام گونه های موجود در طیف های ثبت شده در این سری آزمایش ها به همراه طول موج آنها آورده شده است.

جدول ۴-۱ اطلاعات مربوط به گونه های موجود در طیف های ثبت شده جت پلاسما [۵۱]

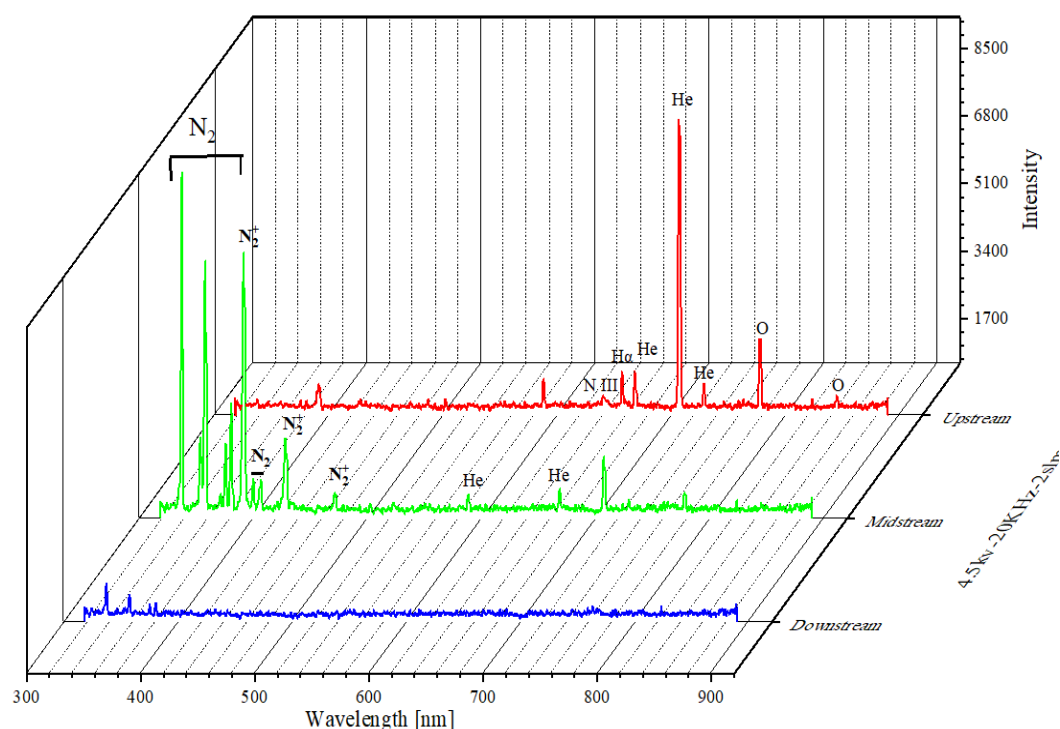
گونه	گذار	طول موج
N_2	$C^{\pi}\Pi_u \rightarrow B^{\pi}\Pi_g$	$300 - 450nm$ ($315.8 - 337.1 - 353.6 - 357.6 - 371.0$ $- 375.4 - 380.4$)
$N_2(C - B)$	—	$399.7 nm, 405.8 nm$
$N_2^+(B-X)$	$B^{\pi}\Sigma_u^+ \rightarrow X^{\pi}\Sigma_g^+$	$391.4 nm, 470.9 nm, 477.8 nm$
$He I$	$2p^{\pi}P^{\circ} \rightarrow 2s^{\pi}S$	$388.8 nm$
$He I$	$2p^{\pi}P \rightarrow 2s^{\pi}S$	$501.6 nm$
$He I$	$3d^{\pi}D \rightarrow 2p^{\pi}P^{\circ}$	$587.6 nm$
$He I$	$3d^{\pi}D \rightarrow 2p^{\pi}P^{\circ}$	$667.8 nm$
$He I$	$3s^{\pi}S^{\circ} \rightarrow 2p^{\pi}P^{\circ}$	$706.5 nm$
$He I$	$3s^{\pi}S^{\circ} \rightarrow 2p^{\pi}P^{\circ}$	$728.1 nm$
H_{α}	$2p - 3d$	$656.3 nm$
$O I$	$2p^{\pi}P \rightarrow 3s^{\circ}S^{\circ}$	$777.41 nm$
$O I$	$2p^{\pi}P \rightarrow 3s^{\pi}S^{\circ}$	$844.6 nm$

در این آزمایش مقدار فرکانس بر روی عدد ۲۰ KHz، پهنای پالس ۵ micro s و مقدار شاری گاز $2 lit/min$ تنظیم شد. همانطور که در شکل ۴-۱۵ قابل مشاهده است، در قسمت بالای جت، تعداد گونه های هلیم بسیار بالا است و در مقابل گونه های نیتروژن و اکسیژن بسیار شدت پایینی دارند. اما در قسمت میانی جت پلاسما، تعداد گونه های هلیم کاهش یافته و گونه های مربوط به مولکول نیتروژن و گونه N_2^+ افزایش می یابد. دلیل این امر این است که در قسمت بالایی جت پلاسما، گونه های تولید شده در تیوب کوارتز و محدوده ی بین الکترودها به تازگی از نازل خارج شده اند و هنوز با مولکول های موجود در هوای محیط واکنش نداده اند و ما هنوز همان پلاسمای

خالص هلیوم را شاهد هستیم. این نشان می دهد اگر در پردازش های مواد با جت پلاسما، هدف تأثیر گونه هلیوم و واکنش آن با سطح باشد، باید سعی شود قسمت بالایی جت پلاسما در تماس با شیء قرار گیرد.

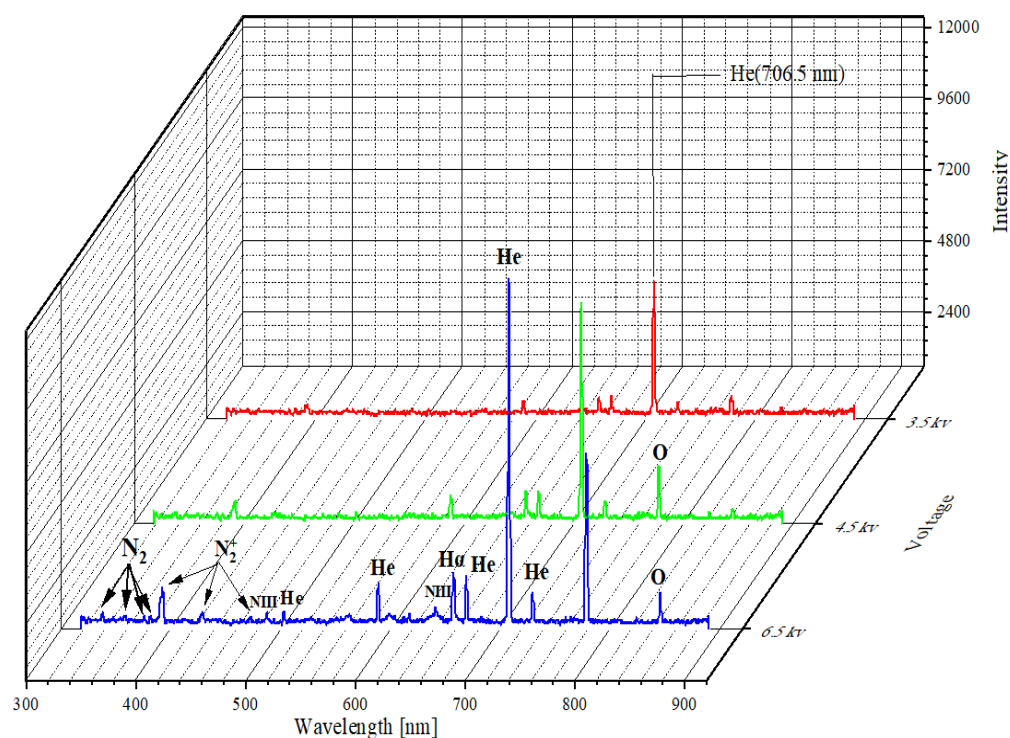
پس از ورود گونه های پرانرژی هلیوم و الکترون ها به محیط بیرون و برخورد آن ها با مولکول های هوا، گونه های نیتروژن و N_2^+ به وجود می آیند و گونه های باردار هلیوم از بین می روند و شدت شان بسیار کم می شود. این نمودارها نشان می دهند که برای استفاده از خواص گونه های نیتروژن می بایست قسمت میانی جت پلاسما را در تماس با مکان مورد پردازش، قرار دهیم.

در قسمت پایینی جت پلاسما، ذرات تقریباً خنثی شده و به حالت پایدار درآمده و گونه های هلیوم به کلی از بین می روند و تنها شاهد گونه های نیتروژن و اکسیژن با شدتی کمتر از شدت آن ها در قسمت میانی، هستیم.

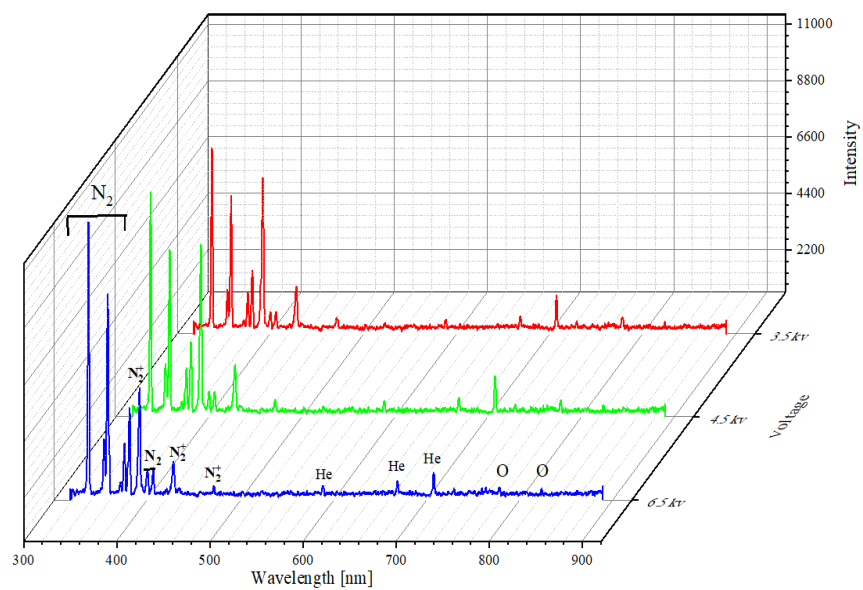


شکل ۴-۱۵. طیف ثبت شده جت پلاسما در سه ناحیه بالا، میانی و پایین

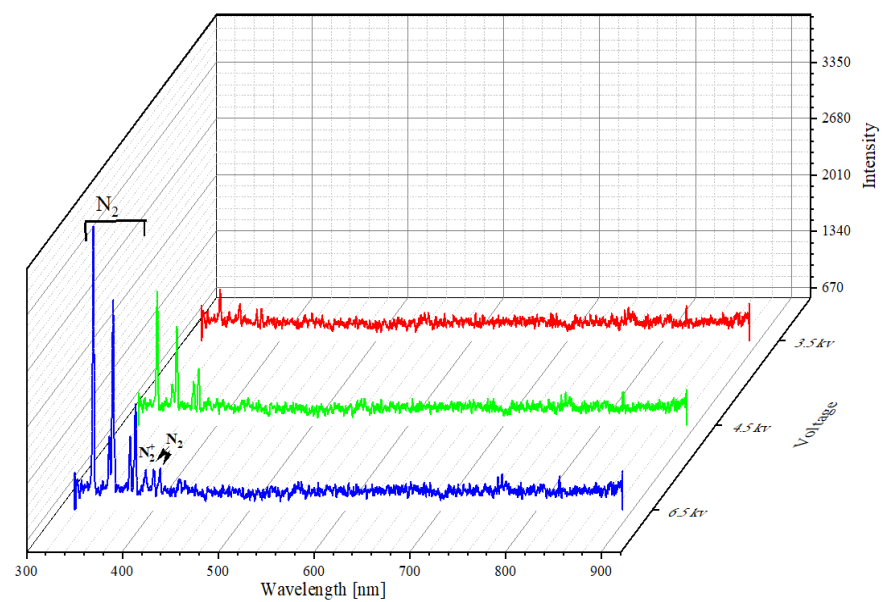
شکل ۴-۱۶، شکل ۴-۱۷، شکل ۴-۱۸ تغییرات طیف گسیلی از جت پلاسما را در افزایش ولتاژ اعمالی نشان می دهد. اندازه گیری ها در سه ولتاژ ۴.۵، ۵.۵ و ۶.۵ کیلوولت صورت گرفته است. با افزایش ولتاژ شدت گونه های موجود در پلاسما به طور قابل توجهی افزایش می یابد.



شکل ۴-۱۶. تغییرات طیف در قسمت بالای جت بر حسب تغییر ولتاژ اعمالی

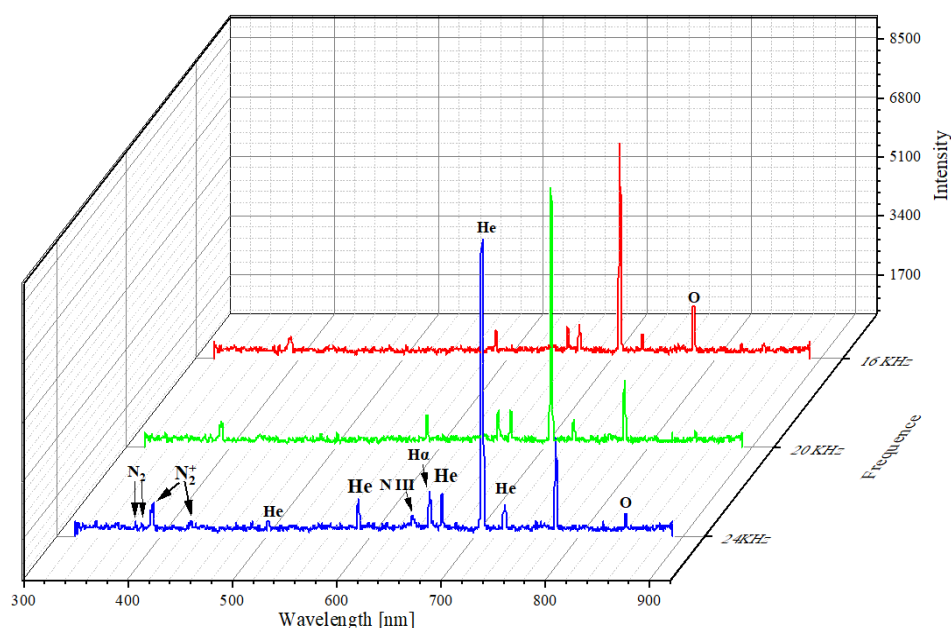


شکل ۴-۱۷. تغییرات طیف در قسمت میانی جت بر حسب تغییر ولتاژ اعمالی

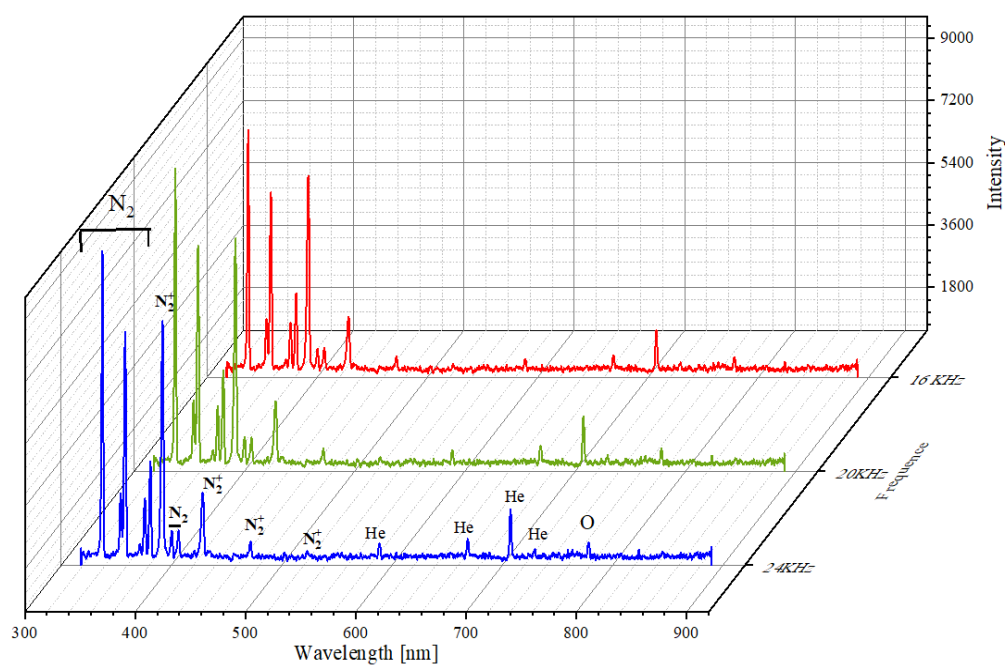


شکل ۴-۱۸. تغییرات طیف در قسمت پایین جت بر حسب تغییر ولتاژ اعمالی

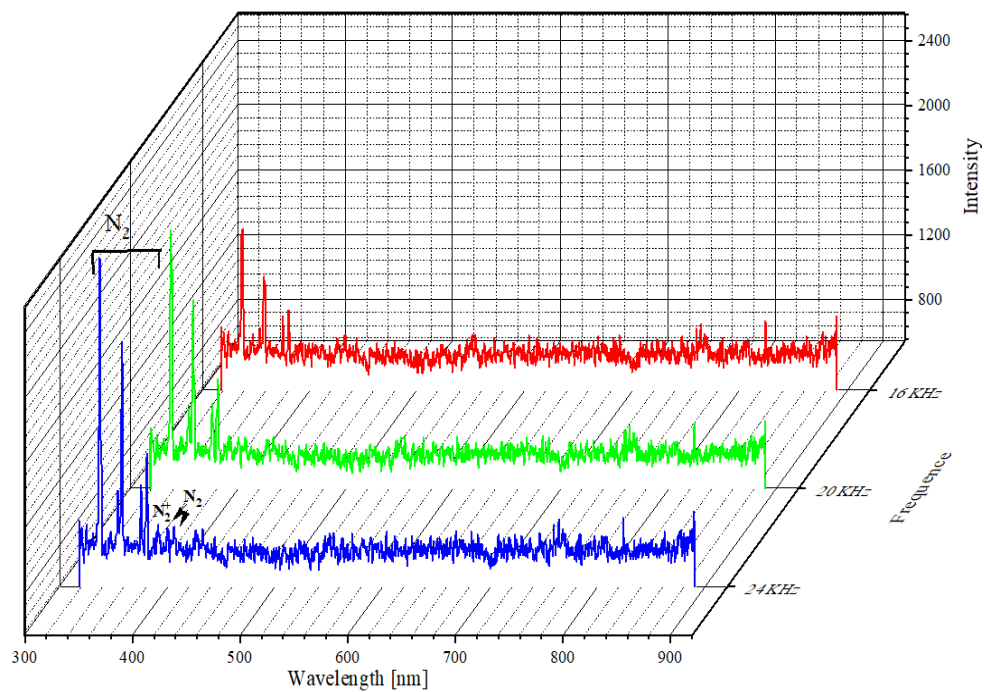
در این سری آزمایش ها، تغییرات طیف گسیلی جت پلاسما در هنگام افزایش فرکانس نیز بررسی شد که در شکل ۴-۱۹ (بالای جت) شکل ۴-۲۰ (میانی) شکل ۴-۲۱ (پایین جت) نشان داده شده است. در این آزمایش مقدار ولتاژ بر روی ۴.۵ کیلوولت و پهنای پالس، ۵ میکروثانیه تنظیم شد و فرکانس در سه مقدار ۱۶ - ۲۰ و ۲۴ کیلوهرتز تنظیم گشت. همان طور که مشاهده می شود افزایش فرکانس باعث افزایش شدت گونه ها، به خصوص گونه های نیتروژن و اکسیژن می شود. میزان تغییرات شدت در میان سه ناحیه مورد بررسی جت پلاسما، در ناحیه پایینی بسیار بیشتر از دوناچه بالاتر است. این نشان می دهد که با افزایش فرکانس سرعت گونه ها و انرژی آن ها بیشتر شده است.



شکل ۴-۱۹. تغییرات طیف در قسمت بالای جت بر حسب تغییر فرکانس اعمالی



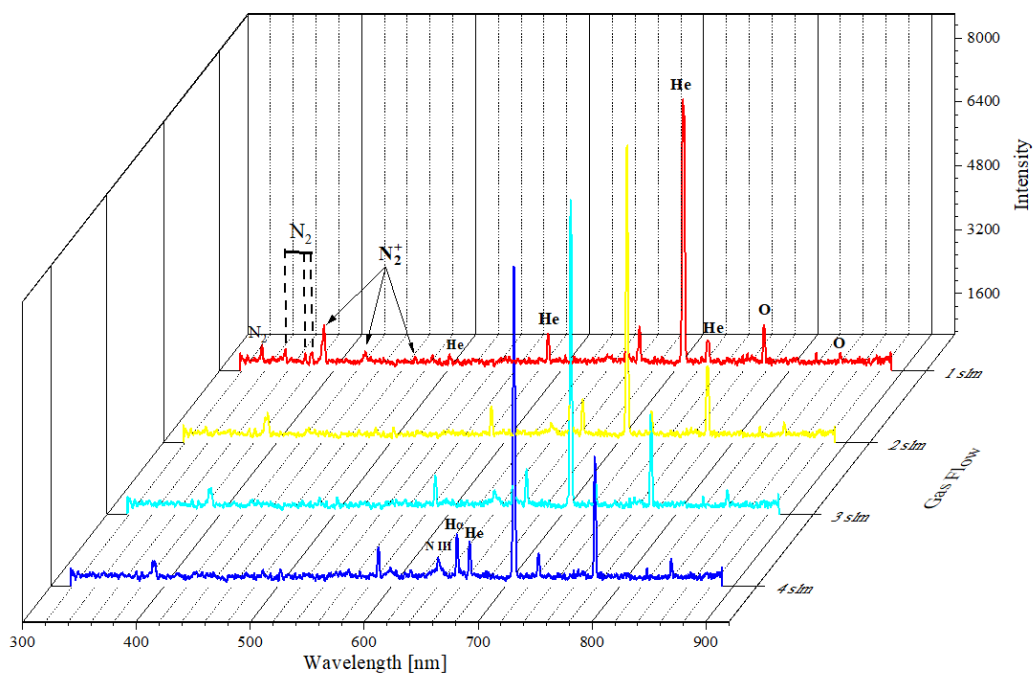
شکل ۴-۲۰. تغییرات طیف در قسمت میانی جت بر حسب تغییر فرکانس اعمالی



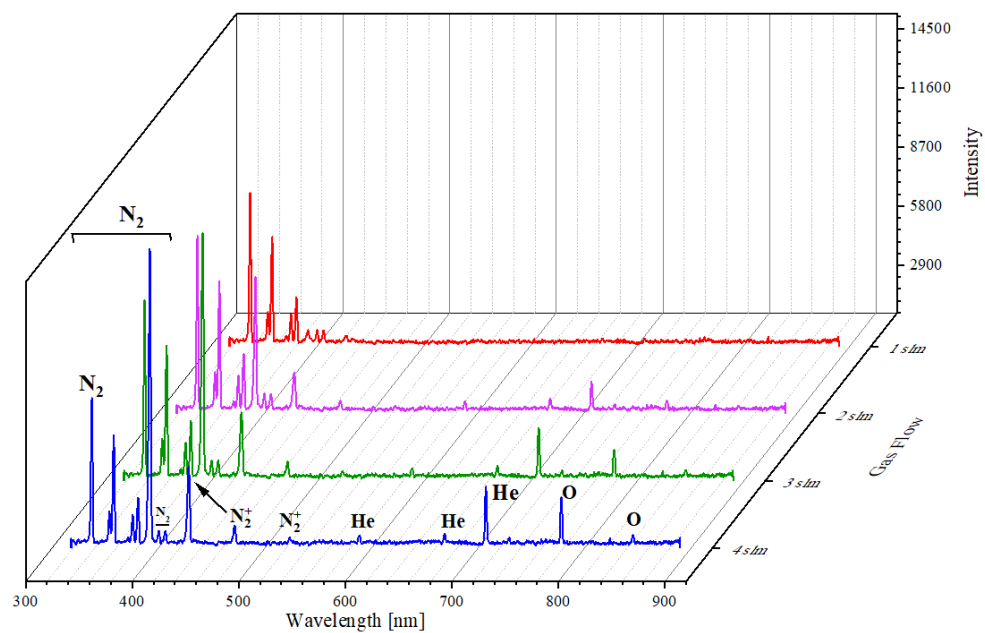
شکل ۴-۲۱. تغییرات طیف در قسمت پایینی جت بر حسب تغییر فرکانس اعمالی

در ادامه تحلیل طیف گسیلی جت پلاسما، اثر شار گاز هلیم بر روی طیف جت اندازه گیری و ثبت گردید. طیف های نشان داده شده در شکل ۲۲-۴، شکل ۲۴-۴ و شکل ۲۳-۴، در ولتاژ ۵ کیلوولت، فرکانس ۲۰ کیلوهرتز، پهنای پالس ۵ میکروثانیه و در شار گاز هلیم ۱-۲-۳ و ۴ لیتر بر دقیقه ثبت شده اند.

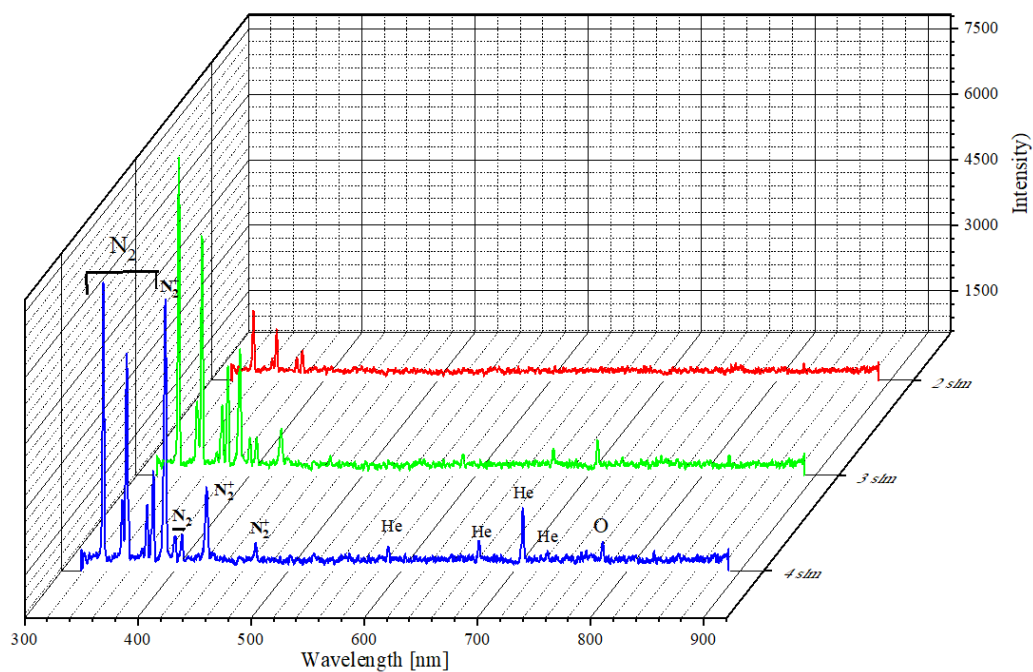
با افزایش شار گاز ورودی در قسمت بالایی جت پلاسما، شدت گونه های مولکول نیتروژن و N_2^+ کمتر می شود. اما در قسمت میانی جت پلاسما، افزایش شار باعث افزایش چشمگیر شدت گونه های هلیم و همچنین نیتروژن و N_2^+ شده است. این طیف نشان می دهد افزایش فلوی گاز می تواند بر افزایش محدوده ی حرکت گونه های هلیم تأثیر مثبتی داشته باشد. همانطور که در طیف گسیلی قسمت پایینی جت پلاسما مشاهده می شود، این امر باعث شده تا گونه های هلیم حتی در نقاط پایین دست جت نیز وجود داشته باشند.



شکل ۲۲-۴. طیف منتشر شده از قسمت بالای جت در شارهای مختلف گاز هلیم



شکل ۴-۲۳. طیف منتشر شده از قسمت پایینی جت در شارهای مختلف گاز هلیم

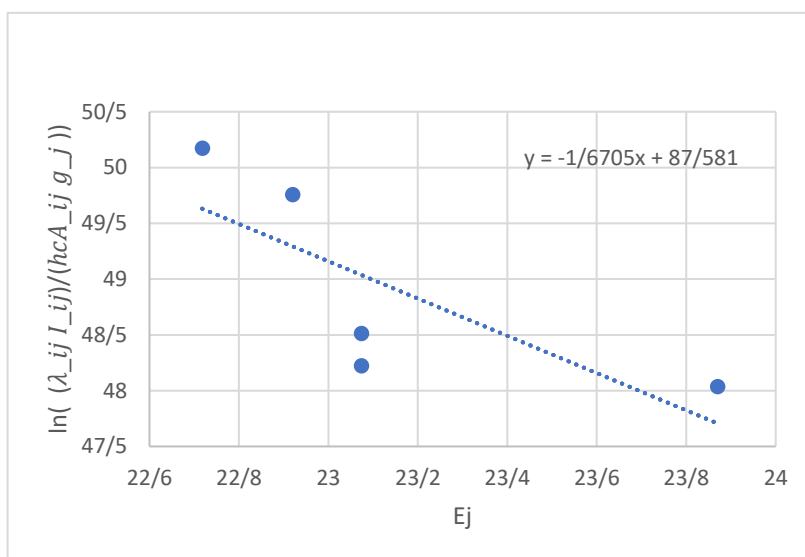


شکل ۴-۲۴. طیف منتشر شده از قسمت میانی جت در شارهای مختلف گاز هلیم

۴-۶ محاسبه دما

در این آزمایش برای محاسبه ی دمای الکترون از نمودار بولتزمن استفاده شده است. در این نمودار که $\ln(\frac{\lambda_{ij} I_{ij}}{hc A_{ij} g_j})$ بر حسب E_j می باشد، از طریق شیب خط می توان دما را محاسبه نمود. اطلاعات مربوط به طول موج، تبهگنی، احتمال و ... در جدول ۳-۱ آورده شده است.

برای مثال در طیف بدست آمده در قسمت بالا دست جت پلاسما، گونه های هلیم با طول موج های ۵۰۱.۵-۵۸۷.۵-۶۶۷.۸-۷۰۶.۵ و ۷۲۸.۱ نانومتر انتخاب شدند. با قرار دادن مشخصات این طول موج ها در رابطه بالا و رسم نقاط آن بر اساس E_j نمودار نشان داده شده در شکل ۴-۲۵ به دست آمد. با رسم تناسب خطی این نمودار می توان شیب آن را که برابر با $-\frac{1}{KT}$ است به دست آورد.



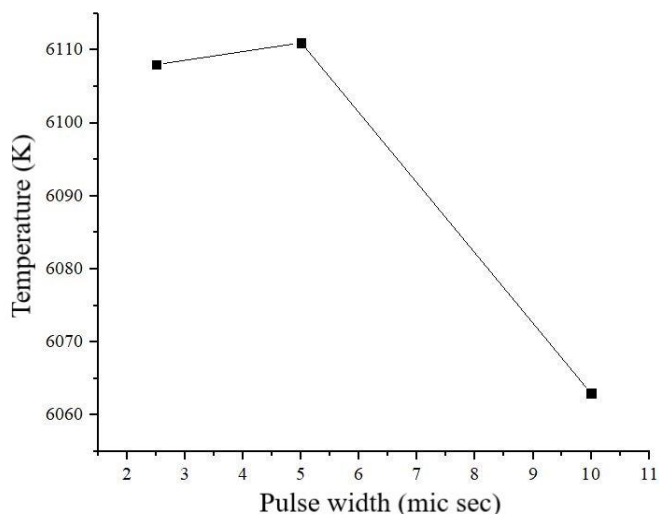
شکل ۴-۲۵. نمودار $\ln(\frac{\lambda_{ij} I_{ij}}{hc A_{ij} g_j})$ بر حسب E_j

$$\frac{1}{KT} = -۱.۶۷۰۵$$

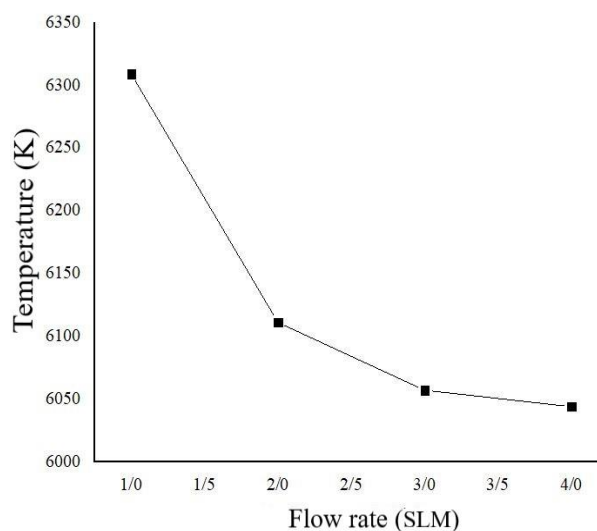
عکس این مقدار، دما را بر حسب الکترون ولت به ما می دهد و از آنجا که هر الکترون ولت برابر با ۱۱۶۰۰ درجه کلوین است، می توان دما را بر حسب کلوین به دست آورد.

$$KT = 0.599 \text{ eV} \Rightarrow T = 6944.03 \text{ K}$$

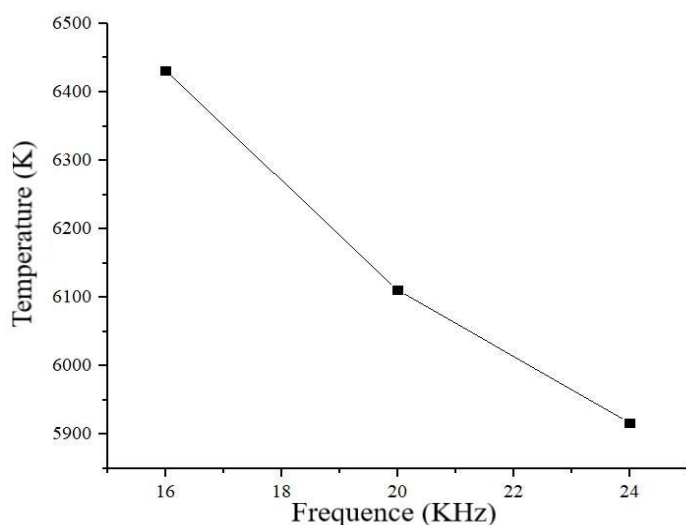
در ذیل نمودارهای مربوط به تغییرات دما در برابر تغییرات پارامترهای الکتریکی همچون ولتاژ، فرکانس، پهنای پالس دستگاه و شار گاز نشان داده شده است:



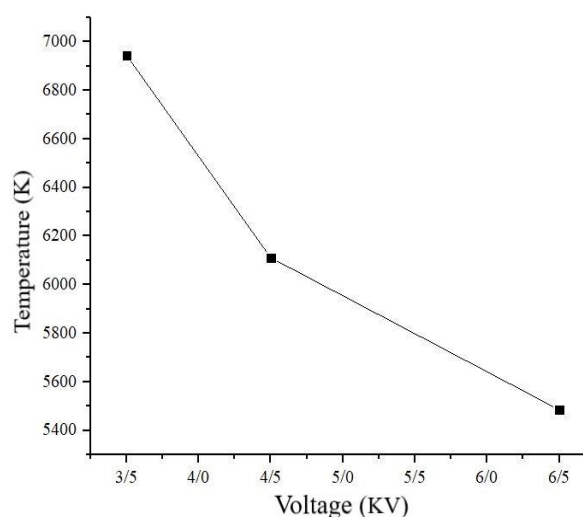
شکل ۴-۲۶. نمودار دمای الکترون بر حسب پهنای پالس



شکل ۴-۲۸. نمودار دمای الکترون بر حسب شار گاز هلیوم



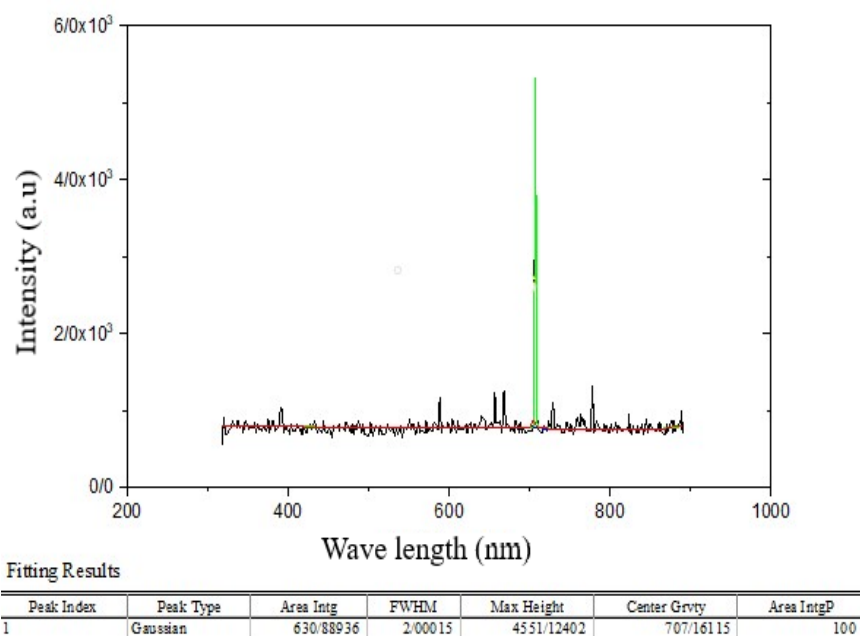
شکل ۴-۲۷. نمودار دما الکترون بر حسب فرکانس



شکل ۴-۲۹. نمودار دمای الکترون بر حسب ولتاژ اعمالی

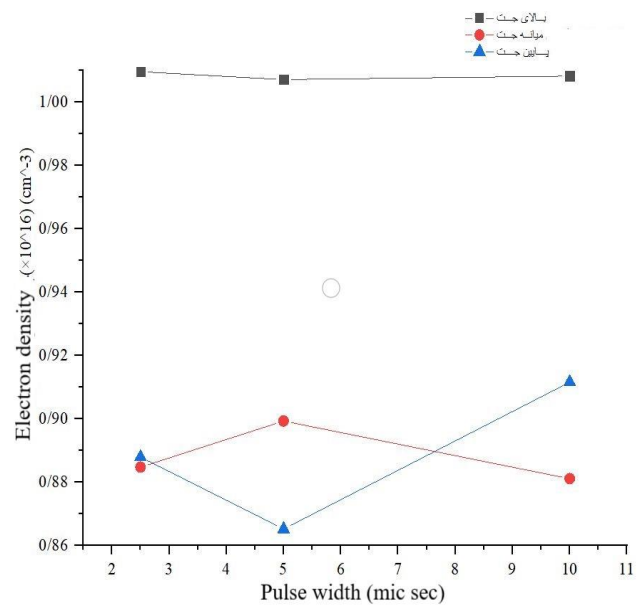
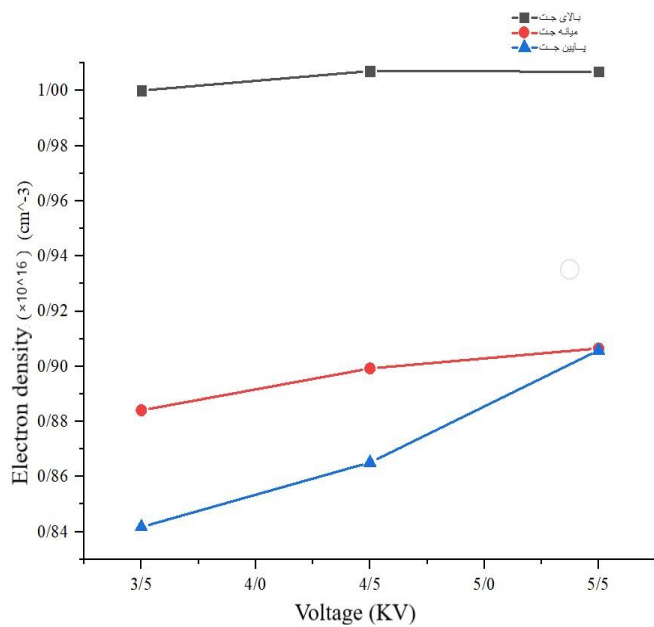
برای محاسبه‌ی چگالی الکترون همانطور که در بخش ۳-۳-۲ توضیح داده شد، ابتدا مقدار نیم پهنای یک پیک خاص در طیف گسیل شده جت پلاسما اندازه گیری شد. با قرار دادن مقدار نیم پهنای در رابطه (۳-۷) مقدار چگالی محاسبه گردید. مقدار ثابت الکترون نیز برابر یک قرار داده شد.

$$n_e = 1.00008 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$



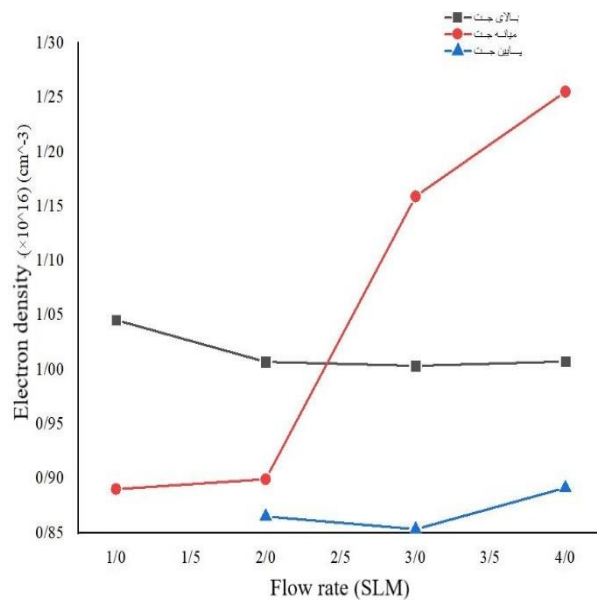
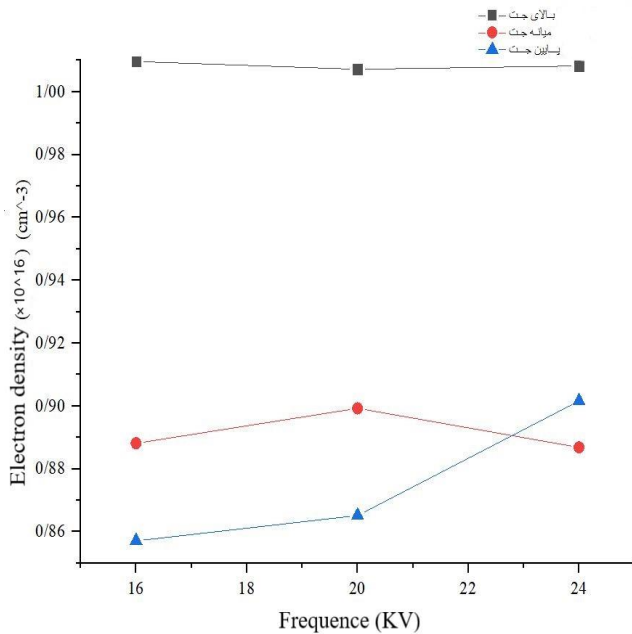
شکل ۴-۳۰. پیک شاخص موجود در طیف جهت محاسبه نیم پهنای

در شکل‌های زیر، نمودارهای مربوط به چگالی الکترون در نواحی مختلف جت پلاسما نشان داده شده است:



شکل ۴-۳۴. نمودار چگالی الکترون بر اساس ولتاژ در سه ناحیه جت پلاسما

شکل ۴-۳۱. نمودار چگالی الکترون بر اساس پهنای پالس اعمالی در سه ناحیه جت پلاسما



شکل ۴-۳۳. نمودار چگالی الکترون بر اساس فرکانس اعمالی در سه ناحیه جت پلاسما

شکل ۴-۳۲. نمودار چگالی الکترون بر اساس شار گاز هلیوم در سه ناحیه جت پلاسما

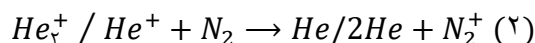
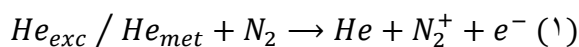
این نمودارها نشان می دهد که چگالی الکترون در ناحیه بالای جت بیشتر از دو ناحیه دیگر است و هرچه از دهانه نازل خروجی جت پلاسما به سمت پایین می رویم، چگالی الکترون کاهش می یابد.

در شکل ۴-۳۲ مشاهده می شود که با افزایش ولتاژ، چگالی الکترون ها افزایش پیدا می کند. چرا که با افزایش ولتاژ الکترون ها میدان قوی تری را احساس می کنند و انرژی بیشتری می گیرند و در نتیجه برخوردهای بیشتر باعث تولید الکترون های جدید می شوند.

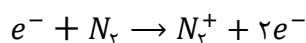
در شکل ۴-۳۳ نیز مشاهده می شود با افزایش فرکانس سرعت ذرات بالارفته و یونیزاسیون در انتهای جت یعنی در قسمت پایین جت پلاسما افزایش یافته است.

هم چنین در شکل ۴-۳۴، مشاهده می شود با افزایش شار گاز و افزایش ذرات، یونیزاسیون در محیط هوای بیرون بیشتر صورت گرفته و چگالی الکترون بالا می رود. این در حالی است که با افزایش شار گاز، دمای الکترون کاهش یافته است.

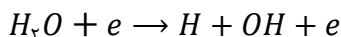
لازم به ذکر است که گونه های N_2 برانگیخته و He موجود در جت هلیوم از طریق تحریک تأثیر الکترون و گونه N_2^+ از طریق یونیزاسیون پنینگ (۱) و انتقال بار (۲) توسط هلیوم شبه پایدار مطابق واکنش های زیر تولید می شود [۵۱].



هم چنین تولید گونه های نیتروژن می تواند توسط الکترون های به وجود آمده توسط امواج یونیزاسیون گلوله پلاسمایی مطابق واکنش زیر صورت گیرد.



انتشار گونه برانگیخته H_{α} نیز غالباً به دلیل ناخالصی اجتناب ناپذیر مولکول آب در گاز کاری، در یک تخلیه هلیوم خالص نیز مشاهده می‌شود [۵۹]:



می‌توان گفت در واقع ستون پلاسما در دو جهت تولید می‌شود: یکی در لوله تغذیه هلیوم و دیگری در پایین دست تخلیه [۵۹]. همانطور که نتایج ما نشان داد در قسمت بالای جت که در ابتدای خروجی از لوله تغذیه هلیوم در نظر گرفته شد، بیشتر گونه‌های موجود از نوع He هستند. اما در قسمت دوم سهم واکنش‌های هلیوم-هوا در محدوده‌ی انتشار بسیار مهم است که در آن برخورد با الکترون‌های سریع در ورود امواج یونیزاسیون، واکنش‌های غالب هستند.

۴ - نتیجه گیری

در دهه‌های اخیر استفاده از جت پلاسمای غیرعادلی فشار اتمسفری به دلیل عدم نیاز به تجهیزات گران قیمت مانند دستگاه خلأ و همچنین محدود نبودن توده پلاسما در یک محفظه، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این نوع پلاسما به دلیل ماهیت غیرتعادلی آن، الکترون‌ها سهم بیشتری از انرژی تزریقی توسط منبع تغذیه را به خود اختصاص می‌دهند که این باعث می‌شود در عین بالا رفتن قدرت فعالیت‌های شیمیایی دمای کاربری جت پلاسما در حد دمای اتاق باقی بماند. ساختار جت پلاسما به گونه‌ای است که توده پلاسما در میان الکترودها ایجاد می‌گردد و با توجه به عواملی چون رفتار ذرات در میدان الکتریکی، از محدوده‌ی محفظه بیرون می‌آید و این ویژگی باعث می‌شود تا جت پلاسما برای پردازش سطوح دو بعدی و سه بعدی محدودیتی نداشته باشد. این عوامل باعث شده‌اند تا جت پلاسمای غیرتعادلی اتمسفری گزینه‌ای مناسب برای استفاده از خواص پلاسما در صنایع پزشکی و زیستی باشد. شناخت رفتار پلاسما در شرایط مختلف و اندازه‌گیری پارامترهای آن همچون توان پلاسما، طول جت و طیف گسیلی از آن در نواحی مختلف از اهداف این تحقیق است.

در این تحقیق توان پلاسما بر اساس ولتاژ و فرکانس بررسی شد و نشان داده شد که با افزایش ولتاژ و فرکانس اعمالی، توان پلاسما افزایش می یابد. اما افزایش آن پس از یک میزان خاصی باعث ایجاد آرک الکتریکی در دستگاه جت پلاسما شده که در عین بالا رفتن توان دستگاه، می تواند آسیب زا باشد. هم چنین در بررسی های تأثیر افزایش شار گاز بر توان پلاسما نیز نشان داده شد که با افزایش شار گاز ورودی، به دلیل افزایش ذرات موجود در ناحیه بین الکترودها و بالطبع نیاز به انرژی بیشتر ، توان دستگاه افزایش می یابد.

طول جت پلاسما به عنوان یک عنصر اساسی در مشخصات جت پلاسما نیز متأثر از پارامترهای اعمالی الکتریکی است. با افزایش ولتاژ اعمالی و شار گاز ورودی، طول جت پلاسما نیز افزایش می یابد. اما این افزایش تا یک محدوده ای خاصی است و پس از آن به دلیل ایجاد یک بارفضا در محدوده ای الکترود حلقه ای کاتد، طول جت تغییری نمی کند. اما در افزایش فرکانس به دلیل ایجاد برخوردهای بیشتر و در نتیجه ترکیب مجدد گونه های باردار طول جت کاهش بسیار کمی داشت.

در ثبت طیف گسیلی از جت پلاسما، سه ناحیه بالایی، میانی و پایین جت پلاسما مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که گونه های هلیم در بالای جت قرار دارند و تعداد گونه های مولکول نیتروژن بسیار کم است. اما در قسمت های میانی و پایینی تعداد گونه های هلیم به شدت کاهش می یابد و در عین حال گونه های مولکول نیتروژن افزایش پیدا می کند. این مشاهدات به خوبی نشان می دهد برای استفاده از خصوصیات گونه های هلیم در جت پلاسما باید قسمت بالایی جت در تماس با جسم مورد پردازش قرار گیرد و برای استفاده از خواص گونه های نیتروژن باید قسمت میانی جت به دلیل وجود بیشتر گونه های نیتروژن، استفاده گردد.

منابع

۱. Chu, P.K. and X. Lu, *Low temperature plasma technology: methods and applications*. ۲۰۱۳: CRC Press.
۲. Chen, F.F. and J.P. Chang, *Lecture notes on principles of plasma processing*. ۲۰۱۲: Springer Science & Business Media.
۳. Law, V. and S. Anghel, *Compact atmospheric pressure plasma self-resonant drive circuits*. Journal of Physics D: Applied Physics, ۲۰۱۲. ۴۵(۷): p. ۰۷۵۲۰۲
۴. Eliasson, B. and U. Kogelschatz, *Nonequilibrium volume plasma chemical processing*. IEEE transactions on plasma science, ۱۹۹۱. ۱۹(۶): p. ۱۰۷۷-۱۰۶۳
۵. Lu, X., M. Laroussi, and V. Puech, *On atmospheric-pressure non-equilibrium plasma jets and plasma bullets*. Plasma Sources Science and Technology, ۲۰۱۲. ۲۱(۳): p. ۰۳۴۰۰۵
۶. Nie, Q.-Y., et al., *A simple cold Ar plasma jet generated with a floating electrode at atmospheric pressure*. Applied Physics Letters, ۲۰۰۸. ۹۳(۱): p. ۰۱۱۵۰۳
۷. Tendero, C., et al., *Atmospheric pressure plasmas: A review*. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, ۲۰۰۶. ۶۱(۱): p. ۳۰-۲
۸. Sun, P., et al., *Close-packed arrays of plasma jets emanating from microchannels in a transparent polymer*. IEEE Transactions on Plasma Science, ۲۰۱۲. ۴۰(۱۱): p. ۲۹۵۰-۲۹۴۶
۹. Schutze, A., et al., *The atmospheric-pressure plasma jet: a review and comparison to other plasma sources*. IEEE transactions on plasma science, ۱۹۹۸. ۲۶(۶): p. ۱۶۹۴-۱۶۸۵
۱۰. Jiang, H., et al., *Experimental study of QV Lissajous figures in nanosecond-pulse surface discharges*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, ۲۰۱۳. ۲۰(۴): p. ۱۱۰۱-۱۱۱۱
۱۱. Bingham, B., *Fundamentals of Plasma Physics*, Paul M. Bellan (Ed.), Cambridge University Press (۲۰۰۶), p. ۶۳۱, ISBN-۱۰: ۰۵۲۱۸۲۱۱۶۹. ۲۰۰۷, Elsevier.
۱۲. 松岡守, *Introduction to Plasma Physios*, Robert J Goldston and Paul H Rutherford 著, ۱۹۹۰年, Institute of Physics Publishing, ۴۹۱ 頁, ۵۹\$/۱۹۶\$, B ۰ 版, ペーパー/ハードカバー. プラズマ・核融合学会誌, ۱۹۹۶. ۷۲(۲): p. ۱۶۲
۱۳. Harry, J., *Introduction to plasma technology*. ۲۰۱۰: Wiley Online Library.
۱۴. Lieberman, M.A. and A.J. Lichtenberg, *Principles of plasma discharges and materials processing*. ۲۰۰۵: John Wiley & Sons.
۱۵. Aleksandrov, A.F., L. Bogdankevich, and A. Rukhadze. *Principles of plasma electrodynamics*. in *Osnovy elektrodinamiki plazmy*, Moscow, Izdatel'stvo Vysshaia Shkola, ۱۹۷۸ Berlin and New

- York, Springer-Verlag (Springer Series in Electrophysics. Volume 9), 1984, 0.6p. Translation. Previously cited in issue 13, p. 2444, Accession no. A329.1-80. 1984
- .16 Morris, A., et al., *Bactericidal effects of non-equilibrium cold plasma on Geobacillus stearothermophilis and Bacillus cerus*. Proc. 24th ICPIG, 2007: p. 20-10
 - .17 Bárdos, L. and H. Baránková, *Cold atmospheric plasma: Sources, processes, and applications*. Thin Solid Films, 2010. 518(23): p. 7713-7700
 - .18 Nehra, V., A. Kumar, and H. Dwivedi, *Atmospheric non-thermal plasma sources*. International Journal of Engineering, 2008. 2(1): p. 78-83
 - .19 Jeong, J., et al., *Etching materials with an atmospheric-pressure plasma jet*. Plasma Sources Science and Technology, 1998. 7(3): p. 282
 - .20 Fridman, G., et al., *Blood coagulation and living tissue sterilization by floating-electrode dielectric barrier discharge in air*. Plasma Chemistry and plasma processing, 2006. 26(2): p. 442-450
 - .21 Chen, Z., et al., *Cold atmospheric plasma discharged in water and its potential use in cancer therapy*. Journal of Physics D: Applied Physics, 2016. 50(1): p. 010208
 - .22 Emmert, S., et al., *Atmospheric pressure plasma in dermatology: Ulcus treatment and much more*. Clinical Plasma Medicine, 2013. 1(1): p. 29-24
 - .23 Fridman, G., et al., *Applied plasma medicine*. Plasma processes and polymers, 2008. 5(1): p. 533-503
 - .24 Kong, M.G., et al., *Plasma medicine: an introductory review*. new Journal of Physics, 2009. 11(1): p. 010012
 - .25 Humud, H.R., Q.A. Abbas, and K.F. Abdullah, *Tooth bleaching by plasma jet assisted by hydrogen peroxide and water*.
 - .26 Hoffmann, C., C. Berganza, and J. Zhang, *Cold Atmospheric Plasma: methods of production and application in dentistry and oncology*. Medical gas research, 2013. 3(1): p. 21
 - .27 Morent, R., et al., *Non-thermal plasma treatment of textiles*. Surface and coatings technology, 2008. 202(14): p. 3449-3457
 - .28 Radetic, M., et al. *Environmental impact of plasma application to textiles*. in *Journal of physics: conference series*. 2007. IOP Publishing.
 - .29 Takayama, M., et al., *Ozone generation by dielectric barrier discharge for soil sterilization*. Thin Solid Films, 2006. 506: p. 399-396
 - .30 Kogelschatz, U., B. Eliasson, and W. Egli, *Dielectric-barrier discharges. Principle and applications*. Le Journal de Physique IV, 1997. 9(C2): p. C27-2-C.76-2
 - .31 Amini, M., M. Ghoranneviss, and S. Abdijadid, *Effect of cold plasma on crocin esters and volatile compounds of saffron*. Food chemistry, 2017. 230: p. 293-290
 - .32 Winter, J., R. Brandenburg, and K. Weltmann, *Atmospheric pressure plasma jets: an overview of devices and new directions*. Plasma Sources Science and Technology, 2010. 24(6): p. 064001
 - .33 Teschke, M., et al., *High-speed photographs of a dielectric barrier atmospheric pressure plasma jet*. IEEE Transactions on Plasma Science, 2000. 28(2): p. 311-310
 - .34 Li, Q., et al., *Effects of gas flow rate on the length of atmospheric pressure nonequilibrium plasma jets*. Applied Physics Letters, 2009. 95(14): p. 141002

- .35 Walsh, J.L. and M.G. Kong, *Contrasting characteristics of linear-field and cross-field atmospheric plasma jets*. Applied Physics Letters, 2008. 93(11): p. 111001
- .36 Laroussi, M. and X. Lu, *Room-temperature atmospheric pressure plasma plume for biomedical applications*. Appl Phys Lett, 2000. 87(11): p. 112902
- .37 Lu, X., et al., *An 11 cm long atmospheric pressure cold plasma plume for applications of plasma medicine*. Applied Physics Letters, 2008. 92(8): p. 081502
- .38 Lu, X., et al., *An RF plasma device for sterilization of root canal of teeth*. IEEE transactions on Plasma Science, 2009. 37(5): p. 673-678
- .39 Hong, Y.C. and H.S. Uhm, *Microplasma jet at atmospheric pressure*. Applied physics letters, 2006. 89(22): p. 221504
- .40 Mohamed, A.-a.H., J.F. Kolb, and K.H. Schoenbach, *Method and device for creating a micro plasma jet*. 2009, Google Patents.
- .41 Hong, Y.C., et al., *Atmospheric pressure air-plasma jet evolved from microdischarges: Eradication of E. coli with the jet*. Physics of Plasmas, 2009. 16(12): p. 123502
- .42 Liu, X., et al., *Numerical and experimental study on a pulsed-dc plasma jet*. Plasma Sources Science and Technology, 2014. 23(3): p. 035007
- .43 Lu, X., et al., *Guided ionization waves: Theory and experiments*. Physics Reports, 2014. 573(3): p. 166-193
- .44 Walsh, J.L., et al., *Three distinct modes in a cold atmospheric pressure plasma jet*. Journal of Physics D: Applied Physics, 2010. 43(7): p. 075201
- .45 Douat, C., et al., *Dynamics of colliding microplasma jets*. Plasma Sources Science and Technology, 2012. 21(3): p. 034010
- .46 Shashurin, A., et al., *Temporal behavior of cold atmospheric plasma jet*. Applied Physics Letters, 2009. 94(23): p. 231504
- .47 Ley, H.-H., *Analytical methods in plasma diagnostic by optical emission spectroscopy: A tutorial review*. Journal of Science and Technology, 2014. 1(1): p. 1
- .48 Sarani, A., A.Y. Nikiforov, and C. Leys, *Atmospheric pressure plasma jet in Ar and Ar/H₂O mixtures: Optical emission spectroscopy and temperature measurements*. Physics of Plasmas, 2010. 17(6): p. 063504
- .49 Park, H., S. You, and W. Choe, *Correlation between excitation temperature and electron temperature with two groups of electron energy distributions*. Physics of Plasmas, 2010. 17(10): p. 103501
- .50 Xiao, D., et al., *Characteristics of atmospheric-pressure non-thermal N₂ and N₂/O₂ gas mixture plasma jet*. Journal of applied physics, 2014. 115(3): p. 033303
- .51 Xiong, Q., et al., *Characterization of an atmospheric helium plasma jet by relative and absolute optical emission spectroscopy*. Plasma Sources Science and Technology, 2012. 22(1): p. 015011

- .02 Konjević, N., et al., *Experimental Stark widths and shifts for spectral lines of neutral and ionized atoms (a critical review of selected data for the period 1989 through 2000)*. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 2002. 31(3): p. 927-819
- .03 Pal, U., et al., *Analysis of power in an argon filled pulsed dielectric barrier discharge*. Plasma Science and Technology, 2013. 15(7): p. 635
- .04 Gerber, I.C., et al., *Time behaviour of helium atmospheric pressure plasma jet electrical and optical parameters*. Applied Sciences, 2017. 7(8): p. 812
- .05 Walsh, J.L. and M.G. Kong, *Room-temperature atmospheric argon plasma jet sustained with submicrosecond high-voltage pulses*. Applied Physics Letters, 2007. 91(22): p. 221502
- .06 Deepak, G.D., et al., *Electrical characterization of argon and nitrogen based cold plasma jet*. The European Physical Journal Applied Physics, 2018. 83(2): p. 20801
- .07 Park, H.S., et al., *Optical and electrical characterization of an atmospheric pressure microplasma jet with a capillary electrode*. Physics of Plasmas, 2010. 17(3): p. 033502
- .08 Gerling, T., et al., *Power measurement for an atmospheric pressure plasma jet at different frequencies: distribution in the core plasma and the effluent*. The European Physical Journal Applied Physics, 2017. 78(1): p. 10801
- .09 Jarrige, J., M. Laroussi, and E. Karakas, *Formation and dynamics of plasma bullets in a non-thermal plasma jet: influence of the high-voltage parameters on the plume characteristics*. Plasma Sources Science and Technology, 2010. 19(6): p. 065005

Abstract

Atmospheric pressure non-equilibrium cold plasmas have received much attention in industry and medicine due to their high chemical reactivity and room temperature. Among the various types of plasma machines, atmospheric cold plasma jets have become very popular in medical and biological applications due to their unique properties. Atmospheric plasma jets, in addition to having the general advantages of cold atmospheric plasmas, are not limited to plasma production space for material processing and can process any type of body, regardless of its size and dimensions. The use of helium gas as the working gas of this system reduces the temperature in this type of plasma and makes it more desirable for processing heat sensitive surfaces. In order to use this plasma more and better, it is necessary to study the behaviors and the effect of its related parameters. In this dissertation, the behaviors of atmospheric plasma jets in the plasma laboratory of Shahrood University have been studied and its behaviors have been recorded during changes in electrical parameters, and factors such as discharge current, jet length and plasma power have been calculated. Also, by performing optical spectroscopy, the active species in the plasma jet in the upper, middle and downstream areas of the jet have been recorded and studied.

Keywords : Plasma jet, Electrical characterization, Plasma power, Optical characterization, Jet length, Helium



Shahrood University of Technology

Physics and Nuclear Engineering Faculty of
Thesis in Atomic and Molecular physics M.Sc

Electrical and Optical characterization of Atmospheric Pressure plasma Jet

By: Mohammad Rajabi Fard

Supervisor:

Dr. Mehdi Momeni

Dr. Mohammad Amin Bassam

Advisor:

Zahra Khodabakhshi

October,2020