



دانشکده فیزیک و مهندسی هسته ای

پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک اتمی و مولکولی

مطالعهی پارامترهای پلاسما همچون چگالی، دمای الکترونی و پتانسیل پلاسما

درتخليهي الكتريكي

نگارنده:فرشته فلاحی

اساتيد راهنما:

دکتر مهدی مومنی

دکتر سید ایمان حسینی

بهمنماه ۱۳۹۵

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده: فیزیک

گروہ:اتمی-مولکولی

پایان نامه کارشناسی ارشد فرشته فلاحی

تحت عنوان: مطالعهی پارامترهای پلاسما همچون چگالی، دمایالکترونی و پتانسیل پلاسما در تخلیهی الکتریکی

امضاء	اساتيد مشاور	امضاء	اساتيد راهنما
	نام و نام خانوادگی		نام و نام خانوادگی
	نام و نام خانوادگی		نام و نام خانوادگی

امضاء	نماينده تحصيلات تكميلي	امضاء	اساتيد داور
	نام و نام خانوادگی		نام و نام خانوادگی
			نام و نام خانوادگی

تقديم به:

خدایی که آفرید جهان را، انسان را، عقل را،علم را، معرفت را، عشق را و تقدیم به کسانی که سرآغاز تولد من هستند.از یکی زاده شدم و از باقی جاودانه. مادری که تار مویی از او بپای من سیاه نماند.

و

اساتید گروه فیزیک اتمی دانشگاه صنعتی شاهرود که سپیدی را بر تخته سیاه زندگیم نگاشتند.

شكرانه

"سپاس خدایی را که اول است بدون آنکه پیش از او اولی باشد، و آخر است بدون آنکه پس از او آخری باشد. خدایی که دیدههای بینندگان از دیدنش فرومانده، و اندیشههای توصیف کنندگان از وصفش عاجز شدهاند. آفریدگان را به قدرت خود پدید آورده و ایشان را بر وفق خواست خود اختراع فرموده است. سپس در طریق اراده خود روان ساخته و در پی محبت خود برانگیخته است. در حالی که از حدی که برایشان تعیین نموده قدمی پیش و پس نتوانند نهاد." سپاس می گویم خدا را برای نعمت وجود مادری دلسوز و فداکار که برای بنده در اوج زنانگی، مردانه، زمینهی زیستن را فراهم کردند.

تشکر فراروان از اساتید با کمالات و شایسته؛ جناب آقای دکتر مهدی مومنی و جناب آقای دکتر سید ایمان حسینی که در کمال سعهی صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این پایان نامه را بر عهده گرفتند.

صمیمانه از زحمت و راهنماییهای دلسوزانه و از سر اخلاص، سرکار خانم مهندس زهرا خدابخشی سپاسگزارم. و در نهایت از اساتید فرزانه و بااخلاق، سرکار خانم دکتر سمیه مهرابیان و جناب آقای دکتر محمدامین بصام که همواره با مهربانی و از روی اخلاص بنده را یاری نمودند و بعنوان الگویی، برای بنده چگونه بودن، زندگی و انسان بودن را معنا کردند،کمال تشکر را دارم.

تعهدنامه

اینجانب فرشته فلاحی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته فیزیک اتمی(مولکولی) دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایاننامه مطالعهی پارامترهای پلاسما همچون چگالی، دمای الکترونی و پتانسیل پلاسما در تخلیهی الکتریکی تحت راهنمائی دکتر مومنی و دکتر حسینی متعهد می شوم.

- تحقيقات در اين پايان نامه توسط اينجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
 - در استفاده ار نتایج پژوهشهای محققان دیگر مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایاننامه 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 میباشد 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 پایاننامه تاثیرگذار بودهاند 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 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.

تاريخ

امضاء دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامههای رایانهای، نرمافزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

بطور کلی پلاسماهای غیرحرارتی تخلیهی الکتریکی نورانی جریان مستقیم، در محفظهی تخلیهی شامل الکترود تولید میشود. بیش از یک قرن است که تخلیهی الکتریکی نورانی در شمار تعداد زیادی از رشتههای علمی مورد استفاده قرار می گیرد. منبع طیفسنجی در شیمی آنالیزی، تنها یکی از کاربرد آنها می باشد. آنها در حوزههای بسیار متنوعی همانند صنعت میکروالکترونیکها و در تکنولوژی مواد و همچنین بعنوان لیزر، منابع متعدد روشنایی و صفحات نمایشگر مورد استفاده قرار می گیرند. تخلیه به نواحی مختلفی بین کاتد و آند تقسیم میشود. رویداد و موقعیت مکانی این نواحی به پارامترهای تخلیه از قبیل فشار، ولتاژ، جریان، نوع گاز و فاصلهی بین کاتد و آند بستگی دارد. یکی از این نواحی ستون مثبت است. ستون مثبت، ناحیهی شبه خنثی میباشد که ایروینگ لانگمویر أن را پلاسما معرفی کرد. پارامترهای متنوعی در بهینه سازی دستگاه تخلیهی الکتریکی نورانی جریان مستقیم تاثیر دارند. چگالی الکترونی و دمای الکترونی دو پارامتر بسیار اساسی در فیزیک تخلیه میباشند که نقش بسیار مهمی در فهم فیزیک تخلیه و بهینه سازی عملکرد پلاسماها ایفا میکنند. بهمنظور اندازه گیری دمای الکترون و چگالی الکترون، روشهای متنوعی از قبیل پروب لانگمور، تداخلسنج مایکروویو، روش پراکندگی تامسون و طیفسنجی نور نشری وجود دارد. در بین این روشها، محبوبترین روش بدلیل سادگی و عدم ایجاد اختلال در پلاسما طیفسنجی نور نشری میباشد. در این پایان نامه، طیف نشری، دمای الکترون و چگالی الکترون ناحیهی ستون مثبت تخلیهی الکتریکی نورانی جریان مستقیم در جریانها و ولتاژهای متنوع اندازه گیری می شود.

كلماتكليدى: تخليهى الكتريكى نورانى جريان مستقيم، ستون مثبت، دماى الكترونى، چگالى الكترونى،طيفسنجىنورنشرى

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

مطالعهی تاثیر فشار و جریان بر افروختگی منفی و ستون مثبت در تخلیهی الکتریکی نورانی جریان مستقیم، کنفرانس مهندسی فیزیک و پلاسما. اردیبهشت ماه ۱۳۹۵، یزد - ایران

اثر جریان تخلیه بر مقدار متوسط سرعت گرمایی الکترون و طول دبای در پلاسمای تخلیهی الکتریکی نورانی جریان مستقیم. کنفرانس فیزیک ایران. شهریور ۱۳۹۵، شیراز – ایران

فهرست مطالب

فصلاول: تولیدپلاسما و آشنایی مقدماتی با تخلیهی الکتریکی نورانی جریانمستقیم
۱–۱ مقدمه
۲-۱ معرفی پلاسما و ویژگیهای آن۳
۵۵۰ شیمی پلاسما و منشأ گونهها۵۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰
۶-1 توليد پلاسما۶
۱-۴-۱ تخلیهی سد دیالکتریک (DBD)
۲-۴-۱ تخلیههای الکتریکی dc
۱۵۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰
۱-۴-۳پلاسماهای تولید شدهی فرکانس رادیویی۱۷
۱–۴–۴–۱ پلاسمای جفت شدهی خازنی
۱۸۲-۳-۴-۱ پلاسمای جفت شدهی القایی
۱۹-۲-۴-۱ پلاسما مايکروويو
۵–۱ طبقهبندی پلاسما.
۱-۶ کاربردهایی از تخلیهی الکتریکی نورانی
۱-۶-۱ شیمی آنالیزی
۱–۶–۲ فناوری مواد و صنعت میکرو الکترونیک
۲۴۲-۶-۱-۲-۶
۱-۶-۲-۲رسوبگیری فیلم نازک
۲۵۲۵ لیزرها
۱–۶–۴ لامپها.
۵-۶-۱ نمایشگرها
صلدوم: ماهیت تخلیهی الکتریکی نورانیDC و معرفی روش OES برای اندازه گیری دما و چگالی الکترون۲۹
۲-۱ مقدمه
۲-۲ توصيفي از تخليهي الكتريكي نوراني۳۱

۲-۳ هندسهی تخلیهی الکتریکی نورانی۳۲
۴-۲ فرایندهای اتفاقی در تخلیهی الکتریکی نورانی dc آرگون۴۰
۲-۴-۲ فرایندهای برخوردی در پلاسما۳۵
۲-۴-۲ برخوردهای الاستیک
۲-۴-۲ یونیزاسیون و برانگیختگی اتمهای آرگون۳۵
۲-۴-۲-۱-۲ برانگیختگی و یونیزاسیون ضربهای الکترون۳۵
۲-۴-۲-۲-۲ یونیزاسیون و برانگیختگی ضربهای اتمآرگون و یون سیع آرگون
۲-۴-۲-۲-۳ برخورد اتمهای شبه پایدار آرگون
۲-۴-۲-۱-۴ انتقال بار متقارن۳۷
۲-۴-۲ یونیزاسیون و برانگیختگی اتمهای (آنالیت) کندوپاش شده
۲-۴-۲-۱-۳-۱ یونیزاسیون پنینگ
۲-۴-۲-۲ انتقال بار نامتقارن۳۷
۲-۴-۱-۴ بازترکیبی الکترون - یون مثبت
۲-۴-۱-۴-۱ بازترکیبی سه جرمی۳۸
۲-۴-۱-۴-۲ بازترکیبی تابشی
۲-۴-۲-۴-۲ بازترکیبی تجزیهای
۲-۴-۲-۴-۴ باز ترکیبی دومرحلهای
۲-۴-۲ برانگیختگی وارونه (آسایش)
۲-۴-۲ فرایندهای اتفاقی در دیواره
۲-۴-۲ نشر الکترونهای ثانویه

۴۰	۲-۴-۲ کندوپاش
۴۱	۲-۵ نواحی موجود در تخلیهی الکتریکی نورانی
۴۱	۲-۵-۱ ماهیت تخلیهی الکتریکی نورانی
۴۶	۲-۵-۲ تاثیر پارامترهای تخلیه روی نواحی مختلف
۴۷	۲-۶ دو پارامتر اساسی در تخلیهی الکتریکی نورانی
۴۸	۲-۲ روشهای تشخیصی پلاسما
۴۹	۲-۷-۲ طيفسنجي پلاسما
۵۰	۲-۷-۲ تابش در محدوهی طیفی مرئی
۵۰	۲-۷-۳ نشر و جذب
۵۲	۲–۷–۴ مدلهای جمعیتی
۵۲	۲-۷-۴ فرایندهای پرجمعیت کردن و کم جمعیت کردن
۵۳	۲-۲-۴-۱ فرایندهای پرجمعیت کردن و کم جمعیت کردن
۵۳	۲-۷-۴ فرایندهای پرجمعیت کردن و کم جمعیت کردن ۲-۸ اندازه گیری دما و چگالی الکترون توسط طیفسنجی نور نشری (OES) فصلسوم: چیدمان و نحوهی انجام آزمایش
۵۲ ۵۳ ۵۷	۲-۷-۴ فرایندهای پرجمعیت کردن و کم جمعیت کردن
۵۲ ۵۳ ۵۷ ۵۹	۲-۷-۴-۱ فرایندهای پرجمعیت کردن و کم جمعیت کردن ۲-۸ اندازه گیری دما و چگالی الکترون توسط طیفسنجی نور نشری (OES) فصل سوم: چیدمان و نحوهی انجام آزمایش ۳-۱ مقدمه
۵۲ ۵۳ ۵۷ ۵۹ ۶۰	۲-۷-۴-۱ فرایندهای پرجمعیت کردن و کم جمعیت کردن ۲-۸ اندازه گیری دما و چگالی الکترون توسط طیفسنجی نور نشری (OES) فصل سوم: چیدمان و نحوهی انجام آزمایش ۳-۱ مقدمه ۳-۳ سیستم خلاً و فشار سنجی
۵۲ ۵۳ ۵۷ ۵۹ ۶۰ ۶۱	۲-۷-۴-۱ فرایندهای پرجمعیت کردن و کم جمعیت کردن ۲-۸ اندازه گیری دما و چگالی الکترون توسط طیفسنجی نور نشری (OES) فصل سوم: چیدمان و نحوهی انجام آزمایش ۳-۱ مقدمه ۳-۲ سیستم خلاً و فشار سنجی۳ ۳-۴ سیستم تزریق گاز
۵۲ ۵۳ ۵۷ ۵۹ ۶۰ ۶۱ ۶۱	۲-۷-۴-۱ فرایندهای پرجمعیت کردن و کم جمعیت کردن ۲-۸ اندازه گیری دما و چگالی الکترون توسط طیفسنجی نور نشری (OES) فصل سوم: چیدمان و نحوهی انجام آزمایش ۳-۱ مقدمه ۳-۲ سیستم خلأ و فشارسنجی۳ ۳-۵واریاک۳
۵۲ ۵۳ ۵۷ ۵۹ ۶۰ ۶۱ ۶۲ ۶۲	۲-۷-۴-۱ فرایندهای پرجمعیت کردن و کم جمعیت کردن ۲-۸ اندازه گیری دما و چگالی الکترون توسط طیفسنجی نور نشری (OES) فصل سوم: چیدمان و نحوهی انجام آزمایش ۳-۱ مقدمه ۳-۲ سیستم خلأ و فشارسنجی ۳-۵واریاک ۳-۵واریاک
۵۲ ۵۳ ۵۷ ۵۸ ۵۹ ۶۰ ۶۱ ۶۱ ۶۲ ۶۲	۲-۷-۴-۱ فرایندهای پرجمعیت کردن و کم جمعیت کردن ۲-۸ اندازه گیری دما و چگالی الکترون توسط طیفسنجی نور نشری (OES) فصل سوم: چیدمان و نحوهی انجام آزمایش ۳-۱ مقدمه ۳-۲ دستگاهی تخلیهی الکتریکی نورانی ۳-۳ سیستم خلأ و فشارسنجی ۳-۵واریاک ۳-۸ مولتی متر
۵۲ ۵۳ ۵۷ ۵۸ ۵۹ ۶۰ ۶۱ ۶۲ ۶۲ ۶۳	۲-۷-۴-۱ فرایندهای پرجمعیت کردن و کم جمعیت کردن ۲-۸ اندازه گیری دما و چگالی الکترون توسط طیفسنجی نور نشری (OES) فصل سوم: چیدمان و نحوهی انجام آزمایش ۳-۱ مقدمه ۳-۲ دستگاهی تخلیهی الکتریکی نورانی ۳-۳ سیستم تزریق گاز ۳-۸ مولیاک ۳-۷ مولتی متر ۳-۸ سیستم طیفسنجی
۵۲ ۵۳ ۵۷ ۵۸ ۵۹ ۶۱ ۶۱ ۶۲ ۶۲ ۶۲ ۶۳ ۶۳ ۶۳	۲-۷-۴-۱ فرایندهای پرجمعیت کردن و کم جمعیت کردن ۲-۸ اندازه گیری دما و چگالی الکترون توسط طیفسنجی نور نشری (OES) فصل سوم: چیدمان و نحوهی انجام آزمایش ۳-۱ مقدمه ۳-۲ میستم خلأ و فشارسنجی ۳-۶ سیستم تزریق گاز ۳-۸ مولتی متر ۳-۸ سیستم طیفسنجی
۵۲ ۵۳ ۵۷ ۵۸ ۵۹ ۶۹ ۶۱ ۶۱ ۶۲ ۶۲ ۶۲ ۶۳ ۶۳ ۶۸	۲-۷-۴-۱ فرایندهای پرجمعیت کردن و کم جمعیت کردن ۲-۸ اندازه گیری دما و چگالی الکترون توسط طیفسنجی نور نشری (OES) فصل سوم: چیدمان و نحوهی انجام آزمایش ۳-۱ مقدمه ۳-۲ دستگاهی تخلیهی الکتریکی نورانی ۳-۳ سیستم خلأ و فشارسنجی. ۳-۳ میستم تزریق گاز ۳-۶ منبع تغذیه ۳-۸ مواریاک ۳-۸-۳ شرایط کلی
۵۲ ۵۳ ۵۷ ۵۸ ۹۹ ۶۰ ۶۱ ۶۲	۲-۲-۴-۲ فرایندهای پرجمعیت کردن و کم جمعیت کردن ۲-۸ اندازه گیری دما و چگالی الکترون توسط طیفسنجی نور نشری (OES) فصل سوم: چیدمان و نحوهی انجام آزمایش ۳-۱ مقدمه ۳-۲ دستگاهی تخلیهی الکتریکی نورانی ۳-۳ سیستم خلأ و فشارسنجی ۳-۹ سیستم تزریق گاز ۳-۸ مولتی متر ۳-۸ سیستم طیفسنجی مورد استفاده در آزمایشگاه شاهرود

٧۴	۳-۹ مفسر
٧۴	۳-۱۰ نحوهی انجامآزمایش
γγ	فصل چهارم:اندازه گیری و نتایج
Υ٨	۲-۴ مقدمه
Υλ	۴–۲ آزمایشات اولیه جهت بررسی عملکرد دستگاه
۸۱	۴-۳ تغییرات شدت خطوط طیفی برحسب تغییرات جریان
۸۱	۴-۴تغییرات شدت خطوط طیفی برحسب تغییرات ولتاژ
λ۲	۴-۵ نسبت شدت دو خط طیفی برحسب تغییرات جریان
۸۳	۴-۶ تغییرات نسبت شدت دو خط طیفی برحسب تغییرات ولتاژ.
مريان	۴-۷ اندازه گیری دمای الکترون و تغییرات آن برحسب تغییرات ج
λ۴	۴–۷-۱-۱بوسیلهی نسبت شدت خطوط طیفی ۶۹۶/۵۴و۷۰۶/۷۹
٨۵	۴-۷-۲ بوسیلهی نسبت شدت خطوططیفی۷۳۸/۳۸و۷۵۰/۴۲.
ولتاژ	۴-۸ اندازه گیری دمای الکترونی و تغییرات آن برحسب تغییرات
٨۶	۴-۸-۱ بوسیلهی نسبت شدت خطوط طیفی ۶۹۶/۵۴و۷۰۶/۷۰
٨۶	۴-۸-۲ بوسیلهی نسبت شدت خطوط طیفی۷۳۸/۳۸و۷۵۰/۴۲
ریان	۴-۹ اندازه گیری چگالی الکترون وتغییرات آن برحسب تغییراتج
۸۷	۴-۹-۱ بوسیلهی نسبت شدت خطوط طیفی ۶۹۶/۵۴و۷۰۶/۷۰
٨٨	۴-۹-۲ بوسیلهی نسبت شدت خطوط طیفی۷۳۸/۳۸و۷۵۰/۴۲
ی ولتاژ	۴-۱۰ اندازه گیری چگالی الکترون و تغییرات آن برحسب تغییرات
λ٩۲	۴–۱۰–۱ بوسیلهی نسبت شدت خطوط طیفی ۶۹۶/۵۴و۶/۷۹۰
۹۰۲	۴-۱۰-۲ بوسیلهی نسبت شدت خطوط طیفی۷۳۸/۳۸و۵۰/۴۲
۹۱	۴-۱۱ نتیجه گیری
۹۳	منابع

فهرست شكال

کل(۱–۱) حالات مختلف ماده۴	شآ
کل(۱–۲) اجزای پلاسما	شآ
کل(۱–۳) اصولی از تولید پلاسما۷	شآ
کل(۱-۴) تولید جفتهای الکترون – یون بوسیلهی الکترون ساطع شده از کاتد	شآ
کل(۱-۵) ولتاژ شکست برای چند نمونه گاز برحسب تغییرات حاصلضرب فشار در فاصلهی الکترودها	شآ
کل(۱–۶) تخلیه سد دیالکتریک با کاتدهای موازی	شآ
کل(۱-۲) تیوب تخلیهی الکتریکی dc فشار پایین	شآ
کل(۸-۱) تقسیمبندی تخلیهی الکتریکی نورانی dc فشار پایین برحسب مشخصهی ولتاژ و	شآ
_یان	جر
ول(۱-۱) محدودهی مقداری چند پارامتر در تخلیهی الکتریکی نورانی dc	جد
کل(۱-۹) نواحی تاریک روشن در تخلیهی الکتریکی نورانی dcdc.	شآ
کل(۱۰-۱) راکتور پلاسمای جفت شدهی خازنی rfrfی	شآ
کل(۱۱–۱۱) راکتور پلاسمای جفت شدهی القایی rf	شآ
کل(۱-۱۲) راکتور پلاسمای تولید شده ی مایکروویو	شآ
ول(۱-۲) طبقهبندی حرارتی پلاسما	جد
کل(۱-۱۳) طبقهبندی پلاسما (برحسب دما و چگالی الکترون)	شآ
کل(۱۴–۱۴) حک کردن سطح سیلیکون بوسیلهی پلاسمایCF4	شآ
کل(۱–۱۵) دیاگرامی از نمونهای از رسوبگیری پلاسمایی	شآ
کل(۱–۱۶) نمونه ای از لیزر CO ₂	شک

۲۷	شکل(۱–۱۷) نمونهای از لامپ نئون
۲۷	شکل(۱–۱۸) دیاگرامی از نمایشگر پلاسما
، لامپ کاتد سس	شکل(۲-۱) هندسههای مختلف تخلیهی الکتریکی a) کاتد هم محور b) دیود سطحی c) نوع گریم d) سنا
٢٢	توخالى
۳۴	شکل(۲-۲) تعدادی از فرایندها و گونههای فعال موجو در تخلیهی الکتریکی نورانی dc آرگون
۴۲	شکل(۲-۳) نواحی تخلیهی الکتریکی نورانی dcdc
۴۵	شکل(۲-۴) نمایشی از چند ستون مثبت تحت شرایط آزمایشگاهی متفاوت
۵۱	شکل(۲–۵) خط تابش
۵۶	جدول(۲-۱) مقادیر پارامترهای طیفی از چند خط طیفی آرگون
۵۸	شکل(۳-۱) دیاگرامی از چیدمان آزمایشگاهی دستگاه تخلیهی الکتریکی نورانی dc دانشگاه شاهرود
۵۹	شکل(۳-۲) الکترود موجود در دستگاه تخلیهی الکتریکی نورانی dc دانشگاه شاهرود
۵۹	شکل(۳-۳) تیوب پیرکس دستگاه تخلیهی الکتریکی نورانی dc دانشگاه شاهرود
۶۰	شکل(۳-۴) پمپ روتاری
۶۰	شكل(۳-۵) فشارسنج پيراني
۶۱	شکل(۳-۶) کپسول گاز آرگون
۶۲	شكل(۳-۷) وارياک
۶۲	شکل(۳–۸) منبع تغذیه ولتاژ بالای DC
۶۳	شکل(۳-۹) مولتی متر دیجیتالDEC330FC
۶۴	شکل(۳-۱۰) طرح کلی از یک طیف سنج
<i>99</i>	شکل(۳–۱۱) مشخصاتی از توری طرح ریزی شدهی مکانیکی
99	شکل(۳–۱۲) نمونهای از توری Echelle
۶۸	شکل(۳–۱۳) تک فام ساز سزرنی- ترنر
۶٩	شكل(۳–۱۴) طيفسنج فيبر نوري AvaSpec-ULS3648 StarLine
٧٠	جدول(۳-۱) تعدادی از مشخصات فنی طیفسنجهای فیبر نوری AvaSpec-ULS3648 StarLine
٧٠	شکل(۳–۱۵) اجزای تشکیل دهندهی طیفسنج AvaSpec-ULS3648 StarLine
۷۳	شکل(۳–۱۶) رابط SMA فیبر نوری
۷۳	شکل(۳–۱۷) فیبر نوری آزمایشگاه شاهرود

۷۳.	شکل(۳–۱۸) لنز موازی کننده COL-UV/VIS
۷۴	شکل(۳–۱۹) فضای برنامه نرم افزاری مربوط به دستگاه طیفسنج
۷۵	جدول(۳-۲) شرايط انجام آزمايشها
Υ٩	شکل(۴-۱) تیوب تخلیهی الکتریکی نورانی dc در فشار۲torr/ و جریان ۱/۵mA
Υ٩	شکل(۴-۲) طی نشری ستو مثبت در فشار ۲torr/۰جریان۱/۵mA
٨٠	شکل(۴-۳) اطلاعاتی از ترازهای انرژی خطوط طیف آرگون
۸۱.	شکل(۴-۴) تغییرات شدت خطوط طیفی برحسب تغییرات جریان در فشار ۰/۲
۸۲	شكل(۴–۵) تغییرات شدت خطوط طیفی برحسب تغییرات ولتاژ در فشار ۴torr/۰
٨٢	شکل(۴-۴) نمودار تغییرات نسبت شدت دو خط طیفی برحسب تغییرات جریان در فشار ۲torr/۰
۸۳	شکل(۴–۷) نمودار تغییرات نسبت شدت دو خط طیفی برحسب تغییرات ولتا در فشار ۴torr/۰
طول	شکل(۴–۸) نمودار تغییرات دمای الکترون برحسب تغییرات جریان با استفاده از نسبت شدت دو خط طیفی با
٨۴	موجهای ۶۹۶/۵۴و۷۰۶/۷۹در فشار ۰/۲torr
طول	شکل(۴–۹) نمودار تغییرات دمای الکترون برحسب تغییرات جریان با استفاده از نسبت شدت دو خط طیفی با
٨۵	موجهای ۷۵۰/۴۲و۷۹۲/۲۲ در فشار ۲torr۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰
طول	شکل(۴–۱۰) نمودار تغییرات دمای الکترونی برحسب تغییرات ولتاژ با استفاده از نسبت شدت دو خط طیفی با
٨۶	موجهای ۶۹۶/۵۴و۷۰۶/۷۹ در فشار ۴torr/۰
طول	شکل(۴–۱۱) نمودار تغییرات دمای الکترونی برحسب تغییرات ولتاژ با استفاده از نسبت شدت دو خط طیفی با
۸۷	موجهای ۷۵۰/۴۲و۷۹۲/۴۲ در فشار ثابت ۴torr/۰
طول	شکل(۴–۱۲) نمودار تغییرات چگالی الکترون برحسب تغییرات جریان با استفاده از نسبت شدت دو خط طیفی با
٨٨	موجهای ۶۹۶/۵۴و۷۰۶/۷۹در فشار ۰/۲torr
طول	شکل(۴–۱۳) نمودار تغییرات چگالی الکترون برحسب تغییرات جریان با استفاده از نسبت شدت دو خط طیفی با
٨٨	موج های ۷۳۸/۳۸و۷۵۰/۴۲ در فشار ۲torr۰۰
طول	شکل(۴–۱۴) نمودار تغییرات چگالی الکترون برحسب تغییرات ولتاژ با استفاده از نسبت شدت دو خط طیفی با
٨٩	موجهای ۶۹۶/۵۴و۷۰۶/۷۹۹در فشار ۰/۴torrمی
طول	شکل(۴–۱۵) نمودار تغییرات چگالی الکترونی برحسب تغییرات ولتاژ با استفاده از نسبت شدت دو خط طیفی با
٩٠	موجهای ۷۳۸/۳۸و۷۵۰/۴۲در فشار ۲۰/۴torr،

فصل اول

تولید پلاسما و آشنایی مقدماتی با

تخليهي الكتريكي نوراني جريان مستقيم

۱-فصل اول: تولید پلاسما و آشنایی مقدماتی با تخلیهی الکتریکی نورانی جریان مستقیم

۱-۱ مقدمه

تخلیهی الکتریکی نورانی پلاسمایی است که از طریق عبور جریان الکتریکی از میان یک گاز در فشار پایین ر از فشار اتمسفری بوجود می آید. این نوع پلاسما با بکارگیری ولتاژ، میان دو الکترود فلزی در یک تیوب شیشهای، ایجاد می شود. هنگامی که ولتاژ فراتر از ولتاژ شکست (کمترین ولتاژی که موجب می شود بخشی از یک ماده از نظر الکتریکی رسانا شود) باشد، گاز داخل تیوب یونیزه و پلاسما تشکیل می شود. پلاسماهای تخلیه الکتریکی بطور گستردهای در منابع نوری همچون لامپ های مهتابی، لامپهای نئون و تلویزیونهای صفحه پلاسمایی استفاده می شوند. آنالیز نور تولید شده به روش طیف سنجی اطلاعاتی را از برهم کنش های اتمی به همراه دارد. پلاسمای حاصله در فیزیک

[\] Sputtering

میشود. دمای الکترونی و چگالی الکترونی دو پارامتر اصلی در تخلیههای الکتریکی گازی بشمار می-روند[۱]. این دو پارامتر نقش بسیار حیاتی در فهم فیزیک تخلیه و بهینه سازی عملکرد پلاسما ایفا میکنند[۳،۲]. روشهای مختلفی از جمله استفاده از پروب لانگمور^۱، اینترفرومتر^۲، روش پراکندگی تامسون^۳ و روش طیفسنجی تابش نشری، برای اندازهگیری این پارامترها مورد استفاده قرار می-گیرند[۳]. در میان این روشها، طیفسنجی تابش نشری(OES)^{*} [۴] بدلیل قیمت ارزان، سادگی و عدم ایجاد اختلال در پلاسما بیشتر بکار گرفته میشود[۵]. در فصل اول این پایان نامه به معرفی پلاسما و روشهای تولید آن پرداخته شده است. در میان این روشها، تخلیهی الکتریکی نورانی و کاربردهای آن مورد توجه خاص قرار گرفته است. در میان این روشها، تخلیهی الکتریکی نورانی و مستقیم (OD)^۵ با نگاهی دقیقتر بیان شده است. در فصل دوم توصیف تخلیهی الکتریکی نورانی و پارامترهای دما و چگالی اشاره شده است. در فصل دوم توصیف تخلیهی الکتریکی نورانی و ایارامترهای دما و چگالی اشاره شده است. در میان این روشها، تخلیهی الکتریکی نورانی و بریان مستقیم (OD)^۵ با نگاهی دقیقتر بیان شده است. در فصل دوم توصیف تخلیه الکتریکی نورانی و بریان نارامترهای دما و چگالی اشاره شده است. دو ضل دوم توصیف آزمایشگاهی دستگاه تخلیهی نامه به ارائهی اندازه گیریهای اندازه گیری در انجام آزمایشها است. در فصل چهارم این پایان نامه به ارائهی اندازه گیریهایی در دستگاه تخلیهی الکتریکی نورانی عالی می باین نامه به ارائهی اندازه گیریهایی در دستگاه تخلیهی الکتریکی نورانی می شاهرود، نتایج حاصله و پیشنهاداتی برای کارهای آینده پرداخته شده است.

۱-۲ معرفی پلاسما و ویژگیهای آن

واژهی پلاسما برای اولین بار توسط ایروینگ لانگمویر^۶ (۱۹۵۷–۱۸۸۱) به منظور توضیح رفتار گازها، در یک تخلیهی الکتریکی، مورد استفاده قرار گرفته است[۶]. بطور کلی همانطور که در شکل

[\] Langmuir probe

^r Interferometer

^r Thomson scattering

^{*} Optical Emission Spectroscopy

^a Dirrect Current

¹ Irving Langmuir

(۱-۱) نشان داده شده است، پلاسما را بعنوان حالت چهارم ماده می شناسند. این حالت از ماده بیشتر
 ۱۱ و ۹۹ درصد جهان پیرامون ما را تشکیل می دهد.



شكل (۱-۱) حالات مختلف ماده

همانطور که در شکل (۱–۲) نشان داده شده است، پلاسما شامل تعداد زیادی گونههای مختلف در حالت پایه یا حالت برانگیخته میباشد. این گونهها در گسترهی وسیعی از دما و فشار وجود دارند. همچنین این گونهها در فشار پایین و یا فشار اتمسفری توسط انرژی کوپل شده دریک محیط گازی از طریق روشهای متنوعی از قبیل مکانیکی، شیمیایی، حرارتی، هستهای، بکارگیری ولتاژ و یا اعمال میدان مغناطیسی بوجود میایند. بنابراین پلاسما یک محیط گازی فعال شیمیایی و پرانرژی است. همچنین پلاسما یک منبع متفاوت انرژی است که معمول^۲در حالتهای دیگر ماده قابل مشاهده نیست.



شکل (۱-۲) اجزای پلاسما[۷]

مولکولهای گازی تحت تاثیر انرژی و دما به مولکولهای برانگیخته، یونها، الکترونهای آزاد و مولكول هاى متلاشى با انرژى بالا تبديل مىشوند. بنابراين پلاسما شامل اتمها، ذرات باردار (يون ها و الكترونهاي آزاد)، راديكالهاي آزاد، شبه پايدارها و فوتونها مي باشد. از نقطه نظر كاربردي، پلاسما بطور فیزیکی و شیمیایی یک محیط متشکل از گازهای فعال است که می تواند بطور موثر برای کاربردهای زیادی مورد استفاده قرار گیرد. پلاسما شبه خنثی است یعنی به آن اندازه خنثی است که بتوان در نظر گرفت و نه آن قدر خنثی که بتوان نیروهای الکترومغناطیسی را حذف کرد. $n pprox n_e pprox n_i$ nچگالی پلاسما، ne چگالی الکترونها و n_i چگالی یونها میباشد[۸]. یکی از مشخصههای پلاسما، رفتار جمعی آن است. رفتار جمعی به معنای حرکتهایی است که نه تنها به شرایط موضعی پلاسما بلکه به حالت آن در نواحی دور بستگی دارند. پلاسما بعلت رفتار جمعی گرایشی به پیروی از تاثیرات خارجی ندارد و اغلب طوری رفتار می کند که گویی اختیارش با خودش است. پلاسما دارای ذرات باردار است که با حرکت خود تمرکزهای موضعی با بارهای مثبت یا منفی ایجاد میکنند که موجب پیدایش میدان-های الکتریکی میشوند. با حرکت بارها، جریان و در نتیجه میدان مغناطیسی بوجود میآید. این میدانها برحرکت ذرات باردار دورتر اثر می گذارند. اجزاء پلاسما حتی در فواصل دور نیز، نیرویی بر یکدیگر وارد میکنند. همین نیروی کولنی بلند برد است که برای پلاسما مجموعهی بزرگی از حرکتهای ممکن را فراهم می کند و حوزهی مطالعهی فیزیک پلاسما را غنی می سازد[۸].

۱-۳ شیمی پلاسما و منشأ گونهها

معمولاً شیمی رقم خورده در پلاسما، بسیار پیچیده است و شامل واکنشهای مقدماتی بسیار زیادی میباشد[۹]. واکنشهای اصلی که در حجم پلاسما اتفاق میافتند به دو گروه واکنشهای همگن و واکنشهای ناهمگن تقسیم میشوند. واکنشهای همگن بین گونهها در فاز گازی، بعنوان یک نتیجه از برخوردهای غیر الاستیک بین الکترونها با گونههای سنگین و یا برخوردهایی بین گونههای سنگین، اتفاق میافتند. در برخوردهای غیر الاستیک، هنگامی که انرژی الکترونیکی به اندازه کافی بالا باشد، برخوردها ساختار الکترونیکی گونههای خنثی را تغییر میدهند. اگر برخوردها به اندازهی کافی پرانرژی باشند، این امر منجر به ایجاد گونههای برانگیخته و یا یونها میشود. برانگیختگی مولکولها و اتمها، یونیزاسیون، تفکیک، یونیزاسیون پنینگ^۱، نمونههایی از واکنشهای همگن میباشند. واکنشهای ناهمگن بین گونههای پلاسما و سطح جامد غوطهور یا در ارتباط با پلاسما اتفاق میافتند. جذب سطحی، حک، رسوبگیری نیز بعنوان نمونههایی از واکنشهای ناهمگن مطرح میشوند. در فصل دوم، به تشریح تعدادی از این واکنشهای مرتبط با پلاسمای تخلیهی الکتریکی نورانی گاز آرگون میپردازیم.

1-۴ توليد پلاسما

پلاسما بوسیلهی تامین انرژی، برای یک گاز خنثی بوجود میاید [۱۰]. این انرژی منجر به تشکیل حاملهای بار میشود. اصولی از تولید پلاسما در شکل (۱–۳) آورده شده است. هنگامی که الکترونها و فوتونها با انرژی کافی با اتمها و مولکولهای خنثی موجود در گاز برخورد میکنند، الکترونها و یونها در فاز گاز تولید میشوند. روشهای مختلفی برای تأمین انرژی لازم برای یک گاز خنثی به منظور تشکیل پلاسما وجود دارد. بطور کلی پلاسما در آزمایشگاه، از طریق بالابردن مقدار انرژی موجود در ماده از طریق مکانیکی، حرارتی، شیمیایی، تابشی، هستهای و الکتریکی تشکیل میشود. همچنین تشکیل پلاسما بوسیلهی ترکیبی از این روشها همانند ترکیبی از انرژیهای حرارتی و مکانیکی (بعنوان مثال انفجار) ممکن است. متداول ترین روش به منظور تولید پلاسما استفاده از میدانهای الکتریکی و میدانهای الکترومغناطیسی میباشد [۱۱]. در ادامه به شرح مختصری از چند نمونه پلاسمای ایجاد شده توسط این روشهای متداول میپردازیم. قابل ذکر است که در این مجموعه، تمرکز اصلی به پلاسماهای

^v Penning ionization



شکل (۱-۳) اصولی از تولید پلاسما[۱۰]

در ابتدا برای سهولت آشنایی با روشهای متداول تولید پلاسما، آشنایی با مفهوم شکست مورد نیاز است. هنگامی که میدان الکتریکی به الکترودهای نصب شده در دو انتهای یک تیوب اعمال میشود، الکترون اولیهی رهاشده از کاتد، در این میدان شتاب می گیرد. این الکترون میتواند بعد از طی یک مسافت آزاد میانگین برای یونیزاسیون، نام اتمهای گاز را یونیزه کند. در این فرایند یونیزاسیونی، یک جفت الکترون – یون خلق میشود. حال دو الکترون شتاب گرفته، در طی فرایند بعدی چهار الکترون را خلق می کنند و با ادامهی این روند، بهمنی از الکترونها تولید میشود. شکل (۱–۴) گوشهای از این روند را به تصویر کشیده است. یونهایی که به سمت کاتد شتاب می گیرند، در آنجا شانس قطعی را برای آزادسازی یک الکترون جدید دارند. این الکترون آزاده شده، جایگزین الکترون اولیه شده و بهمن الکترونی بعدی را نیز بوجود می آورد.



شکل (۱-۴) تولید جفتهای الکترون - یون بوسیلهی الکترون ساطع شده از کاتد[۱۲]

در یک مفهوم آماری، تکثیر الکترون بوسیلهی dne الکترونهای جدید تولید شده در یک فاصلهی dz بصورت معادلهی زیر مطرح می شود.

$$dn_e = \alpha \times n_e dz \tag{1-1}$$

که با انتگرال گیری از این معادله، رشد نمایی ne با معادله یزیر بیان می شود.

$$n_e(z) = n_e(0)e^{\alpha z} \tag{1-T}$$

در این معادله $\alpha = \lambda_i^{-1}$ ضریب تکثیر گاز است که توسط تاونسند مطرح شده است. در الکترود $\alpha = \lambda_i^{-1}$ مثبت، شار الکترونی که مسافتی در z=d را ترک می کند بصورت معادله زیر بیان می شود.

$$\eta_e(d) = n_e(d)\mu_e E \tag{1-7}$$

به منظور برابر بودن مقدار یونها و الکترونهای تولید شده در فرایند بهمنی، شار یونی باید بصورت معادلهی (۴–۱) ارائه شود.

$$\eta_{(i)}(0) = -\eta_e(d) + \eta_e(0) \tag{1-4}$$

با استفاده از معادلات مذکور معادلهی زیر بدست میآید.

[\] Townsend

$$\eta_i(0) = -\eta_e(0) \left(e^{ad} - 1 \right) \tag{1-\Delta}$$

احتمال رها شدن الکترون از کاتد بوسیلهی ضربهی یون توسط ضریب γ توصیف میشود که ضریب نشر ثانویه نامیده شده و بصورت نسبت شار الکترونهای ساطع شده از کاتد به شار یونهای وارد شده به آن تعریف میشود[$|\frac{\eta_e(0)}{\eta_i(0)}| = \gamma$]. شکست هنگامی اتفاق خواهد افتاد که فرایند بهمنی، قادر به تقویت خود باشد. این توصیف بوسیلهی معادلهی تعادلی زیر مطرح میشود.

$$\gamma \exp(\alpha d) = \gamma + 1 \tag{1-8}$$

تاونسند از یک قاعدهی تجربی برای وابستگی ضریب α به میدان الکتریکی استفاده کرد. این وابستگی در معادله A و B برای هر گازی، وابستگی در معادله A و B برای هر گازی، متفاوت میباشند.

$$\frac{\alpha}{P} = A \exp(-\frac{B}{E/P}) \tag{1-Y}$$

اگر ولتاژ شکست بصورت معادلهی Ubd =d.Eb تعریف شود، با استفاده از معادلات مذکور، قانون پاشن ۱ با معادلهی (۸–۱) بدست میاید[۱۲].

$$U_{bd} = \frac{BPd}{\ln\left[\frac{APd}{\ln(1+1/\gamma)}\right]}$$
(1- λ)

¹ Paschen's law

ولتاژ شکست در فاصلهی ثابت بین الکترودها، با افزایش فشار سریعاً افزایش مییابد. برای مثال ولتاژ شکست برای آرگون در فشار ۷۶۰torr و با فاصلهی ۵mm ،برابر با ۲۵۰۰۷ تخمین زده شده است. شکل (۱–۵) منحنی تغییرات ولتاژ شکست را برحسب حاصلضرب فشار در فاصلهی الکترودها، برای چند گاز نشان میدهد.



شکل (۱-۵) ولتاژ شکست برای چند نمونه گاز برحسب تغییرات حاصل ضرب فشار در فاصله ی الکترودها[۱۳]

۱-۴-۱ تخلیهی سد دیالکتریک (DBD)

تخلیههای سد دیالکتریک با نامهای مختلفی، از جمله تخلیههای خاموش و تخلیههای جریان متناوب (AC)^۲ شناخته میشوند. معمولا^۲این نوع تخلیهها شامل دو الکترودی هستند که بوسیلهی یک عایق دیالکتریک از هم جدا میشوند. جریان بوسیلهی ماده دیالکتریک، بین الکترودها محدود میشود. یک ولتاژ در فرکانسی با محدودهی چند صد هرتز (Hz) تا چند کیلو هرتز (KHz) به الکترودها اعمال میشود[۱۴]. این نوع تخلیه در ولتاژهای متغیر (AC) عمل میکند و دیالکتریک نمیتواند، جریان DC را از خود عبور دهد. همچنین از دیالکتریک برای جلوگیری از پدیدهی جرقه زنی و توزیع میکرو

['] Dielectric Barrier Discharge

[°] Alternating Current

تخلیهها در کل صفحه الکترود، استفاده می شود [۱۵]. در فاصله ی بین دو الکترود و در یک ولتاژ بالای مناسب، به منظور یونیزه کردن گاز تزریق شده در بین دو الکترود، شکست اتفاق می افتد. شکل (۱-۶) یک (DBD) با دو الکترود موازی جدا شده بوسیله ی یک دی الکتریک را نشان می دهد.



شکل (۱-۶) تخلیهی سد دیالکتریک با کاتدهای موازی[۱۶]

dc تخلیههای الکتریکی

یک گاز در حالت طبیعی خود، تقریبا *"*بعنوان یک عایق کامل عمل می کند. با این حال، هنگامی که یک ولتاژ به اندازه کافی مناسب (ولتاژ شکست)، بین دو الکترود قرار گرفته شده در یک محیط گازی با فشار پایین اعمال می شود تجزیه ی الکتریکی گونه های گازی رخ می دهد. این شکست منجر به جذب گونه های باردار مثبت و منفی بوسیله ی پتانسیل اعمال شده، روی هر الکترود می شود به گونه ای که یون ها (کاتیون ها)، به سمت کاتد و الکترون ها (آنیون ها)، به سمت آند مهاجرت می کنند. در طول این مهاجرت ها، فرایندهای برخوردی اتفاق می افتد که در نتیجه جفت الکترون – یون بیشتری را تولید کرده و منجر به ایجاد برانگیختگی های الکترونیکی در گونه های اتمی و مولکولی محیط اطراف می شود. این روند اجازه عبور جریان از وسیله ی گازی را می دهد و در نتیجه آن تبدیل به رسانا می شود. این پدیده را تخلیه ی الکتریکی می نامند. در ساده ترین شکل، این نوع تخلیه شامل دو الکترود غوطه ور در تیوبی با فشار پایین (۱/۰ تا ۱۰ تور) و تحت اعمال ولتاژ بالای DC می باشد[۱۸،۱۷]. تیوب توسط گاز پر می شود. در این مجموعه گازهای نادر (۲۸ ها ۱۰ رود)، این مود استفاده قرار می گیرد. در میان این گازها از آرگون، بدلیل قیمت ارزان و ولتاژ یونیزاسیون کوچک آن، بیشتر استفاده میشود. همچنین این گاز نسبتا^۲ سنگین (در برابر هلیوم)، است[۱۹]. بسیاری از تحقیقات در مورد فیزیک تخلیهی الکتریکی روی تیوب تخلیهی الکتریکی فشار پایین کلاسیکی، شکل (۱-۷)، انجام گرفته شده است. نمونهی اولیه این نوع تیوبها، تابلوهای تبلیغاتی نئون و لامپ روشن فلورسنت بود. این تیوب شامل یک لولهی شیشهای تخلیه شده با دو الکترود در دو انتهای آن است که به یک منبع DC متصل هستند.



شکل (۱-۷) تیوب تخلیهی الکتریکی dc فشار پایین[۶]

در حالت کلی تخلیههای الکتریکی برحسب مشخصات ولتاژ – جریان تقسیم بندی می شوند [۲۰]. شکل (۱–۸) تقسیم بندی انواع بسیار متداولی از تخلیه های الکتریکی db فشار پایین را بعنوان تابعی از رفتارهای ولتاژی و جریانی آن ها نشان می دهد [۶]. شروع از ولتاژ بسیار کوچک در قسمت پایین، سمت چپ شکل است. ناحیهی بین A تا B روی منحنی رژیم "یونیز اسیون زمینه" نامیده می شود. در این رژیم افزایش ولتاژ، بخش بسیار اعظمی از یون های انفرادی و الکترون های ایجاد شده بوسیلهی اشعه های کیهانی و اشکال دیگری از تابش های یونیزه کننده زمینه را جاروب می کند. در رژیم "اشباع" بین نقاط B تا C ، همه یون ها و الکترون های تولید شده بوسیلهی تابش زمینه از حجم تخلیه حذف می شوند. و الکترون ها انرژی کافی را برای ایجاد یونیز اسیون جدید در اختیار نخواهند داشت. قبل از اینکه شکست اتفاق بیفتد در ناحیهی بین نقاط Cتا جریان درون تخلیه با افزایش ناچیز ولتاژ افزایش خواهد یافت. این نوع تخلیه، تخلیهی "تاونسند" نامیده می شود.



شکل(۱-۸) تقسیم بندی تخلیه یالکتریکی جریان مستقیم فشار پایین برحسب مشخصه ی ولتاژ و جریان [۶]

تخلیهی تاونسند با فشار عملیاتی پایین (کمتر از ۱m torr) و جریان پایین توصیف میشود. محدودهی فشاری پایین منجر به کم بودن میزان برخوردها بوده و در نتیجه نرخ تولید الکترون و یون در تخلیهی تاونسند بسیار پایین است. پایین بودن میزان گونههای باردار و همچنین غیرخود تقویت کننده بودن این رژیم منجر میشود که این نوع تخلیه در کاربردهای آنالیزی شیمی بسیار کم مورد استفاده قرار گیرد. نور ساطع شده از این تخلیه بدلیل پایین بودن میزان شار جریان در آن، بسیار کم است و به همین دلیل این نوع تخلیه را تخلیه یاریک نیز مینامند. در ناحیهی بین نقاط D تا E تخلیهی "کرونای تک قطبی" اتفاق خواهد افتاد. این تخلیهها، نتیجهای از تمرکز موضعی میدان الکتریکی روی نقاط یا لبههای تیز در سطح الکترودها میباشند. هنگامی که ولتاژ افزایش یافته و به ولتاژ شکست VB میرسد در نقطهی E پدیدهی شکست رخ میدهد. بطورکلی ناحیهی بین نقاط A تا E از مشخصات ولتاژ – جریان بعنوان "ناحیهی تاریک" شناخته میشود زیرا به غیر از تخلیهی کرونا و خود جرقهی شکست الکتریکی، تخلیه بصورت نامرئی برای چشم باقی می ماند [۶]. هنگامی که شکست الکتریکی در

نقطهی E اتفاق میافتد تخلیه انتقالی را به رژیم "تخلیهی نورانی" انجام میدهد. که در این رژیم بدلیل بالا بودن میزان جریان و برانگیختگی گاز خنثی زمینه، پلاسما با چشم قابل رویت است. محدودهی فشار عملیاتی مورد استفاده در تخلیههای الکتریکی نورانی ۱۰torr – ۰/۱ میباشد که این محدوده بستگی به نوع کاربرد تخلیه دارد. تخلیهی الکتریکی نورانی نیز خود به دو نوع مجزای تخلیهی الکتریکی نورانی عادی و تخلیهی الکتریکی نورانی غیرعادی تقسیم می شود. بلافاصله بعد از یک انتقال ناپیوسته از نقطه ی E به F، "تخلیهی الکتریکی نورانی عادی" اتفاق می افتد. این تخلیه در ناحیهی بین نقاط F تا G آورده شده است. درخشندگی تنها بخشی از کاتد را می پوشاند و جریان با وجود ثابت ماندن چگالی جريان افزايش مي يابد. پتانسيل نيز بدليل وابستگي با چگالي جريان (نه خود جريان)، ثابت باقي مي ماند. با افزایش جریان از نقطه F به G سطح پوششی کاتد بیشتر شده تا اینکه در نقطه ی G درخشندگی، تمام سطح كاتد را مي پوشاند و از اين نقطه به بعد بدليل افزايشي در چگالي جريان، پتانسيل نيز افزايش مىيابد. اين نوع تخليه بعنوان"تخليهي الكتريكي نوراني غيرعادي" شناخته مي شود. تخليهي الكتريكي نورانی غیرعادی اغلب در بسیاری از کاربردهای طیفسنجی آنالیزی مورد استفاده قرار می گیرد. این ناحیه بین نقاط G تا H قرار دارد. در نقطه H چگالی جریان بر روی کاتد به حدی زیاد می شود که کاتد گرم و برافروخته می شود. بنابراین یک انتقال ناپیوسته از رژیم تخلیهی نورانی به رژیم "تخلیهی جرقهای" راه اندازی می شود. این انتقال بصورت نقطه چین بین نقاط H و I نشان داده شده است. بعد از این انتقال، تخلیه در نقاط بسیاری در بین I تا K مستقر می شود. ولتاژ با افزایش جریان بین نقاطI تا J ، كاهش پيدا مىكند. بعد از اينكه جريان به مقدار بزرگى در نقطەى J مىرسد، ولتاژ به آرامى با افزایش جریان افزایش می یابد. ناحیه ی بین نقاط I و J بعنوان ناحیه ی "تخلیه ی جرقه ای غیر حرارتی" نامیده می شود. در این ناحیه، دمای یون، الکترون و گاز برابر نیست. بخش با شیب مثبت بین نقاط J تا K، ناحیهی" تخلیهی جرقهای حرارتی" نامیده می شود. در این ناحیه پلاسما نزدیک به تعادل ترمودینامیکی بوده و دمای همهی گونهها تقریباً برابر است. تخلیهی الکتریکی جرقهای بطور گسترده در طیفسنجیهای آنالیزی اتمی مورد استفاده قرار می گیرد. فشارعملیاتی این نوع تخلیهها معمولاً در محدودهی فشار اتمسفری میباشد. در این نوع تخلیه بمباران نمونهی کاتد توسط یونهای گاز تخلیه به اندازهای شدید است که تبخیر حرارتی سطح کاتد اتفاق میافتد. همانطور که قبلا نیز به آن اشاره شده است، در این پایان نامه تمرکز اصلی بر روی تخلیهی الکتریکی نورانی dc است. در جدول (۱-۱) محدودهی مقداری چند پارامتر تخلیه، برای هر دو رژیم تخلیهی الکتریکی نورانی عادی و غیرعادی آورده شده است[۶].

پارامتر	مقدارپايين	مقداربالا
فشارگازخنثی(Torr)	\ • ^{-\$}	76.
ولتاژ الكترود(V)	١	۵۰۰۰۰
جريان الكترود(A)	<i>۱</i> ۰ ^{-۴}	۲.
چگالی عددی الکترون(e/m ³)	1.17	۶×۱۰۱۸
دماي جنبشي الكترون(eV)	١	۵

جدول (۱-۱) محدودهی مقداری چند پارامتر در تخلیهی الکتریکی نورانیdc[۶]

dc ا-۲-۴-۱ نواحی تخلیهی الکتریکی نورانی

تخلیههای الکتریکی dc اغلب به چندین ناحیه مجزا تقسیم بندی می شوند [۶]. همانطور که در شکل (۱–۹) آورده شده است، اغلب نزدیک کاتد یک لایهی نازک روشن مشاهده می شود که آن را "ناحیهی درخشندگی کاتد" می نامند. این ناحیه بوسیلهی اتم های برانگیخته شده توسط الکترون های رها شده از کاتد و یا یون های شتاب دار شده از پلاسما به سمت کاتد، بوجود میاید. ناحیهی تاریک بین کاتد و درخشندگی کاتد "ناحیهی تاریک آستون"^۱ نامیده می شود.

در ناحیهی آستون الکترونها به قدری آهسته هستند که قادر به یونیزه کردن و برانگیخته کردن گاز خنثی نمیباشند.

¹ Aston dark space



شکل (۱-۹) نواحی تاریک روشن در تخلیهی الکتریکی نورانی dc [۶]

ناحیهی تاریک کاتد بعد از ناحیهی درخشندگی کاتد وجود دارد که با نام "ناحیهی تاریک کروکس یا هیترف"^۱ نیز نام گذاری میشود. در این ناحیه افت بزرگ پتانسیلی اتفاق میافتد. اغلب این ناحیه بعنوان غلاف کاتد شناخته میشود. بخش اعظم غلاف کاتد دارای بار خالص مثبت است که دلیل این امر وجود یونهای مثبت جذب شده توسط پتانسیل منفی در این ناحیه میباشد. گوشهی سمت راست غلاف کاتد "درخشندگی منفی" قرار دارد که اغلب درخشندهترین قسمت در تخلیه است. در این ناحیه الکترونها انرژی کافی را برای برانگیخته و یونیزه کردن گاز خنثی بدست میآورند. بعد از درخشندگی منفی ناحیهی تاریک دیگری وجود دارد که "ناحیهی تاریک فارادی"^۲ نامیده میشود. الکترونها تقریبا^۲ تمام انرژی خودشان را در درخشندگی منفی از دست میدهد و ناحیهی تاریک فارادی مامل الکترون هایی است که انرژی کافی برای برانگیختهی و یونیزاسیون ندارند. بعد از این ناحیه، "ستون مثبت" قرار مرفته است که انرژی کافی برای برانگیختگی و یونیزاسیون ندارند. بعد از این ناحیه، "ستون مثبت" قرار میام انرژی خودشان را در درخشندگی منفی از دست میدهند و ناحیهی تاریک فارادی شامل الکترون-میام انرژی خودشان را در درخشندگی منفی از دست میدهند و ناحیهی تاریک فارادی شامل الکترون-میام انرژی خودشان را در درخشندگی آند" قرار دارد. این ناحیه سیلی اینا میه از این ناحیه، "ستون مثبت" قرار گرفته است که دارای میدان الکتریکی کوچکی است. اما این میدان برای ایجاد یونیزاسیون،کافی میباشد. بعد از ناحیهی ستون مثبت "درخشندگی آند" قرار دارد. این ناحیه نسبت به ستون مثبت کمی روشن تر است و مرز غلاف آند میباشد. نزدیک آند "فضای تاریک آند" قرار دارد که دارای بار فضایی منفی است.

¹ Crookes or Hittorf dark space.

^r Faraday dark space

مثبت می شود. یون های پرانرژی سطح کاتد را کندوپاش کرده و منجر به نشر الکترون های ثانویه می-شوند[۲۱]. ساختار تخلیهی الکتریکی dc در فصل دوم بیشتر شرح داده می شود.

۱-۴-۴ پلاسماهای تولید شده فرکانس رادیویی

تخلیههای الکتریکی قادر هستند که بوسیلهی میدانهای الکترومغناطیسی فرکانس بالا، برانگیخته و تقویت شوند. فرکانسهای رادیویی (RF)^۱ در فرکانس عملیاتی NHz - ۱۰ عمل میکنند. طول موجهای الکترومغناطیسی تولید شدهی متناظر با این فرکانسها، ۳۰۰۳ – ۳ میباشند[۱۰]. از آنجایی که RF توان موثرتری را به الکترونها نسبت میدهد، این نوع تخلیه دارای یونیزاسیون کارآمدتری میباشد. تخلیههای RF بر مبنای توان جفت شده، به دو نوع "تخلیههای جفت شدهی خازنی" و "تخلیههای جفت شدهی القایی" تقسیم میشوند.

۱-۴-۴ پلاسمای جفت شدهی خازنی

پلاسماهای جفت شده یخازنی، بوسیله یمیدان الکتریکی RF فرکانس بالا، تولید می شوند. یک سیستم RF معمولی شامل یک ژنراتور و راکتور همراه با الکترود می باشد. الکترودها در RF، بوسیله ی نواحی غلاف پوشانده می شوند که این مکانیزم همانند ناحیه ی تاریک کاتد در تخلیه ی الکتریکی dc است. فاصله ی بین الکترودها توسط توده پلاسما پر می شود. این نوع تخلیه شامل دو الکترود فلزی جایگذاری شده در راکتور می باشد که با فاصله یکمی از هم جدا می شوند. یکی از این الکترودها به منبع تغذیه ی RF متصل بوده و الکترود دیگر، به زمین متصل است. از آنجایی که این پیکربندی، شبیه یک

¹ Radio Frequency

خازنی" مینامند[۲۲]. عبارت جفت شدگی خازنی به روش اتصال توان وروردی به داخل تخلیه، اشاره دارد. شکل (۱-۱۰) یک پلاسمای جفت شدهی خازنی را نشان میدهد.



شکل (۱۰-۱۰) راکتور پلاسمای جفت شدهی خازنی.rf [۲۳]

یکی از جنبههای مهم در تخلیهی جفت شدهی خازنی (CCD)^۱، که از تفاوت جرمی الکترونها و یونها نشأت می گیرد، پدیدهی "خود-بایاس"^۲ است[۱۰]. این پدیده بعلت ۱) بکار گیری خازن جفت شده بین ژنراتور و الکترود متصل شده به منبع تغذیه و ۲) بکار گیری مساحت شکل گیری شدهی مناسب الکترود متصل شده به منبع تغذیه (کوچکتر) و الکترود متصل شده به زمین (بزر گتر)، بوجود می آید.

۱-۴-۴ پلاسمای جفت شده القایی

شکل (۱۱–۱۱) یک پلاسمای جفت شدهی القایی را نشان میدهد. (ICP)^۳، شبیه به CCP است، با این تفاوت که الکترود شامل یک سیم پیچی است که در اطراف حجم تخلیه پیچیده شده است. این سیم پیچ پلاسما را بطور القایی، برانگیخته میکند. میدان مغناطیسی متغیر این سیم پیچ، یک میدان الکتریکی تولید میکند. این میدان به الکترونها شتاب میدهد. به زبان ساده جریانهای RF درسیم پیچ (عنصر القایی) یک شار مغناطیسی RF تولید کرده و این شار به داخل پلاسما نفوذ میکند[۲۴].

¹ Capacitively Coupled Discharge.

^r self-bias

^{*v*} Inductively coupled plasma


شكل (۱۱-۱۱) راكتور پلاسماى جفت شدهى القايى If [۲۳]

۱-۴-۴ پلاسمای مایکروویو

پلاسماهایی که تحت اعمال توان مایکروویو، بعنوان مثال تابشهای الکترومغناطیسی، در محدوده-ی فرکانسی MHz تا GHz تا GHz ۱۰ بوجود میایند، بعنوان پلاسماهای مایکروویو نامیده میشوند. متداول ترین طول موج استفاده شده در این پلاسما برابر با C۲/۲۴ میباشد که این طول موج متناظر با فرکانس ۲/۴۵ GHz است. در این نوع تخلیهها، توان در محدودهی چند وات تا چند صد کیلو وات و فشار از p ۲/۰۰ تا چندین فشار اتمسفر میباشد[۱۰]. همچنین در این نوع تخلیه، گازهای مختلفی (گاز نادر وگاز مولکولی) مورد استفاده قرار می گیرند. یکی از مزیتهای این نوع پلاسماها عدم نیاز به الکترودها و درنتیجه ممانعت از آلودگی ماده کاتد میباشد. پلاسماهای تولیدشده توسط ریزموجها اغلب یونیزاسیون بیشتری را نسبت به تخلیههای cb و تخلیههای fr فرکانس پایین دارا میباشند[۱۰]. شکل را - ۱۲) مربوط به راکتور پلاسمای تولید شده توسط مایکروویو است. اگر در پلاسما یک میدان مغناطیسی ایستا لحاظ شود، ریزموجها با حرکت چرخشی الکترونها، تشدید میشوند. این نوع تخلیهها،

¹ Microwave

^r Electron Cyclotron Resonance



شکل (۱۱–۱۲) راکتور پلاسمای تولید شدهی مایکروویو[۱۰]

۱-۵ طبقه بندی پلاسما

پلاسماها از نظر حرارتی به دو گروه اصلی پلاسماهای دمای بالا یا همجوشی و پلاسماهای دمای پایین یا تخلیههای گازی تقسیم میشوند[۲۵]. یک تقسیم بندی ساده و پارامترهای انواع متنوع پلاسما در جدول (۱-۲) نشان داده شده است. قابل ذکر است که در فیزیک پلاسما معمولاً دما را برحسب واحدهای انرژی بیان میکنند[۲۶]. برای مشخص کردن دما از انرژی مربوط به KT استفاده می شود که در آن روابط زیر برقرار است.

$$KT = 1ev = 1.6 \times 10^{-16} J \tag{1-9}$$

$$lev = 11600^{\circ}K \tag{1-1.}$$

منظور از یک پلاسمای ۲ev، پلاسمایی است که برای آن KT=۲ev میباشد. جالب است که پلاسما در یک زمان میتواند چندین دما داشته باشد[۲۶]. در پلاسماهای دمای بالا، همهی گونهها (یونها، الکترونها و گونههای خنثی)، در حالت تعادل گرمایی قرار دارند. پلاسماهای دمای پایین خود به دو گروه پلاسماهای حرارتی و پلاسماهای غیر حرارتی تقسیم میشوند. پلاسماهای حرارتی، شبه تعادلی هستند. پلاسماهای غیر حرارتی، پلاسمای غیر تعادلی یا سرد نامیده میشوند. در پلاسماهای حرارتی بین الکترونها، یونها و گونههای خنثی یک برابری نزدیک حرارتی وجود دارد. در تولید پلاسماهای سرد، بخش زیادی از انرژی الکتریکی کوپل شده به جای گرم کردن تمام جریان گاز، کانالی به مولفهی الکترون میشود. بنابراین ذرات سنگین (شامل گونههای خنثی و یونها) در دمای اتاق یا نزدیک به دمای اتاق باقی میمانند[۲۷]. پلاسماهای تخلیههای تابان، دمای پایین و واکنشهای شیمیایی بالا را در بر میگیرند. چنین پلاسماهایی برای کاربردهایی مناسب هستند که نیاز به دمای پایین و واکنش شیمیایی بالایی دارند.

مثال	حالت	پلاسما					
پلاسمای همجوشی	$T_e \approx T_i \approx T_g - T_p = 10^6 - 10^8 K$	پلاسمای دمای بالا					
پلاسماهای تولید شده با لیزر	$n_e \ge 10^{20} m^{-3}$	(پلاسمای تعادلی)					
پلاسمای دمای پایین							
	$T_e \approx T_i \approx T_g \le 2 \times 10^4 K$	پلاسمای حرارتی					
پلاسمای جرقهای،	$n_e \ge 10^{20} m^{-3}$	(پلاسمای شبه تعادلی)					
تخلیههای تابان، تخلیهی کرونا،	$T_e >> T_i = T_g = 300 - 10^3 K$	پلاسماي غيرحرارتي					
جت فشار اتمسفری	$n_e \approx 10^{12} m^{-3}$	(پلاسمای غیر تعادلی)					

	۲۵	پلاسما	حرارتي	طبقەبندى	(۲-۱)	جدول ا
--	----	--------	--------	----------	-------	--------

بطور کلی خواص پلاسما با توجه به نوع منبع انرژی و مقادیر انرژی انتقال یافته به پلاسما، از طریق شرایط چگالی الکترونی یا دما تغییر می کند. این دو پارامتر اساسی، پلاسما را در ردههای متفاوتی تمایز می دهد. نوع گاز پلاسما بعلت تحت تاثیر گذاشتن دمای پلاسما، مهم است.

شکل(۱-۱۳) طبقهبندی منابع مختلف پلاسما را برحسب دما و عدد چگالی الکترونی نشان می-دهد.



شکل (۱-۱۳) طبقه بندی پلاسما (برحسب دما و چگالی الکترون)[۶]

۱-۶ کاربردهایی از تخلیهی الکتریکی نورانی

تخلیههای الکتریکی نورانی در شمار زیادی از زمینههای کاربردی از جمله محدودهای از شیمی آنالیزی (که فقط بخش کوچکی را تشکیل میدهد)، صنعت میکرو الکترونیکها، لیزر، منابع نور، صفحهی نمایش و بسیاری از موارد دیگر مورد استفاده قرار می گیرند [۲۹]. در این بخش به منظور قرار دادن تخلیهی الکتریکی در یک چشم انداز وسیع به شرح مختصر چند نمونه از کاربردهای پر اهمیت تر آن می پردازیم.

۱-۶-۱ شیمی آنالیزی

تخلیهی الکتریکی نورانی برای شیمی آنالیزی، بر مبنای اصل کندوپاش بکار گرفته می شود. کاتد (که معمولاً جامد است) مادهی مورد استفاده برای آنالیز در تخلیه است. بمباران یون و گونه های دیگر در سطح کاتد علاوه بر آزاد کردن الکترونهای ثانویه، اتمهایی را نیز از ماده کاتد آزاد می کند، که این پدیده "کندوپاش" نام دارد[۲۹]. اتمهای ماده در پلاسمای تخلیه الکتریکی نورانی وارد می شوند. آنها در معرض برخورد با الکترونها و سایر گونههای پلاسما قرار می گیرند. برخوردهای یونیزاسیون، یونهایی از ماده کاتد تولید می کند که توسط طیفسنج جرمی اندازه گیری می شود. به این کاربرد طیفسنجی جرمی تخلیهی الکتریکی نورانی (GDMS)⁽ گفته می شود [۳۰]. برخوردهای برانگیخته کننده، فوتون-هایی را از سطح مادهی کاتد و گاز موجود در تیوب ساطع می کنند که توسط طیفسنج نور نشری مورد تحلیل قرار می گیرد. به این کاربرد، طیفسنجی نور نشری تخلیهی الکتریکی نورانی (GD-OES) گفته می شود [۳۲،۳۱]. علاوه بر این، اترههای ماده کاتد می توانند توسط منبع نور خارجی مورد تحقیق قرار گیرند که به آن طیف سنجی جذب اتمی و فلوئورسانس تخلیهی الکتریکی نورانی (GD-AAS) و -GD کیرند که به آن طیف سنجی جذب اتمی و فلوئورسانس تخلیهی الکتریکی نورانی(که GD-AAS) و -GD (AFS)⁷ گفته می شود [۲۹]. تخلیهی الکتریکی نورانی برای تحلیل مواد جامد رسانا بسیار ساز گار است. همچنین از آن به منظور تحلیل نیمه رساناها، نارساناها، مایعات و گازها نیز استفاده می شود. مدهای عملیاتی متنوعی از تخلیههای الکتریکی نورانی برای شیمی آنالیزی مورد استفاده می شود. ساده-ترین مد عملیاتی که بارها مورد استفاده قرار گرفته است، تخلیهی الکتریکی نورانی می است. مدهای ترین مد عملیاتی که بارها مورد استفاده قرار گرفته است، تخلیهی الکتریکی نورانی مان علیه است. مدهای ترین مد عملیاتی دیگری نیز وجود دارند که بطور گستردهای در حال محبوبیت می اشند. یکی از این مدها RF

1-8-1 فناوری مواد و صنعت میکرو الکترونیک

این حوزهی کاربردی، بزرگترین و احتمالاً مهمترین حوزه برای تخلیههای الکتریکی است و با فشار پایین مرتبط است. در واقع تخلیهی الکتریکی، برای حک کردن، اصلاح و تمیزی سطوح و برای رسوبگیری فیلم نازک روی لایهها مورد استفاده قرار می گیرد[۲۹]. حک کردن و رسوبگیری دو نمونه از مهمترین کاربردهای تخلیه میباشند که در این بخش به توضیحاتی در رابطه به آنها می پردازیم.

¹ Glow Discharge Mass Spectrometry

^r Glow Discharge Atomic Absorption and Fluorescence Spectrometry

1-8-1-1 حک

یکی از کاربردهای پلاسمای تخلیهی الکتریکی در صنعت میکرو الکترونیکها حک سطوح می باشد[۳۳]. حک به دو روش صورت می گیرد[۲۹]. در "حک کندوپاشی" ماده بعلت بمباران کندوپاشی یونها و اتم های پلاسما، بطور پیوسته حک می شود. این روند می تواند با گاز آرگون، بعنوان گاز تخلیه انجام شود و مکانیزم آن با کندوپاش در شیمی آنالیزی یکسان است. غالبا ٌمواد نیمه هادی نیز در صنعت میکرو الکترونیکها، حکاکی می شوند که اصطلاحا ٌ به آن "حک پلاسمایی" گفته می شود که در این روش یک گاز واکنشی پلاسما مورد استفاده قرار می گیرد و ماده بعلت واکنشهای شیمیایی در سطح حک می شود. شکل (۱–۱۴) نمونه ی متداولی از حک سطح سیلیکون را بوسیله ی پلاسمای (CF4 نشان



شکل (۱۱–۱۴) حک کردن سطح سیلیکون بوسیلهی پلاسمای CF4[۲۹]

۱–۶–۲–۲ رسوبگیری فیلم نازک

رسوبگیری یک لایه بر روی عنصر مورد عمل نه تنها فقط در صنعت میکرو الکترونیکها، بلکه در تکنولوژی مواد نیز دارای اهمیت فراوانی میباشد[۲۹]. این مورد نیز همانند حکاکی با دو روش ایجاد میشود. در "رسوب گیری کندوپاشی" اتمهای کندوپاش شده از یک هدف، در پلاسمای تخلیه وارد شده و سپس پخش میشوند و روی یک لایه رسوبگیری میکنند. مکانیزم کندوپاش در این روش، همانند روش شیمی آنالیزی بوده و گاز مورد استفاده در این روش معمولاً گاز آرگون میباشد. همچنین "رسوبگیری پلاسمایی" اغلب برای کاربردهای شیمیایی مهمی مورد استفاده قرار میگیرند. در این زمینه، گاز تخلیه یک گاز واکنشی است و انواع مختلفی از رادیکالها و یونها، بعلت واکنشهای شیمیایی (یونیزاسیون، تفکیک و ...) در پلاسما شکل می گیرند که قادر هستند به سمت عنصرمورد عمل نفوذ کرده و رسوبگیری نمایند .که دلیل این امر، واکنشهای شیمیایی سطح است. شکل (۱–۱۵) دیا گرامی از نمونهای از رسوبگیری پلاسمایی را نشان میدهد.



شکل (۱–۱۵) دیاگرامی از نمونهای از رسوبگیری پلاسمایی[۲۹]

امروزه، تخلیههای متنوعی در راستای کاربردهای رسوبگیری و حک کردن سطح، مورد استفاده قرار می گیرند. سادهترین نوع آنها تخلیهی الکتریکی نورانی dc است. همچنین تخلیهی الکتریکی نورانی rf جفت شدهی خازنی مخصوصاً برای حک و رسوبگیری مادهی نارسانا، بسیار محبوب می باشد. با این حال مدعملیاتی دوم، برای راکتورهای بزرگ (که یک گرایش جدید در تکنولوژی مواد می باشد) بدلیل قیمت بالای ژنراتورهای rf سودمند نیست

۱–۶–۳ لیزرها

عملکرد انواع متنوعی از لیزرها براساس تخلیههای الکتریکی نورانی میباشد. لیزرهایی که به تخلیهی الکتریکی نورانی آنالیزی مرتبط می باشند "لیزرهای یونی بخار فلز" نامیده میشوند[۳۴]. یک گاز بی اثر (هلیوم، نئون، آرگون) بعنوان گاز تخلیه مورد استفاده قرار میگیرد و اتمهای تحولی فلز از طریق تبخیر یا کندوپاش شیمی آنالیزی، به داخل تخلیه وارد میشوند. وارونگی جمعیت مورد نیاز برای اثر لیزر بوسیلهی انتقال بار نامتقارن بین یونهای گاز تخلیه و اتمهای لایه نشانی شده بدست میاید. معمولاً مد تخلیهی مورد استفاده در این کاربرد، تخلیههای کاتد توخالی dc میباشد. نوع دیگری از تخلیهی الکتریکی نورانی با خواص لیزری (که مبتنی بر ترکیب نئون و مس است) "لیزر بخار مس" نامیده میشود[۳۵]. در این نمونه، مد تخلیه، ستون مثبت تخلیهی dc یا پالسی میباشد. وارونگی جمعیت مورد نیاز در این مورد بوسیلهی برانگیختگی ضربهای الکترون نمونه، حاصل میشود. همچنین اثر لیزر توسط انواع دیگری از تخلیههای الکتریکی نیز بوجود میاید که لیزرهای اگزایمر^۱[۳۶] و لیزرهای CO₂ [۳۷،۲۹] دو نمونه از متداول ترین آنها میباشند. شکل (۱–۱۶) نمونه ای از لیزرهای CO₂ را نشان میدهد.



شکل (۱-۱۶) نمونه ای از لیزر CO₂

1-8-4 لاميها

تخلیهی الکتریکی نورانی بعلت برانگیختگی و به دنبال آن فروپاشی تابشی به سطوح پایین تر در راستای اهداف روشنایی همانند لامپهای فلورسنت، لامپهای نئون (در تبلیغات تزیینی) و لامپهای زنون (در اتومبیلهای مدرن)، مورد استفاده قرار می گیرد. شکل (۱–۱۷) نمونهای از لامپ های نئون را نشان میدهد.

[\] Excimer laser



شکل (۱–۱۷) نمونهای از لامپ نئون

۱–۶–۵ نمایشگرها

یکی دیگر از زمینههای رو به رشد کاربردی، فناوری صفحهی نمایشگر میباشد. صفحات نمایشگر تخت پلاسما (PDPs)^۱ بعنوان صفحات نمایشگر تلویزیون بسیار مورد توجه هستند[۳۸]. نمایشگر دیگری که با استفاده از پلاسما ساخته میشود، نمایشگر با تکنولوژی پلاسمای کریستال مایع فعال شده (PALC)^۲ میباشد[۲۹]. شکل(۱–۱۸) دیاگرامی از یک نمایشگر پلاسمایی را نشان میدهد.



PLASMA DISPLAY

شکل (۱–۱۸) دیاگرامی از نمایشگر پلاسما

¹ Plasma Display Panels

^r Plasma Activated Liquid Crystal

فصل دوم

ماهیت تخلیهی الکتریکی نورانی DC

و معرفی روش OES برای اندازه گیری

دما و چگالی الکترون

۲- فصل دوم: ماهیت تخلیهی الکتریکی نورانی DC و معرفیروش OESبرای اندازه گیری دما و چگالی الکترون

۲-۱ مقدمه

همانطور که در فصل قبل نیز اشاره شده است، دما و چگالی الکترون نقش بسیار موثری در فهم فیزیک تخلیه و بهینه سازی عملکرد آن ایفا می کنند. در همین راستا اندازه گیری این پارامترها همواره مورد توجه خاص دانشمندان بوده است. به همین منظور در این فصل ابتدا به بیان واکنشهای اتفاقی موجود در تخلیهی الکتریکی نورانی dc و ماهیت آن پرداخته شده است. در ادامه تکنیکهای تشخیصی پلاسما، بطور خاص طیف سنجی پلاسما مطرح می شود. در انتهای این فصل به منظور اندازه گیری دو پارامتر مذکور، تکنیک غیر اختلالی و آسان طیف سنجی نور نشری با استفاده از روش نسبت شدت دو خط بیان شده و بدلیل محدودهی پایین چگالی الکترون تخلیه ی دمای پایین و فشار پایین، معادلات حاکم بر مدل کرونا متناظر با این محدوده

۲-۲ توصيفي از تخليهي الكتريكي نوراني

اعمال اختلاف پتانسیل بین دو الکترود جایگذاری شده در یک گاز فشار پایین، پدیدهای با نام پلاسمای تخلیه را ایجاد می کند. الکترون های نشأت گرفته از کاتد و یون های مثبت نزدیک آند، در جهت های مخالف شتاب می گیرند. آنها قادر به برخورد با یکدیگر و انتقال انرژی می باشند. در اوایل سال ۱۸۵۰ گیسلر ۱ اولین آزمایشات شناخته شده از پلاسمای تخلیه را انجام داد. او موفق به ساخت تیوب گیسلر شد. بعد از آن کروکس، تیوبی تحت عنوان تیوب کروکس را توسعه داد که در بسیاری از محافل از آن به اشتباه بعنوان اولين دستگاه حاوى پلاسما ياد مىكنند. درواقع تيوب كروكس نيازمند كاتد گرم شده، به منظور توليد الکترونهایی میباشد که حاملهای بار منحصر به فرد آن هستند. درحالی که در یک تیوب گیسلر، هم يونها و هم الكترونها بعنوان حاملهای بار تلقی می شوند. در اوایل سال ۱۹۰۰ تخلیهی الكتریكی نورانی به منظور مطالعهی طیفسنجی ساختار اتمی، در حوزهی شیمی آنالیزی مورد استفاده قرار گرفت[۳۹]. طیفسنجی پلاسما یکی از ماندگارترین و قدیمیترین ابزار تشخیصی در فیزیک پلاسما و پلاسمای نجومی میباشد. در این فصل، در رابطه با این روش تشخیصی حائز اهمیت، بیشتر بحث خواهد شد. همانطور که قبلاً نيز اشاره شده است، بعلت اعمال اختلاف يتانسيل بالاي dc، اتمهاى گاز تخليه به شكل الكترونهاي آزاد و یونهای باردار مثبت، یونیزه میشوند. این پدیده شکست الکتریکی نامیده میشود. یونهای مثبت به سمت کاتد شتاب گرفته و قادر خواهند بود که بوسیلهی بمباران سطح کاتد، الکترونهای موسوم به الکترون-های ثانویه را از سطح کاتد جدا کنند. این الکترونها وارد پلاسما شده و با ذرات گاز برخوردهایی را انجام میدهند. بخش اعظمی از این برخوردها منجر به یونیزاسیون و برانگیختگی ذرات گاز می شود. برخوردهای برانگیخته کننده و به دنبال آن فروپاشی تابشی به سطوح پایین تر منجر به ظهور روشنایی در تخلیهی

^{&#}x27; Gissler

الکتریکی نورانی میشود. برخوردهای یونیزاسیون، یونها و الکترونهای جدیدی تولید میکنند. این یون ها مجدداً منجر به جداشدن الکترونها از سطح کاتد شده و الکترونهای جدا شده در طی برخوردهای یونیزاسیونی منجر به ایجاد جفت الکترون - یون میشوند. این فرایندهای تکثیری یون - الکترون، تخلیهی الکتریکی نورانی را به یک تخلیهی الکتریکی خود تقویت کننده تبدیل میکند. در این فصل، تعدادی از این فرایندهای احتمالی در تخلیهی الکتریکی نورانی dc برای گاز آرگون، شرح داده میشود.

۲–۳ هندسهی تخلیهی الکتریکی نورانی

در سادهترین شکل، تخلیهی الکتریکی نورانی بوسیلهی دو الکترود نصب شده در یک محیط گازی مشخص میشود. مهمترین نکته برای طراحی یک دستگاه تخلیهی الکتریکی نورانی، فراهم نمودن شرایط مناسب برای عواملی نظیر تکرار مجدد کندوپاش، تولید موثر یون و برانگیختگی فوتونها میباشد[۴۱]. شکل (۲-۱) نمونههای بسیار متداولی از پیکربندی تخلیهی الکتریکی نورانی را نشان میدهد. این نمونهها شامل ۱) هندسهی کاتد هم محور ۲) هندسهی دیود سطحی ۳) هندسهی نوع گریم ۴)هندسهی کاتد توخالی میباشند. هندسهی کاتد هم محور (شکل (۲-۱-۵)) بطور گسترده در کاربردهای GDMS مورد استفاده قرار میگیرد. نمونهها به شکل میله و یا دیسک بوده و بعنوان کاتد عمل میکنند. درحالی که آند مطابق شکل پیکربندی اصلی میباشد. هندسهی دیود سطحی (شکل (۲-۱-۵)) سادهترین منبع آنالیزی و آند بصورت موازی با هم در داخل تیوبی جایگذاری شدهاند. دیود سطحی توسط کوبرن^۱ به منظور اهداف حک کردن و رسوبگیری در مدهای dc و rf مورد استفاده قرار گرفته بود.



شکل(۲-۱) هندسه های مختلف تخلیه ی الکتریکی a) کاتد هم محور b) دیود سطحی c) نوع گریم

d) لامپ کاتد توخالی[۴۲]

پیکربندی گریم [۴۱] (شکل (۲–۱–۰)) بطور گسترده در طیفسنجی نشری اتم مورد استفاده قرار میگیرد. همچنین تحت شرایط عملیاتی درست به منظور طیفسنجی جرمی نیز قابل استفاده است. این پیکربندی همانند دیود صفحهای است اما یک سیستم پمپاژ اضافی در نزدیکی نمونه قرار دارد. دلیل این امر جلوگیری از رسوب مجدد اتمهای کندوپاشی است[۴۲]. در این پیکربندی آند در فاصلهی بسیار نزدیکی نسبت به کاتد قرار دارد (فاصلهای کمتر از طول ناحیهی تاریک کاتد). هندسهی نهایی،کاتد توخالی است. هنگامی که دو کاتد در نزدیکی یکدیگر مستقر میشوند، تخلیهی حاصل از آنها در یک ناحیهی درخشندگی منفی ادغام میشود. این پدیده منجر به افزایش میزان کندوپاش، برانگیختگی و یونیزاسیون می گردد.[۳۳] لامپ کاتد توخالی است (شکل (۲–۱–۵)). در

[\]Coburn

برای اولین بار توسط پاشن مورد استفاده قرار گرفت [۴۲]. یکی از معایب اصلی این نوع هندسه ماشین کاری گسترده برای ساخت کاتد توخالی از نمونههای فلزی میباشد. دستگاههای کاتد توخالی، منحصراً بعنوان منابعی برای طیفسنجی نشری اتم مورد استفاده قرار می گیرند [۴۳]. بعلاوه شدت تابشی نشری بالای این منابع، آنها را بعنوان منبع اصلی طیفسنجی جذبی و فلوئورسانس اتمی مطرح می کند.

۲-۴ فرایندهای اتفاقی در تخلیهی الکتریکی نورانی dc آرگون

در شکل (۲–۲) تعدادی از فرایندهای بسیار مهم و گونههای فعال موجود در تخلیهی الکتریکی نورانی گاز آرگون نمایش داده شده است. قابل ذکر است که ارائهی همهی پدیدههای محتمل، بدلیل پیچیدگی تعداد بسیاری از آنها و ناشناخته باقی ماندن تعدادی دیگر، عملی نمیباشد. بنابراین این مجموعه به بیان فرایندهای مناسب تر در تخلیهی الکتریکی نورانی آنالیزی (همانند یونیزاسیون (بازترکیبی)، برانگیختگی (آسایش) و ...) و همچنین گونههای پلاسمایی موجود در این فرایندها (بعنوان مثال الکترون، اتمهای آرگون، یونهای یکبار مثبت آرگون، اتمهای آرگون که به سطوح انرژی متنوع همانند سطوح شبه پایدار برانگیخته می شوند، اتمها و یونهای ماده کاتد) پرداخته است.



شکل (۲-۲) تعدادی از فرایندها و گونههای فعال موجو در تخلیهی الکتریکی نورانی dcگاز آرگون[۲۳]

بطور کلی تخلیهی الکتریکی نورانی توسط دو فرایند نشر الکترون ثانویه از کاتد و یونیزاسیون در پلاسما، تقویت میشود[۴۴]. در این بخش علاوه بر ارائهی فرایندهای برخوردی بسیار مهم در پلاسما، توصیفی کلی از فرایندهای اتفاقی در دیوارههای محفظهی تخلیه مطرح شده است.

۲-۴-۲ فرایندهای برخوردی در پلاسما[۴۵]

۲-۴-۱ برخوردهای الاستیک

این نوع برخوردها، به میزان زیادی در تخلیه رخ میدهند. در برخوردهای الاستیک مجموع انرژی جنبشی قبل و بعد از برخورد جرمهای برخورد کننده ثابت است و انرژی جنبشی کمی بین جرمهای برخورد کننده مبادله میشود. این برخورد بین گونههایی با جرمهای قابل قیاس (بعنوان مثال دو اتم) قابل توجه میباشد اما برای ذراتی با جرمهای بسیار متفاوت (همانند الکترون و اتم) قابل اغماض است.

۲-۴-۱-۲ یونیزاسیون و برانگیختگی اتم های آرگون

۲-۴-۱-۲-۱ یونیزاسیون و برانگیختگی ضربه ای الکترون

$$Ar^{0} + e^{-} \rightarrow Ar^{+} + 2e^{-} \tag{(1-1)}$$

$$Ar^{0} + e^{-} \rightarrow Ar^{*} + e^{-} \tag{(Y-Y)}$$

یونیزاسیون ضربه ای الکترون یک فرایند اساسی در پلاسمای خود پایدار (خود تقویت کننده) است. دلیل این امر تکثیر الکترون ناشی از تشکیل یونیزاسیون مجدد توسط الکترونهای شکل گرفته در فرایند مذکور است. این فرایند هم از طریق برخورد الکترون با اتمهای آرگون در حالت پایه (یونیزاسیون ضربهای مستقیم الکترون) و هم برخورد با اتمهای آرگون در سطوح شبه پایدار با انرژیهای ۱۱/۵۵eV یا ۱۱/۷۲eV اتفاق میافتد. مکانیزم برانگیختگی ضربهای الکترون نیز همانند یونیزاسیون ضربهای الکترون میباشد. اما در طی این فرایند انرژی کمتری به اتم انتقال مییابد بطوریکه هیچ الکترونی قادر بهترک اتم نبوده و فقط به یک سطح انرژی بالاتر در داخل اتم پرش میکند.

۲-۴-۲-۲ یونیزاسیون و برانگیختگی ضربه ای اتم آرگون و یون سریع آرگون

$$Ar^{0} + Ar_{f}^{+} \rightarrow Ar^{+} + Ar_{f}^{+} + e^{-}$$
 (Y-Y)

$$Ar^{0} + Ar_{f}^{+} \rightarrow Ar^{*} + Ar_{f}^{+}$$
 (Y-F)

همانند یونیزاسیون و برانگیختگی ضربهای الکترون،اتمها و یونهای آرگون نیز به شرط دارا بودن مقدار انرژی زیاد موجب برانگیختگی و یونیزاسیون اتمهای آرگون میشوند. در تخلیهی الکتریکی نورانی، یونها و اتمهای پرانرژی آرگون تنها در ناحیهی نزدیک کاتد یافت میشوند. بنابراین این فرایندها تنها در نزدیک کاتد قابل توجه هستند . با افزایش ولتاژ تخلیه، اهمیت این فرایندها نیز افرایش مییابد.

۲-۴-۲-۳ برخورد اتم های شبه پایدار آرگون

$$Ar_m^* + Ar_m^* \to Ar^+ + Ar^0 + e^- \tag{7-a}$$

با برخورد دو اتم شبه پایدار آرگون، بعلت دارا بودن انرژی کافی، یکی از آن دو یونیزه میشود. این فرایند در تخلیهی نورانی در مقایسه با یونیزاسیون ضربهای الکترون اهمیت کمتری را دارد.

۲-۴-۲-۱-۴ انتقال بار متقارن

در اثر برخورد یک یون سریع آرگون با یک اتم آهستهی آرگون، بدون ایجاد هیچ گونه تغییراتی در انرژی جنبشی دو ذره برخورد کننده، یک الکترون از اتم به یون انتقال مییابد. این فرایند بعلت اینکه هیچ افزایشی در تعداد یونها رخ نداده و فقط یک یون سریع آرگون ناپدید شده و یک یون آهسته آرگون خلق میشود، یونیزاسیون واقعی نمیباشد. انتقال بار متقارن مسئول خلق یک بهمن بزرگی از اتمهای سریع آرگون بمباران کننده کاتد و بوجود آورندهی کندوپاش میباشد.

۲-۴-۲ یونیزاسیون و برانگیختگی اتمهای آنالیت کندوپاش شده

فرایندهای ایجاد کنندهی یونیزاسیون و برانگیختگی اتمهای آرگون برای یونیزاسیون و برانگیختگی اتمهای آنالیت (ماده مورد تجزیه) نیز کاربرد دارد. علاوه بر فرایندهای ذکر شده دو نوع فرایند دیگر برای یونیزاسیون و برانگیختگی اتمهای آنالیت قابل اهمیت است.

۲-۴-۱-۳-۱ یونیزاسیون پنینگ

$$M^{0} + Ar_{m}^{*} \rightarrow M^{+} + Ar^{0} + e^{-} \qquad (\Upsilon - \mathcal{F})$$

اگر یک اتم آرگون برانگیخته شده به یکی از دو سطح شبه پایدار (۱۱/۵۵ یا ۱۱/۷۲ الکترون ولت) با یک اتم آنالیت برخورد کند، انرژی سطح شبه پایدار، باعث یونیزه کردن اتم آنالیت می شود.

۲-۴-۱-۳-۲ انتقال بار نامتقارن

$$M^{0} + Ar^{+} \to (M^{+})^{*} + Ar^{0}$$
 (Y-Y)

با برخورد بین یک اتم آنالیت و یون آرگون، یک الکترون از اتم به یون انتقال مییابد. این مورد زمانی به وقوع می پیوندد که تفاوت انرژی بین یون آرگون حالت پایه یا سطح شبه پایدار و سطوح انرژی یون آنالیت به اندازه کافی کوچک باشد. بازده این روند با افزایش تفاوت بین سطوح کاهش مییابد.

۲-۴-۱-۴ بازترکیبی الکترون-یون مثبت

عکس فرایند یونیزاسیون را بازترکیبی الکترون – یون مینامند. بفرض مثال یک الکترون و یک یون به منظور تشکیل یک اتم خنثی، با هم ترکیب میشوند.

۲-۴-۱-۴-۱ بازترکیبی سه جرمی

$$A^{+} + e^{-} + B \longrightarrow A^{0} + B \tag{(Y-A)}$$

در این فرایند ⁺A یک یون دلخواه و B جسم سوم است که میتواند هر ذرهای در پلاسما و یا حتی دیوارهی ظرف باشد.

- ۲-۴-۱-۴-۲ بازترکیبی تابشی
- $A^{+} + e^{-} \rightarrow A^{*} + h\upsilon \tag{Y-9}$
- در این فرایند، انرژی اضافی بوسیلهی یک فوتون حمل میشود.
 - ۲-۴-۱-۴-۳ بازترکیبی تجزیهای

$$(AB)^{+} + e^{-} \rightarrow (AB)^{*} \rightarrow A^{*} + B \qquad (\Upsilon - \Upsilon \cdot)$$

اگر یون بصورت مولکولی باشد، امکان وقوع این فرایند وجود دارد. در تخلیهی الکتریکی نورانی این فرایند بدلیل غالب نبودن گونهی +Ar2 (که همان یون مولکولی مدنظر است)، قابل اهمیت نیست.

۲-۴-۱-۴-۴ بازترکیبی دو مرحلهای

$$A^0 + e^- \to A^- \tag{(7-11)}$$

$$A^- + A^+ \to A^0 + A$$

الکترون به منظور تشکیل یک اتم باردار منفی به یک اتم خنثی می چسبد. این ذرهی باردار به یک ذرهی باردار مثبت یک الکترون منتقل کرده و اتم خنثی تشکیل می دهد. احتمال تشکیل یک اتم باردار منفی بستگی به الکترونگاتیوی اتم دارد. این احتمال برای آرگون بسیار کم بوده و این نوع از بازتر کیبی نیز قابل اغماض است.

بطور کلی بازترکیبی الکترون - یون در چگالیهای بالای الکترون دارای اهمیت بوده و در تخلیههای الکتریکی نورانی فشار پایین آرگون قابل اغماض است.

۲-۴-۲ مرانگیختگی وارونه(آسایش)

عکس برانگیختگی را آسایش مینامند. در واقع غیر از سطوح شبه پایدار، سطوح برانگیخته اتمها دارای طول عمر محدودی هستند و فوراٌ ساختار الکترونی در طی یک یا چند انتقال به حالت پایهی خود برمی گردد. هر انتقال با نشر یک فوتون دارای انرژی خاص همراه است.

۲-۴-۲ فرایندهای اتفاقی در دیواره[۴۵]

هنگامی که ذرمای به دیوارهی تیوب تخلیه برخورد کند، امکان اتفاق پدیدههای متفاوتی وابسته به نوع ذره از قبیل انعکاس و یا جذب الکترون وجود دارد. همچنین الکترون میتواند منجر به نشر الکترون ثانویه شود. احتمال انعکاس برای یک یون یا اتم نیز (احتمالاً به فرم دیگر) وجود دارد. همچنین آنها میتوانند منجر به نشر الکترونهای ثانویه یا خارج شدن یکی از اتمهای دیواره (کندوپاش) شوند. بعلت اهمیت بسیار زیاد دو فرایند اخیر، در ادامه شرح بیشتری از آنها مطرح گردیده است. نشر الکترونهای ثانویه در همهی دیوارهها امکان پذیر بوده درحالی که کندوپاش بدلیل نیاز به انرژی بالای ذرههای بمباران کننده به کاتد محدود میشود.

۲-۴-۲ نشر الکترونهای ثانویه

با وارد کردن ضربه توسط ذره به سطح، یک الکترون ساطع می شود. این فرایند برای حفظ تخلیه مهم است. بعبارتی الکترونهای جدید جبرانی برای فقدان الکترون (الکترون از دست رفته) در دیواره هستند. نشر الکترونهای ثانویه بوسیلهی بمباران الکترون، یون، ذرات خنثی و فوتونها ایجاد می شود.

۲-۴-۲ کندوپاش

با بمباران شدن سطح کاتد توسط ذرات پرانرژی (بعنوان مثال یونهای گاز، اتمهای گاز، همچنین یونهای مادهی کاتد) این ذرات در داخل سطح نفوذ کرده و تعدادی برخورد بین اتمهای مادهی کاتد، راه اندازی می کنند. اتمهای سطح در این آبشار برخوردی که برای یک دوره زمانی بسیار کوتاه بطول میانجامد (تا زمانی که گونههای برخوردکننده دارای انرژی هستند. مقدار انرژیی، بزرگتر از انرژی اتصال سطحی بدست میاورند بطوری که آنها از سطح جدا می شوند. این پدیده کندوپاش نامیده می شود. اکثر ذرات پراکنده شده ات_مهای خنثی میباشند. یونها نیز قادر به پراکنده شدن هستند اما یونهای مثبت بوسیلهی یک میدان الکتریکی قوی در جلوی کاتد، سریعاً به کاتد برمی گردند.

مجموعهی این فرایندها، منجر به ایجاد نواحی تاریک و روشنی در تخلیه الکتریکی نورانی میشود که در ادامهی بحث به بررسی آنها پرداخته شده است.

۲-۵ نواحی موجود در تخلیهی الکتریکی نورانی

تخلیهی الکتریکی نورانی از نظر شدت نور، پتانسیل، تابع میدان الکتریکی، بار گونه و چگالی جریان به هشت ناحیهی مجزا تقسیم میشود[۴۲]. شکل گیری و موقعیت مکانی این نواحی به پارامترهایی از قبیل فشار و نوع گاز استفاده شده در فرایند تخلیه، هندسهی تیوب، اندازه و شکل الکترودها و فاصلهی بین آنها بستگی دارد[۴۲]. شکل (۱–۹) نمایشی از این نواحی را ارائه میدهد. در ادامه ماهیت چگونگی تشکیل این نواحی بیان میشود.

۲–۵–۱ ماهیت تخلیهی الکتریکی نورانی

شکل (۲–۳) نواحی مختلف تخلیهی الکتریکی نورانی dc را نشان می دهد. الکترونهای رها شده از سطح کاتد، انرژی کافی را برای برانگیختگی اتمها و یا مولکولهای گونهی گازی دارا نمی باشند. بنابراین در نزدیکی کاتد ناحیهای تاریک ایجاد میشود که این ناحیه، ناحیهی تاریک آستون است. میدان الکتریکی در این ناحیه بسیار قوی می باشد. این ناحیه شامل الکترونهای آهستهی شتاب گرفته از سوی کاتد می باشد. چگالی الکترونها در این ناحیه بسیار پایین است. در این نقطه هنوز الکترونهای ثانویه اجازه ندارند که توسط پتانسیل کاتد شتاب بگیرند. این الکترونهای ثانویه از برخورد یونهای مثبت شتاب گرفته به سمت کاتد با خود کاتد بوجود میایند. تعدادی از این الکترونهای ثانویه توسط میدان شتاب گرفته و انرژی کافی کسب میکنند. آنها برخوردهای برانگیخته کنندهای با گونههای گاز تخلیه انجام داده و یک نشر بسیار ضعیفی تولید میکنند. این ناحیه درخشندگی کاتد نامیده می شود [۶].



شکل (۲-۳) نواحی تخلیهی الکتریکی نورانی dc [۱۸]

درخشندگی کاتد دارای چگالی یونی نسبتا ٌبالایی است. الکترونها با حرکت به سمت جلوتر توسط میدان انرژی زیادی را کسب مینمایند و باعث یونیزاسیون بیشتر نسبت به برانگیختگی مولکول یا اتمهای گونه یگازی موجود در تیوب تخلیه میشوند. در نتیجه یک ناحیهای با شدت بسیار پایین بوجود میاید. این ناحیه، ناحیه ی تاریک کاتد، کروکس یا هیترف نامیده میشود [۴۲]. در این ناحیه الکترونها طی فرایند یونیزاسیون، تکثیر میشوند. یونها با اینرسی بیشتر از الکترونها، به آرامی حرکت کرده و در نتیجه یک بار فضایی مثبت و ناحیهای با چگالی یونی نسبتا ٌبالایی ایجاد میکنند. بیشترین افت پتانسیل در این ناحیه اتفاق میافتد. میدان الکتریکی در این ناحیه متوسط است. ضخامت این ناحیه، یک ویژگی مهمی در ساخت و ساز منبع تخلیه میباشد. ضخامت ناحیهی تاریک کاتد سه برابر طول دبای تخمین زده می شود. طول دبای بصورت معادلهی (۲-۱۲) ارائه می شود[۶].

$$\lambda_D = \begin{pmatrix} KT_e \varepsilon_{\circ} \\ n_e e^2 \end{pmatrix}^{1/2}$$
 (Y-1Y)

در این معادله k ثابت بولتزمن، T_e دمای الکترون، arepsilon ضریب گذردهی فضای آزاد، n_e چگالی الکترون و e بار الكترون ميباشد. پتانسيل گسترش يافته در سرتاسر ناحيهي تاريك كاتد، پتانسيل افت كاتدي ناميده می شود. شار الکترون در انتهای ناحیهی تاریک کاتد بسیار زیاد است. میدان الکتریکی روند افت خود را ادامه میدهد. در نتیجه انرژی الکترونها کاهش مییابد. تحت چنین شرایطی برانگیختگی بر یونیزاسیون غلبه کرده و ناحیهی درخشندگی منفی شکل میگیرد[۴۶]. بعبارتی درخشندگی منفی از جایی شروع می شود که الکترون های سریع آمده از کاتد بخش بزرگی از انرژی شان را از طریق برخوردهایی با ذرات دیگر از دست میدهند. در درخشندگی منفی دو گروه الکترونی وجود دارد. گروه اول، الکترونهای سریع یا همان الكترونهاي اوليه هستند كه شامل الكترونهاي ثانويهي ساطع شده از كاتد ميباشند. اين الكترونها، انرژي جنبشی خود را از طریق ناحیهی تاریک کاتد بدست می ورند. گروه دوم الکترون هایی هستند که متشکل از الکترونهای ثانویهی ناشی از برخوردهای یونیزاسیون فاز گاز میباشند. که این برخوردهای غیرالاستیک، الكترونهاي آهستهاي را ايجاد ميكنند. الكترونهاي سريع (گروه اول) بدليل انرژي بالاي خود تنها قادر به شرکت در برخوردهای یونیزه کننده میباشند. در حالی که الکترونهای گروه دوم (الکترونهای آهسته) با گونههای اتمی یا مولکولی در درخشندگی منفی برخورد کرده وگونههای یونی یا حالت برانگیخته را ایجاد ميكنند. ولتاژ در سراسر درخشندگي منفي نسبتا يكنواخت است. و نوسان بزرگي در ولتاژ تخليه، تغيير جزیی در آن ایجاد میکند. درخشندگی منفی، بدلیل غنی بودن برخوردهای موجود در آن، ناحیهای با شدیدترین شدت در تخلیه میباشد. این ناحیه بطور گسترده در کاربردهای انالیزی طیفسنجی مورد

استفاده قرار می گیرد. بعلت تکثیر زیاد الکترونها در درخشندگی منفی، یک فزونی کوچک از الکترونها در انتهای درخشندگی منفی ایجاد میشود که این برایند بار فضایی منفی منجر به ایجاد میدان الکتریکی منفی کوچکی می شود که الکترونها را به سمت خارج از درخشندگی منفی و داخل ناحیهی تاریک فارادی می کشاند [۴۷]. جریان الکتریکی در این ناحیه بوسیلهی الکترونها حمل می شود و با توجه به ویژگیهای نوری بعنوان یک تکراری از ناحیهی آستون در نظر گرفته می شود. الکترون ها درخشندگی منفی را با انرژی بسیار پایین ترک میکنند که این انرژی برای برانگیختگی کافی نیست. بنابراین ناحیهی فارادی نسبتا اریک می باشد. در این ناحیه انرژی الکترون بسیار پایین بوده و چگالی الکترون بوسیلهی بازترکیبی و پخش به سمت دیوارهها کاهش می یابد. انرژی که بوسیلهی الکترونها در ناحیهی تاریک فارادی بدست میاید به آنها اجازه میدهد که برخوردهای برانگیخته کنندهای را ایجاد کنند و در نتیجه یک ناحیهای با شدت درخشندگی کمتر از ناحیهی درخشندگی منفی با نام ستون مثبت ایجاد می شود [۴۸]. این ناحیه بوسیلهی بار تقریباً خنثی، مشخص میشود و میدان الکتریکی در آن یک میدان ثابت، کوچک و منفی است. در این ناحیه جریان بوسیلهی الکترونهای شتاب گرفته از میدان الکتریکی حمل می شود. این ناحیه تقریباً هم پتانسیل است. در این ناحیه الکترونها مجددا ٌ بوسیلهی میدان الکتریکی انرژی بدست میاورند. خط اتصال بین ناحیهی تاریک فارادی و ستون مثبت بعنوان موقعیتی تعریف می شود که در آن الکترون ها انرژی کافی برای برانگیختگی را دارا میباشند. بنابراین ستون مثبت ناحیهی روشنی است و خط اتصال بین ستون مثبت و ناحیهی تاریک فارادی تقریباً مبهم است. ستون مثبت دارای چشم انداز یکنواخت و یا نواحی تاریک و روشن متناوب است. الکترونها توسط میدان الکتریکی انرژی بدست آورده و موجب برانگیختگی (لایههای روشن) می شوند و به دنبال آن انرژی خودشان را از دست می دهند و قادر به ایجاد برانگیختگی نیستند (ناحیهی تاریک) [۴۹،۴۲]. مجدداً الکترون ها از میدان انرژی کسب می کنند و روند ادامه می یابد. شکل (۲-۴) تصویری از ستون مثبت را نشان می دهد. قابل ذکر است که در ناحیهی تاریک فارادی، جریان الکتریکی

بوسیلهی الکترونهای ترک کنندهی درخشندگی منفی و حرکت کننده به سمت آند، حمل میشود. تعدادی از این الکترونها با توجه به پخش به سمت دیوارهها تلف میشوند. به منظور جبران این فقدان و تولید الکترونهای کافی که تضمین کنندهی جریان الکتریکی به سمت آند هستند، ستون مثبت شکل می گیرد و میدان الکتریکی منفی کوچک این ناحیه الکترونها را به سمت آند شتاب می دهد.



شکل (۲-۴) نمایشی از چند ستون مثبت تحت شرایط آزمایشگاهی متفاوت [۶]

ستون مثبت ناحیهای از تخلیهی الکتریکی نورانی است که در مباحث تئوری و آزمایشگاهی بسیار مورد توجه قرار گرفته است[۵۰]. در این مجموعه نیز به مطالعهی تجربی این ناحیه پرداخته شده است. در ناحیهی نزدیک آند، دو ناحیهی تاریک آند و درخشندگی آند وجود دارند. درخشندگی آند یک ناحیهی کمی روشن تر از ستون مثبت است. این ناحیه مرزی از غلاف آند میباشد. غلاف آند بدلیل الکترونهای شتاب گرفته از ستون مثبت به سمت آند، دارای بار فضایی منفی میباشد. میدان در این ناحیه کمی بیشتر از ستون مثبت است. این غلاف آند با نام ناحیهی تاریک آند شناخته می شود که بین درخشندگی آند و خود آند قرار گرفته است.

۲-۵-۲ تاثیر پارامترهای تخلیه روی نواحی مختلف[۴۵]

همانطور که قبلاً نیز بیان شد، نواحی مختلف تخلیهی الکتریکی نورانی متأثر از عواملی مانند فشار، فاصلهی بین الکترودها، پتانسیل، جریان الکتریکی، نوع گاز تخلیه و نوع ماده کاتد است.

<u>فشار</u>: با افزایش فشار، نواحی تاریک کاتد، درخشندگی منفی و تاریک فارادی به سمت کاتد فشرده میشوند درحالی که ستون مثبت بخش اعظمی از تیوب تخلیه را در بر می گیرد. با این حال نواحی تاریک کاتد، درخشندگی منفی و تاریک فارادی را نمی توان به خوبی از هم متمایز کرد. کاهش فشار اثر معکوسی دارد به این معنی که ستون مثبت و بعد از آن نواحی تاریک فارادی و درخشندگی منفی در آند ناپدید میشوند.

فاصلهی بین آند و کاتد: این پارامتر نیز اثری همانند اثر فشار در تخلیهی الکتریکی نورانی دارد به گونهای که با افزایش فاصله، ستون مثبت داخل حجم باقی مانده گسترش مییابد و با کاهش فاصله، ستون مثبت و همچنین نواحی تاریک فارادی و درخشندگی منفی در آند ناپدید میشوند.

ولتا<u>ژ</u>: با افزایش ولتاژ ناحیهی تاریک کاتد کوتاهتر می شود. وجود ناحیهی تاریک کاتد برای حفظ تخلیه ضروری است. تخلیه در ولتاژهای بالا بعلت یونیزاسیون بیشتر به راحتی خود تقویت کننده می شود و فضای تاریک کاتد کوچکتری برای این منظور کافی است. در ولتاژهای بالا درخشندگی منفی، طول بیشتری دارد. جریان: جریان الکتریکی در واقع هیچ تاثیری بر روی طول نواحی مختلف ندارد. اما بر روی شدت تابشی اثر می گذارد. بعبارتی در جریانهای بالاتر، میزان برانگیختگی افزایش یافته و همچنین بازدهی تابش نشری نیز افزایش مییابد.

<u>گاز</u> تخلیه: نوع گاز تخلیه تعیین کنندهی رنگ ستون مثبت و درخشندگی منفی میباشد. همچنین این پارامتر بر طول ناحیهی تاریک فارادی نیز اثر میگذارد. اگر گاز بسیار آسان تر یونیزه شود، طول ناحیهی تاریک فارادی کوتاهتر می شود.

مادهی کاتد: این پارامتر بر طول ناحیهی تاریک کاتد اثر می گذارد. اگر مادهی کاتد به آسانی الکترون-های ثانویه را نشر کند، تخلیه با راحتی بیشتری تقویت می شود و ناحیه تاریک کاتدی کوتاهتری برای ادامهی روند تخلیه کافی است.

۲-۶ دو پارامتر اساسی در تخلیهی الکتریکی نورانی

جمعیت گونههای برانگیختهی مختلف در پلاسما و سطوح انرژی مرتبط با آنها و بسیاری از خواص دیگر پلاسما برحسب پارامتر دمای الکترون ($_{e}$) و چگالی الکترون ($_{a}$) توصیف میشود. بعلت نقش غالب الکترون در فرایندهای برخوردی، دما و چگالی الکترونی بسیار حائز اهمیت میباشند[۲]. همچنین در رابطه با تخلیههای الکتریکی نورانی، دما و چگالی الکترون تاثیر بسیار مهمی در تعیین شرایط عملیاتی دارند. در فصل اول محدودهی کمی پیش بینی شده برای دمای الکترون و چگالی الکترون در تخلیهی الکتریکی نورانی bc ارائه شده است. هدف اصلی این مجموعه اندازه گیری دما و چگالی الکترون در ستون مثبت تخلیهی الکتریکی نورانی bc آرگون میباشد. روشهای متنوعی از جمله استفاده از پروب لانگمور، اینترفرومتری، پراکندگی تامسون و طیفسنجی تابش نشری برای اندازه گیری این پارامترها وجود دارد. در ادامهی این فصل در رابطه با روشهای تشخیصی پلاسما بحث می شود. و بطور خاص روش استفاده شده در این مجموعه مطرح می گردد.

۲-۷ روشهای تشخیصی پلاسما

هدف از تشخیصات پلاسما، بدست آوردن اطلاعاتی از حالت پلاسما بوسیلهی تکنیکهای آزمایشگاهی متنوع می باشد [۵۱]. مشخصه ی علم پلاسما نیازمند درک کامل اثرات فرایندهای فیزیکی و شیمیایی موجود در آن و استنباط خواص آنها است. روشهای تشخیصی مورد استفاده در پلاسما به دو گروه الکتریکی و نوری تقسیم میشوند[۵۲]. روشهای الکتریکی به اندازه گیری سیگنالهای الکتریکی ایجاده شده توسط یلاسما (شکل گرفته بعنوان بخشی از رفتار عادی آنها و یا در پاسخ به سیگنالهای الکتریکی اعمال شده بعنوان محرك توسط آزمایشگر) می پردازد[۵۳]. روش تشخیصی الكتریكی شامل پروبهای لانگمور، پروب-های میدان الکتریکی و مغناطیسی میباشد. همچنین سنسورهای مورد استفاده برای اندازه گیری پتانسیل و جریان rf در الکترودها در این گروه قرار دارند. در میان روشهای الکتریکی، پروب لانگمور به شدت مورد استفاده قرار می گیرد. در این روش یک سیم نازکی وارد پلاسما شده و جریان برحسب تابعی از ولتاژ اعمال شده به سیم اندازه گیری می شود. این روش برای مواردی از قبیل تعیین چگالی یون، چگالی الکترون، تابع توزيع انرژی الکترون، دمای الکترون و پتانسيل شناور پلاسمای dc مورد استفاده قرار می گيرد. اگر چه اجرای آسان، منجر به استفاده گسترده از آن شده است اما اغلب مشکلات آزمایشگاهی همانند آلودگی نوک پروب و پیچیدگی تئوری مورد استفاده برای تفسیر اندازهگیریها، خطاهایی را ایجاد میکند[۵۲]. در پلاسماهای مغناطیده یا همراه با رسوبگیری تفسیر اطلاعات بدست آمده از پروب مشکل بوده و احتمال دست یابی به نتایج اشتباه وجود دارد. علاوه بر این بیشتر فرایندها و راکتورهای تجاری پلاسما تمایلی به استفاده از پروب لانگمور ندارند[۵۳]. روشهای نوری مانند نشر، جذب، پراکندگی لیزر و طیفسنجی فلوئورسانس تکنیکهای اثبات شده برای کاوش بخشهای مختلف پلاسما بدون ایجاد هر گونه اختلالی در ترکیب آنها می باشند[۵۳]. تکنیکهای نوری، نور نشری از پلاسما را استخراج میکنند و یا به تحقیق در رابطه با گونههای پلاسما با استفاده از یک منبع نوری خارجی مانند یک لامپ و یا لیزر میپردازند. بدلیل اینکه طول موجهای جذبی و نشری برای هر مولکول یا اتم منحصر به فرد میباشد، اندازه گیریهای نوری، به توصیف مشخصاتی از گونههای خاص میپردازند. طیفسنجی پلاسما یک روش بسیار آسانی است که در سالیان اخیر بسیار مورد استفاده قرار گرفته است.

۲-۷-۲ طيف سنجي پلاسما

همانطور که بیان شد طیفسنجی پلاسما یکی از پابرجاترین و قدیمی ترین ابزار تشخیصی در فیزیک نجومی و فیزیک پلاسما می باشد [۵۳]. پر توهای ساطع شده از اتمها، مولکولها و یونهای موجود در پلاسمای کاری بینشی از فرایندهای داخل پلاسما و پارامترهای پلاسما در اختیار می گذارد [۵۱]. طیف نشری در محدودهی طیفی مرئی با یک ابزار آزمایشگاهی ساده و ارزان قابل دسترسی است. این روش غیراختلالی است و حضور میدان ft، میدان مغناطیسی، پتانسیل بالا و ... هیچ مزاحمتی در ثبت طیفها ایجاد نمی کند [۵۳]. همانطور که بیان شد در این روش تشخیصی سیستم آزمایشگاهی بسیار ساده بوده و فقط یک روزنهی اختصاصی برای ارائهی تصویری از پلاسما لازم می باشد. بنابراین طیفسنجی پلاسمایی یک روش تشخیصی آسان و ضروری در رابطه با فرایندهای پلاسما و فناوری پلاسما در پژوهشهای اساسی می باشد. لازم به ذکر است که اگر چه خطوط طیفی به آسانی قابل دسترسی می باشند اما تفسیر آنها نسبتا⁷

۲-۷-۲ تابش در محدوهی طیفی مرئی[۵۴]

موجهای الکترومغناطیسی بر روی یک محدوده یهنایی طول موج از امواج رادیویی به سمت اشعههای ۲ گسترده می شوند. طیف مرئی قسمت کوچکی از این محدوده با طول موجهای بین ۳۸۰ تا ۷۸۰ نانومتر را شامل می شود. تابش در محدوده ی طیفی مرئی از انتقالات الکترونیکی مولکولی و اتمی نشأت می گیرد. بنابراین این انتقالات رنگ پلاسما را مشخص می کنند. بفرض مثال پلاسمای هلیوم، صورتی و پلاسمای نئون، قرمز رنگ می باشد. دلیل محبوبیت تکنیک آنالیزی با استفاده از ناحیه ی مرئی این است که این تکنیک نسبت به تکنیک طیف سنجی نواحی دیگر (از جمله طیف سنجی اشعه ی ۲ و طیف سنجی اشعه ی مرئی این است که این مانید مشدد نور و توری ها نسبتا ارازن تر می باشد. بسیاری از دستگاههای مورد نیاز طیف سنجی مرئی همانند مشدد نور و توری ها نسبتا ارزان می باشند و در یک حجم وسیعی مورد استفاده قرار می گیرند.

۲-۷-۳ نشر و جذب

در حالت کلی طیفسنجی پلاسما به دو گروه تقسیم میشود. که این دو گروه شامل ۱) روش غیرفعال طیفسنجی نشری و ۲) روش فعال طیفسنجی جذبی میباشد. در طیفسنجی نشری خود نور ساطع شده از پلاسما ثبت میشود. یکی از فرایندهای اساسی در این روش برانگیختگی ذرات (یون، اتم و مولکول) توسط ضربهی الکترون از سطح p به سطح p و فروپاشی داخل سطح k بواسطهی نشر خود به خودی، با احتمال انتقال A_{pk} است. شدت نشری با چگالی ذرات در حالت برانگیخته (n(p) همبسته میباشد در صورتیکه شدت جذبی با چگالی ذرات در حالت پایین تر یعنی (n) مسته میباشد در است. بنابراین چگالی حالت پایه بطور مستقیم توسط طیفسنجی جذبی مشخص میشود. طیف سنجی جذب اتمی شامل مطالعهی جذب انرژی تابشی در نواحی ماوراء بنفش و مرئی بوسیلهی اتمهای خنثی درحالت گازی است. طیف جذبی یک عنصر در شکل گازی و اتمی آن مرکب از یک سری خطوط باریک کاملاً مشخص بوجود آمده از جهشهای الکترونی بیرونی ترین الکترونها است. جذب یک فوتون بوسیلهی اتههای پایدار برای برانگیخته شدن اتم اساس روش جذب اتمی است. تکنیکهای جذبی نیازمند تلاش تجربی بیشتری نسبت به طیفسنجی نشری میباشند. بدلیل اینکه برخی از اصول موجود در طیفسنجی نشری در طیفسنجی جذبی نیز مورد استفاده قرار می گیرند و از آنجایی که طیفسنجی نشری پارامترهای متنوعی از پلاسما را در اختیار قرار می دهد و یک ابزار تشخصیصی منفعل است، تمرکز اساسی این مجموعه بر این نوع طیفسنجی معطوف است. شکل (۲–۵) یک طیفسنجی نشری خاص را برحسب محورهای



شکل (۲–۵) خط تابش[۵۴]

طول موج مرکزی ، λ_0 ، یک خط نشری بوسیلهی انرژی فوتون مطرح می شود که این طول موج با انتقال از سطح p با انرژی E_k متناظر می باشد و با معادلهی (۲–۱۳) ارائه می- شود[۵۵].در این فرمول h ثابت پلانک و c سرعت نور است.

$$\lambda_0 = \frac{hc}{(E_p - E_k)} \tag{(Y-1)}$$

۲-۷-۲ مدلهای جمعیتی[۵۴]

شدت تابشی ناشی از انتقال، بطور مستقیم به چگالی جمعیت حالت برانگیخته (سطح بالاتر) بستگی دارد. چگالی جمعیت حالت برانگیخته توسط معادلهی بولتزمن توصیف می شود. البته این مورد زمانی برقرار است که سطوح در تعادل حرارتی با یکدیگر باشند. چگالی جمعیت در پلاسماهای دمای پایین که پلاسماهای غیر تعادلی یا دور از تعادل حرارتی می باشند، لزوما از قانون بولتزمن پیروی نمی کند. چگالی جمعیت در حالتهای برانگیخته نه تنها فقط به دما بستگی دارد بلکه به پارامترهای متنوعی از پلاسما مانند چگالی الکترون، چگالی ذرات سنگین نیز بستگی دارد. پارامترهای غالب در تاثیرگذاری بر روی چگالی جمعیت حالت برانگیخته، به فرایندهای غالب در پلاسما بستگی دارد. بابراین برای استفاده از مدل های جمعیتی برای اندازه گیری خاص در پلاسما به آشنایی با فرایندهای جمعیتی و کاهش جمعیتی برای هر سطح انفرادی نیاز است.

۲-۷-۴ فرایندهای پرجمعیت کردن و کم جمعیت کردن

برانگیختگی ضربهای الکترون یکی از واکنشهای بسیار مهم در پلاسما است. این واکنش منجر به افزایش جمعیت در سطح بالاتر و کاهش جمعیت در سطح پایین تر می شود. آسایش ضربهای الکترون نیز به نوبهی خود منجر به کاهش جمعیت سطح بالاتر و افزایش جمعیت سطح پایین تر می شود. در یک روش مشابه این اصل برای جذب و نشر خود به خودی (انتقالات نوری مجاز) بکار گرفته می شود.

۲-۸ اندازه گیری دما و چگالی الکترون توسط طیفسنجی نور نشری (OES)

طیفسنجی نور نشری یک روش اساسی تشخیصی پلاسما است که برای پلاسماهای مختلف (فشار بالا و کم و بدون محدودیت دما) عمومیت دارد. این روش هیچ تاثیری بر روی جسم مورد مطالعه نخواهد داشت. این تکنیک مبتنی بر اندازه گیری تابشهای نوری ساطع شده از پلاسما میباشد که خواصی از پلاسما را در محیطهای حاوی اتمها، مولکولها و ... نشان میدهد [۵۶]. در روش طیفسنجی نور نشری (OES) برانگیختگی ضربهای الکترون یک بخش کوچکی از گونهها را درحالتهای الکترونیکی بالاتر ترقی میدهد. سپس آنها فروپاشی کرده و نوری را ساطع میکنند[۵۱]. تکنیکهای مبتنی بر oes غیرتهاجمی و غیراختلالی بوده و نیازمند تجهیزات طیفسنجی در حد متوسط میباشد. اندازه گیریهای حاصل از این روش اغلب بسیارسریع است. تکنیکهای تشخیصی بکاربرندهی oes بر پایهی ارتباط بین نسبتهای شدت خطوط انتقالی بین تئوری و تجربی بنا می شود. شدتهای خطوط انتقالی تئوری و نسبتهای آن توسط مدلهای جمعیتی قابل دسترسی است. چگالی جمیعتی حالتهای برانگیخته تابعی از پارامترهای پلاسما نظیر دمای الکترون و چگالی الکترون میباشد. بنابراین دمای الکترونی و چگالی الکترونی را میتوان از مطابقت بین مدلهای تئوری و نسبت شدت خطوط اندازه گیری شدهی تجربی، تعیین کرد. برای پلاسماهای چگالی پایین ($n_e \le 10^{17} m^{-3}$) از مدل جمعیتی کرونای حالت پایدار (SSC) استفاده می شود [۵۸٬۵۷٬۵]. تشخیصات نوری مدل کرونا می تواند برای آرگون، نئون و پلاسمای ترکیب شده از آن استفاده شود [۵۷،۱]. فرض اساسی مدل کرونا این است که جمعیت سطح نشر کننده بطور انحصاری بدلیل برانگیختگی از حالت

[\]Steady-State Corona

پایه میباشد [۵۹٬۵۷]. در چگالیهای بالاتر، فرایندهای ثانویه (همانند برانگیختگی شبه پایدار) به هیچ وجه قابل اغماض نیستند و مدل SSC قابل استفاده نخواهد بود. تحت شرایط چگالی بالا، مدلهای تابشی برخوردی (CR)^۱ برای پیش بینی دما استفاده میشود [۶۰]. این مدلهای پیچیده، فرایندهای ثانویه را در نظر گرفته و فرض برانگیختگی انحصاری از حالت پایه را رد میکنند [۶۲٬۶۱]. بطور کلی شدت تابشی از پلاسما بوسیلهی معادلهی (۲–۲) مطرح می گردد [۵۷].

$$I_{ki} = E_{ki} N_k A_{ki} \tag{(Y-1f)}$$

 N_k و اعتمال انتقال و A_{ik} ($E_k > E_i$) E_i و E_k ار این معادله A_{ik} (E_k) می انرژی E_k انرژی E_k احتمال انتقال و E_k (L) توسط معادلهی (K می باشد. نسبت شدت خط (L) توسط معادلهی (K می باشد. نسبت شدت (K می باشد. نسبت شدت خط (K) توسط معادلهی (K) بیان می شود[ΔY].

$$L = \frac{I_{ki}}{I_{pq}} = \frac{\lambda_{pq} N_k A_{ki}}{\lambda_{ki} N_p A_{pq}}$$
(Y-1Δ)

در این معادله λ_{ki} طول موج انتقال از حالت انرژی k به حالت انرژی i میباشد. چگالیهای جمعیتی N_k و N_k و N_p در معادلهی بالا بوسیلهی مدل سازی جنبشی وابسته به دما و چگالی الکترون در پلاسما بدست میایند. همانطور که بیان شد سادهترین مدل برای پلاسماهای چگالی پایین، مدل کرونا میباشد. در این مدل، آسایش و برانگیختگی ضربهای الکترون بین اتمهای برانگیخته و یونها ناچیز فرض میشود و تابش خود به خودی تنها بوسیلهی فرایندهای کاهش جمعیت مجاز است [۳۰٬۶۲٬۵۷]. بر طبق این فرض، چگالی جمعیتی حالت k بوسیلهی تاری می این توان بین برانگیخته و یونها ناچیز فرض میشود و تابش مدل، آسایش و برانگیختگی ضربهای الکترون بین اتمهای برانگیخته و یونها ناچیز فرض میشود و تابش خود به خودی تنها بوسیلهی فرایندهای کاهش جمعیت مجاز است [۳۰٬۶۲٬۵۷]. بر طبق این فرض، چگالی جمعیتی حالت k بوسیلهی توازن بین برانگیختگی ضربهای الکترون از حالت پایه به حالت k و نشر خود به خودی از می این میشود. میشود و تابژ می می و در این این این فرض، چگالی معیتی حالت k بوسیله می نوازن بین برانگیختگی ضربهای الکترون از حالت پایه به حالت k و نشر خود به خودی از حالت k کنترل می شود. بعبارت دیگر این توازن با معادلهی (۶۰–۲) بیان می شود.

[\] Collisional Radiative
$$N_g n_e C_{gk}(T_e) = N_k \sum_{i < k} A_{ki}$$
 (Y-19)

در این معادله N_g چگالی جمعیتی حالت پایه، n_e چگالی الکترون، C_{gk} ضریب نرخ برانگیختگی ضربهای الکترون از حالت پایه به سطح $\sum_{i< k} A_{ki}$ میباشد. با الکترون از حالت پایه به سطح پایین ز i میباشد. با الکترون از حالت پایه به مطح یا و k از ال ال الکترون از حالت پایه به سطح کرونا با معادله (۲-۱۷) ارائه استفاده از دو معادله (۲-۱۷) و (۲–۱۲) نسبت شدت خط L در مدل کرونا با معادله (۲–۱۷) ارائه می گردد[۵۷].

$$L = \frac{\lambda_{pq} R_{ki} C_{gk}}{\lambda_{ki} R_{pq} C_{gp}} \tag{(Y-1Y)}$$

در این معادله
$$\mathbf{R}_{ki}$$
 توسط فرمول $A_{ik} = A_{ik}$ ارائه می شود. در مدل کرونا نسبت شدت تابش فقط تابعی \mathbf{R}_{ki} می شود. در مدل کرونا نسبت شدت تابش فقط تابعی

برحسب دمای الکترونی است. شکل کلی معادلات حاکم در مدل کرونا به فرم معادلات (۱۸–۲) و (۱۹–۲) است[۵۷٬۵۱٬۵].

$$KT_{e} = \left[\left(7.87 \times 10^{-9} \right) \times E_{\infty}^{11/4} \times \frac{fgI^{\cdot}\lambda^{3}}{f^{\cdot}g^{\cdot}I\lambda^{3}} \times \exp\left(\frac{E^{\cdot} + E_{\infty} - E}{KT_{e}}\right) \right]^{4/3}$$
(7-1A)

و

$$n_e < 5.6 \times 10^8 \times (z+1)^6 \times T_e^{1/2} \times \exp(\frac{1.6 \times 10^{+3} (z+1)^2}{T_e})$$
(Y-19)

در این معادلات k ثابت بولتزمن و E ،f ،g ،I و E_{∞} به ترتیب شدت، وزن آماری، توانایی جذبی نوسان گر، انرژی برانگیختگی و انرژی یونیزاسیون مربوط به یک خط طیفی است. z بار یونی میباشد. پارامترهای دارای کاما مرتبط با خط طیفی دیگر هستند. شکل (۲-۶) مقادیر عددی چند پارامتر مذکور را برای چند خط طیفی آرگون نشان میدهد. همچنین اطلاعات طیفی مربوط به هر خط طیفی در جدول بین المللی NIST موجود است.

$\lambda(nm)$	Transition	E _i -eV	Ej-eV	g_{j}	f_{ij}
۶٩۶/۵	1s5-2p2	11/548	۱۱/۳۲۸	٣	•/• ٢٩٢
۲・ ۶/۷	1s ₅ -2p ₃	11/248	13/705	۵	۰/۰۲۹۶
۲۳۸/۴	$1s_4-2p_3$	11/874	13/705	٣	•/119
۷۵۰/۴	$1s_2-2p_1$	۱۱/۸۲۸	۱۳/۴۸	١	•/\٣٣

جدول (۲-۱) مقادیر پارامترهای طیفی از چند خط طیفی آرگون[۲]

فصل سوم

چیدمان و نحوهی انجام آزمایش

۳- فصل سوم: چیدمان و نحوهی انجام آزمایش

۳-۱ مقدمه

در ابتدای این فصل چیدمان آزمایشگاهی دستگاه تخلیهی الکتریکی نورانی dc مطرح گردیده است و سپس به شرح روش انجام آزمایش پرداخته شده است. دستگاه تخلیهی الکتریکی نورانی dc دانشگاه صنعتی شاهرود شامل تیوب پیرکسی با دو الکترود آلومینیومی در دو انتهای آن است. تیوب با پمپ روتاری دو مرحلهای تخلیه میشود و ولتاژ بالای dc به آن اعمال میشود. گاز کاری مورد استفاده در این تیوب گاز آرگون بوده و دستگاه طیفسنجی مورد استفاده در این پژوهش AvaSpec-ULS3648 StarLine می باشد. شکل (۳–۱) دیاگرامی از چیدمان آزمایشگاهی مربوطه را نشان میده.



شکل (۳-۱) دیاگرامی از چیدمان آزمایشگاهی دستگاه تخلیهی الکتریکی نورانی dc دانشگاه صنعتی شاهرود

۲-۳ دستگاه تخلیهی الکتریکی نورانی

دستگاه تخلیهی الکتریکی نورانی دانشگاه شاهرود شامل یک تیوب استوانهای از جنس پیرکس با قطر ۲ mm و طول ۱۵ می اشد. در انتهای این تیوب دو رسانای فلزی از جنس آلومینیوم قرار داده شده است. این دو رسانا را الکترود می نامند. الکترودی که جریان به آن وارد می شود الکترود مثبت یا آند و الکترودی که جریان از آن خارج می شود الکترود منفی یا کاتد نامیده می شود. آند را قطب مثبت و کاتد را قطب منفی می نامند. شکل (۳–۲) الکترود مورد استفاده در این پژوهش را نشان می دهد. همچنین شکل (۳–۳) نیز تیوب پیرکس مورد استفاده را نشان می دهد.



شکل (۲-۳) الکترود موجود در دستگاه تخلیهی الکتریکی نورانی dc دانشگاه صنعتی شاهرود



شکل (۳-۳) تیوب پیرکس دستگاه تخلیهی الکتریکی نورانی dc دانشگاه صنعتی شاهرود

۳-۳ سیستم خلاً و فشارسنجی

محدودهی فشاری کارکرد سیستم تخلیهی الکتریکی نورانی dc دانشگاه صنعتی شاهرود فشارهای پایین (درحد چند تور) میباشد. این نکته بسیار مهم است که در ابتدا باید تیوب را تخلیه کرده و سپس گاز مورد نظر را با فشار معلوم به آن تزریق نمود. محفظهی خلأ توسط پمپ روتاری^۱ دو مرحلهای مدل VE225N تخلیه میشود. این پمپ با ولتاژ ۲۲۰۷ برق شهر کار میکند. توان آن ۱/۳ HP میباشد. سیستم کاری با این توان تا فشاری در حدود torr ۲۰۰ رسید. فشار داخل محفظه توسط یک فشارسنج پیرانی اندازه گیری میشود. شکل (۳–۴) پمپ روتاری مورد استفاده را نشان میدهد. همچنین در شکل (۳–۵) فشارسنج پیرانی^۲ آورده شده است.



شکل (۳-۴) پمپ روتاری



شکل (۳–۵) فشارسنج پیرانی

' Rotary Pump

^r Pirani Gauge

۳–۴ سیستم تزریق گاز

در دستگاه تخلیهی الکتریکی نورانی از گازهایی همانند آرگون، هلیوم و نئون بعنوان گاز کاری برای تولید پلاسما استفاده میشود. در این پژوهش گاز آرگون با خلوص ۹۹/۹۹ ٪ بکار گرفته شده است. سیستم تزریق گاز شامل کپسول گاز و یک شیر سوزنی میباشد. گاز آرگون پس از عبور از شیلنگ به شیر سوزنی میرسد که بوسیلهی آن میزان گاز تزریق شده به سیستم کنترل میشود. شکل (۳–۶) کپسول گاز آرگون مورد استفاده در آزمایشگاه را نشان میدهد.



شکل(۳-۶) کپسول گاز آرگون

۳-۵ واریاک

واریاک یا همان اتوترانس دستگاهی است که با اعمال ولتاژ ac به ورودی آن میتواند در خروجی ولتاژ carعتغیر تولید نماید. واریاک نوعی اتوترانسفورماتور است که در فعالیتهای آزمایشگاهی مورد استفاده قرار می گیرد. در واریاک ولتاژ ورودی به پایهی ثابت سیم پیچ طراحی شده برای ولتاژ اولیه، داده می شود و ولتاژ خروجی بین یک سر ثابت و یک سر متغیر دریافت می گردد. ولتاژ خروجی واریاک بین صفر تا یک مقدار حداکثر پیش بینی شده قابل تنظیم است. مقدار حداکثر در اتوترانسفورماتور میتواند از ولتاژ ورودی بیشتر باشد. شکل (۳–۷) واریاک مورد استفاده در آزمایشگاه شاهرود را نشان می دهد. خروجی این واریاک بین ۲۰۰۷ – ۰ می باشد.



شکل (۳-۷) واریاک

۳-۶ منبع تغذیه

منبع تغذیه دستگاهی است که قادر است از یک ورودی با ولتاژ و آمپراژ ثابت (بنا به طراحی داخلی خود) ولتاژ و آمپراژ متغیری را تولید نماید. شکل (۳–۸) منبع تغذیه ولتاژ بالای dc مورد استفاده در این پژوهش را نشان میدهد. خروجی این منبع بین ۱۰ KV – ۰ میباشد.



شکل(۳-۸) منبع تغذیه ولتاژ بالای DC

۳-۷ مولتی متر

مولتی متر دیجیتال برای اندازه گیری کمیتهای الکتریسیته ازقبیل اختلاف پتانسیل یا ولتاژ، مقاومت و جریان طراحی گردیده است و مقادیر اندازه گیری شده را به صورت ارقام روی نمایشگر نشان میدهد. دستگاه مولتی متر قابلیتهای دیگری جهت اندازه گیری میلی آمپر، میکرو آمپر، فرکانس، میکرو فاراد، تست مقدار دما، تست دیود ، تست اتصال و ... را دارا میباشد. در این پژوهش جهت خوانش جریان الکتریکی موجود درسیستم از مولتی متر دیجیتال DEC330FC استفاده شده است. شکل (۳-۹) مولتی متر مورد استفاده در این پژوهش را نشان میدهد.



شکل (۳-۹) مولتی متر دیجیتال DEC330FC

۳-۸ سیستم طیفسنجی

۳-۸-۱ شرایط کلی

انتخاب طیفسنجها، آشکارسازها و اپتیکها به شدت به هدف زمینهی بکاربرندهی آنها بستگی دارد. بطور کلی انتخاب یک سیستم طیف نمایی شامل آشکارساز بوسیلهی چند فاکتور بسیار مهم اداره می شود که تعدادی از این فاکتورها عبارتند از:

- ناحیهی طول موجی مورد علاقه

- مطالعاتی با وضوح بالا یا پایین، مطالعهی اجمالی طیف، شدتهای خط یا جزئیات پروفایل-

های خط

ساطع کننده های قوی یا ضعیف که معمولاً معادل با پلاسماهای چگالی پایین یا بالا می باشند.

وضوح زمانی بالا یا پایین که اساسا آشکارساز را مشخص می کند.

شکل (۳–۱۰) طرح کلی از یک طیفسنج را نشان میدهد. مولفههای اساسی طیفسنجها شامل یک شکاف ورودی، صفحهی خروجی، عنصر پراکنده کننده و آینههای تصویربرداری است.



شکل (۳-۱۰) طرح کلی از یک طیفسنج[۶۵]

اندازه شکافها بدلیل نقش مهم آنها در جد اکردن نور دلخواه با طول موج مشخص، بسیار مهم است. در بیشتر دستگاهها اندازه این شکافها توسط پیچ تنظیم کننده قابل تغییر است. با افزایش اندازه شکاف پهنای نور عبوری و دامنهی طول موج آن بیشتر میشود و این امر منجر به ورود نورهای نامطلوب و اضافی با نام نورهای ولگرد به محیط میشود. توریها، منشورها وکریستالها بعنوان عناصر پراکنده کننده مورد استفاده قرار میگیرند. سیستم تصویربرداری معمولاً شامل یک عدسی L1 (یا آینهی M) موازی کنندهی تابش از شکاف ورودی و یک عدسی L2 (یا آینه M) متمرکز کنندهی تابش در صفحهی خروجی یا صفحهی توابش از شکاف ورودی و یک عدسی L2 (یا آینه M) متمرکز کنندهی تابش در صفحهی خروجی یا صفحهی توابش از شکاف ورودی و یک عدسی L2 (یا آینه M) متمرکز کنندهی تابش در صفحهی خروجی یا صفحهی توابش از شکاف ورودی و یک عدسی L3 (یا آینه M) متمرکز کنندهی تابش در صفحه کروجی یا صفحهی تابش از شکاف ورودی و یک عدسی L3 (یا آینه و M) متمرکز کنندهی تابش در صفحه کروجی یا صفحهی توابی میباشد. از جمله مزیتهای استفاده از آینهها عدم انحرافات رنگی و قابلیت استفاده در طول موجهای آنها در طول موجهای کوتاه کاهش می یابد. این امر تا حد زیادی با استفاده از کاهش سطوح منعکس کننده آنها در طول موجهای کوتاه کاهش می یابد. این امر تا حد زیادی با استفاده از کاهش سطوح منعکس کننده آنها در طول موجهای کروتاه کاهش می یابد. این امر تا حد زیادی با استفاده از کاهش سطوح منعکس کننده آنها در طول موجهای کروتاه کاهش می یابد. این امر تا حد زیادی با استفاده از کاهش سطوح منعکس کننده تابش ورودی بوری های کروی و یا حلقوی قابل اصلاح است. ایجاد نور ولگرد چندین دلیل دارد که یکی تابش ورودی بواسطهی شکاف ورود نور از بدنه میباشد. دلیل های جدی ایجاد نور ولگرد، انعکاس و پراکندگی

ایتیکی باید کاملاً تمیز نگه داشته شوند نور ولگرد در صفحهی خروجی بعنوان یک تابش ضعیف پیوسته هنگام مطالعهی یک خط تابشی قوی، مشکل زیادی را در سیستم طیفسنجی ایجاد میکند. بعبارتی این نور منجر به ایجاد یک پس زمینه در صفحهی خروجی می شود که باید بطور تجربی اندازه گیری شود و یا با یک سطح نسبتاً خوب کاهش یابد. یکی از عناصر پراکنده کنندهی بسیارمهم، توریها میباشند. انتخاب توری برای وضوح طیف بسیار مهم است. زاویهی درخشندگی یک توری، محدودهی طول موجی با بالاترین بازده انعکاس یا بعبارت دیگر حساسیت توری را مشخص میکند. بازتاب استاندارد توری روی یک سطح مقعر یا مسطح می باشد و توری شامل ساختارهای فاصله دار یکسان و هم اندازه است که معمولاً شیار نامیده میشوند. مشخصات شیار توزیع شدت تابش منکسر شده را تغییر میدهد. توریها با استفاده از دو روش تولید میشوند. گروهی بوسیلهی قواعد مکانیکی که در آنها شیارها بطور منحصر به فرد در داخل یک زیر بستر به خوبی گرم شده توسط الماس صیقل داده می شوند و گروه دیگر بوسیلهی روش های تداخل که در آن حاشیهی الگوهای مربوطه بوسیلهی بیمهای دو لیزر شگل گرفته و یک لایهی حساس نسبت به نور را روی سطحی از توری در معرض نمایش قرار میدهند. شکل شیارها در حالت اول مثلثی است و سطح کل از قطعهی اصلی توری طرح ریزی شده با یک لایهی فلزی منعکس کنندهی نازک پوشش داده شده است که در بیشتر حالتها آلومینیوم، طلا و پلاتین در طول موجهای کوتاه، مورد استفاده قرار می گیرند[۶۴]. lpha شکل (۳–۱۱) مشخصات خاصی از یک توری طرح ریزی شده ی مکانیکی را نشان میدهد. در این شکل زاویه یبین پرتو تابش با خط عمود بر توری و همچنین eta زاویه یبین تابش پراکنده شده توسط توری با d خط عمود بر توری است. heta نیز زاویهی بین خط عمود بر توری و خط عمود بر شیار است. همچنین فلاصلهی بین شیارها و m مرتبهی پراش میباشد.



شکل (۳–۱۱) مشخصاتی از توری طرح ریزی شدهی مکانیکی[۶۵]

بین پارامترهای مذکور رابطهی اساسی برقرار است که در بسیاری از کتابهای اپتیکی نیز آمده است. این رابطه با معادلهی (۱–۳) بیان میشود[۶۴].

 $m\lambda = d(\sin\alpha + \sin\beta) \tag{(-1)}$

انواع خاصی از توریها همانند توریهای Echelle برای پراشهای مرتبهی بالا بهینه شدهاند و این امر

منجر به یک وضوح طیفی بالا میشود. شکل (۳-۱۲) نمونهای از این توریها را نشان میدهد.



شکل (۳-۱۲) نمونهای از توری Echelle[۶۵]

شکاف خروجی با یک آشکارساز مجهز می شود. منبع نور (بعبارت دیگر پلاسما) بوسیلهی تصویربردارهای اپتیکی داخل شکاف ورودی یا بوسیلهی فیبرهای متصل شده به شکاف، تصویربرداری می-شود. استفاده از فیبر به ویژه در زمان دسترسی بسیار دشوار به نور پلاسما مناسب تر است. در واقع یک فتو مولتی پلایر ^۱یشت روزنهی خروجی یا یک آرایهی دستگاه بار جفت شده (CCD)^۲[۶۵] در صفحهی خروجی تصویر نصب شده است[۵۴]. در حالت اول پهنای شکاف خروجی و در حالت دوم اندازهی پیکسل، وضوح طيف سيستم را تحت تاثير قرار مي دهد [۵۴]. ميزان حساسيت كلي سيستم به شدت تحت تاثير نوع آشکارساز، فتو مولتی پلایرها با یوشش های کاتدی مختلف و یا آرایههای CCD با انواع مختلف سنسور (تشدیدکننده و ...) است. قطعات منحصر به فرد طیفسنج محدودهی طول موج خاص، وضوح طیفی و توان نور را مشخص می کنند. سیستمهای طیفسنجی دارای فتو مولتی پلایرها، سیستمهای اسکن کننده بوده و سیستمهایی با آرایههای CCD قادر به ثبت یک محدودهی طول موجی خاص میباشند. به بیان سادهتر سیستم نوری طیفسنج، تصویری از شکاف وروردی را در صفحهی خروجی شکل میدهد و برای تابش تک فام (عرض طيفي نزديک به صفر) شکل خط توليد شده، تابع دستگاه يا پروفايل دستگاه ناميده مي شود. این شکل یک تصویر هندسی کامل از شکاف نیست و تصویر توسط اثرات مکانیکی، انحرافات نوری و یراش در لبهی عناصر پراکنده منبسط می شود. یک آرایهی آشکار یا یک صفحهی وابسته به عکاسی در صفحهی تصویر اجازهی ثبت یک محدودهی طیفی را میدهد که متدوالاً کل این سیستم را طیف نگار مینامند. اگر یک شکاف در صفحهی خروجی یک خط طیفی یا یک ناحیهی باریک طیفی را انتخاب کند وسیله بعنوان یک تک فام ساز^۳ شناخته میشود. شکل (۳–۱۳) یک تک فام ساز در پیکربندی سزرنی– ترنر[†] را نشان مىدھد.

['] Photomultiplier

^r Charge-Coupled Device

^r Monochromator

[¢] Czerny–Turner



شکل(۳–۱۳) تکفام ساز سزرنی – ترنر[۶۴]

۳–۸–۲ دستگاه طیفسنجی مورد استفاده در آزمایشگاه شاهرود

همانطور که پیش تر نیز اشاره شده است طیفسنجها شامل شکاف ورودی، موازی ساز، یک عنصر پراکنده کننده همانند توری یا منشور، اپتیکهای متمر کز کننده و آشکارساز میباشند. بطور معمول در یک سیستم تک فام ساز یک شکاف خروجی نیز وجود دارد و فقط یک بخش باریکی از طیف روی یک آشکارساز یک بعدی تک عنصری طرح ریزی میشود. شکافهای وروردی و خروجی در تک فام سازها در موقعیت ثابتی قرار دارند و عرض آنها قابل تغییر است. توری چرخشی، طیف را پراکنده میکند. توسعه ی میکرو الکترونیکها در طول دههی ۹۰ در زمینه ی آشکارسازهای نوری چند عنصری، همانند آرایههای دستگاههای بار جفت شده CDS و آرایههای دیود – نوری، توانایی تولید پویندههای کم هزینه، دوربینهای CDD و ... مرا فراهم ساخت. این ابزارها همان آشکارسازهای CD و ADP¹ مورد استفاده در طیف سنجهای Avantes را فراهم ساخت. این ابزارها همان آشکارسازهای CD و ADP¹ مورد استفاده در طیف سنجهای Avantes فیبرهای سیلیکا^۲ بعنوان فیبرهای اندازه گیرنده برای انتقال نور از نمونه به دستگاه نوری طیف سنجهای Avaspec

¹ Photo-Diode Array

می شوند. اتصال آسان فیبرهای نوری به طیف سنجها و همچنین قابلیت استفاده در محیط های قابل دستر سی سخت، هزینهی پایین و انعطاف پذیر بودن منجر به گسترش استفاده از این تکنولوژی در انواع صنایع شده است.

دستگاه مورد استفاده در این تحقیق طیفسنج فیبر نوری AvaSpec-ULS3648 StarLine است. این طیفسنج فیبر نوری دارای فاصلهی کانونی ۷۵mm است و در یک طراحی Czerny-Turner پیشرفت میکند و دارای وضوح بالایی میباشد. شکل (۳–۱۴) طیفسنج مورد استفاده در این پژوهش را نشان میدهد.



شکل (۳–۱۴) طیفسنج فیبرنوری وارد شده و بوسیلهی یک آینهی کروی نور از طریق یک رابط SMA-905 به داخل جایگاه اپتیکی وارد شده و بوسیلهی یک آینهی کروی موازی میشود. یک توری ساده، نور موازی شده را به نورهای اصلی تجزیه کرده و آینهی کروی دوم نور تجزیه شدهی بدست آمده را به سوی آشکارساز متمرکز میکند و تصویری از طیف روی یک آرایهی آشکارساز خطی یک بعدی طرح ریزی میشود. در تمام سیستمهای نوری AvaSpec-ULS3648 بعدادی عنصر جایگذاری شده است که منجر به ایجاد طیف وسیعی از پیکربندیهای مختلف مرتبط با کاربردهای موردنظر آنها میشود. انتخاب این قطعات همانند توری پراش، شکاف ورودی، فیلترهای مرتب سازی و پوشش آشکارساز یک تاثیر قوی بر روی مشخصات سیستم همانند میزان حساسیت، وضوح تصویر، پهنای باند و نور سرگردان خواهد داشت. جدول (۳–۱) تعدادی از مشخصات فنی مربوط به طیفسنج فیبر نوری AvaSpec-ULS3648 StarLine را بیان میکند.

جدول(۳-۱) تعدادی از مشخصات فنی طیفسنجهای فیبرنوری AvaSpec-ULS3648 StarLine



شکل (۳–۱۵) اجزای تشکیل دهندهی طیفسنج AvaSpec-ULS3648 StarLine را نشان میدهد.



شکل (۳-۱۵) اجزای تشکیل دهندهی طیفسنج AvaSpec-ULS3648 StarLine

۲- رابط SMA: فیبری که نور را جهت بررسی آنالیزی انتقال میدهد با یک رابط به وروردی مرتبط خواهد شد که برای پیکربندیهای مختلف، انواع متنوعی را نیز شامل می شود. در طیف سنج مورد استفاده این اتصال یک SMA است.

۳- عنصر پراکنده کنندهی توری: این عنصر پراکنده کننده در طیفسنج، نور را به طول موجهای تشکیل دهندهی آن تجزیه می کند. توری ردیفی از شیارهای موازی با فاصلههای یکسان شکل گرفته در یک پوشش منعکس کننده روی یک بستر مناسب را تشکیل می دهد.

۴- شکاف، مد نواری: اندازهی شکاف ورودی یک پارامتر کلیدی در تعیین وضوح و توان سیستم نوری میباشد. نوارها از ورود نور نامطلوب و ناخواسته روکش فلزی فیبر به داخل طیفسنج جلوگیری میکنند.

۵- دومین مد نواری: همانطور که در مورد قبلی نیز اشاره شده است مد نواری از ورود نور نامطلوب و ناخواسته روکش فلزی فیبر به داخل طیفسنج جلوگیری میکند. ۶- آینه یموازی ساز: آینه یموازی ساز نور وروری از شکاف وروردی را به سمت توری تنظیم می کند.

۷- آینه متمر کز کننده: آینه متمر کز کننده نور تجزیه شده بوسیله یتوری را منعکس
 کرده و بر روی آرایه آشکارساز متمر کز می کند.

۸- دامهای نور: دامهای متمرکز کنندهی سهموی مرکب، طراحیهای منحصر به فردی دارند
 و نور ناخواسته و نامطلوبی ایجادکنندهی خوانشهای نادرست در طیفسنج را به دام می اندازند.
 ۹- دامهای نور که در مورد قبل توضیح داده شده است.

۱۰- لنزهای موازی ساز آشکارساز - فرابنفش/ مرئی: نور را روی آرایهی آشکارساز متمرکز می-کنند و همچنین حساسیت طیفسنج را افزایش میدهند.

۱۱- فیلتر: در بعضی از حالتها یک فیلتر پوششی مرتب ساز برای جلوگیری از ورود نور نامطلوب ولگرد به آشکارساز لازم است که این نور منجر به خوانش نادرست می شود.

۳-۸-۳ فیبرهای اپتیکی

استفاده از فیبرهای اپتیکی بعنوان هدایت کنندهی نور یک پیمانهی بزرگ و قابل انعطافی را در راه اندازی یک سیستم اندازه گیری نوری مهیا میسازد. فیبرهای نوری از مواد زیادی همچون پلاستیک، شیشه و سیلیکات (sio2) ساخته میشوند. برای کیفیت بالای فیبر نوری به منظور استفاده در برنامههای کاربردی، سیلیس ذوب شدهی مصنوعی (آمورفهای دی اکسید سیلیکون)^۱ استفاده میشوند. اصل اساسی انتقال نور از میان یک فیبر نوری، بازتاب داخلی کلی میباشد. این بدین معنی است که نور داخل روزنهی فیبر،

¹ Amorphous Silicon Dioxide

منعکس شده و از داخل فیبر عبور میکند. شکل (۳–۱۶) یک رابط SMA فیبر نوری را نشان میدهد. همچنین شکل (۳–۱۷) نمایانگر فیبر نوری مورد استفاده در آزمایشگاه شاهرود میباشد.



شکل (۳–۱۶) رابط SMA فیبرنوری



شکل (۳–۱۷) فیبرنوری آزمایشگاه شاهرود

۳-۸-۴ لنزهای موازی کننده

لنزهای موازی کننده به منظور تبدیل پرتوهای واگرای نور به پرتوهای موازی استفاده می شوند. Avantes لنزهای موازی سازی را برای ناحیهی طول موجی ۲۵۰۰ – ۲۰۰ بهینه سازی کرده است که این لنزها بدنه آلومینیومی آنودیزه شدهای را دارا می باشند. در این پژوهش از COL-UV/VIS با قطر لنز mm ۶ استفاده شده است. شکل (۳–۱۸) یک COL-UV/VIS را نشان می دهد.



شکل (۳–۱۸) لنز موازی کنندهی COL-UV/VIS

۹–۳ مفسر

طیفسنجها میتوانند خروجی خود را بصورتهای مختلف نمایش دهند اما متداول تر است که آن را به کامپیوتر وصل کرده و برای آنالیز دادهها از نرم افزار استفاده کنند و اطلاعات را بصورت قابل کاربردی و تحلیلی مانند نموداری از مقدار نشر یا مقدار جذب برحسب طول موج نمایش دهند. شکل (۳–۱۹) فضای برنامهی نرم افزاری مربوط به دستگاه طیفسنجی مورد استفاده در آزمایشگاه شاهرود را نشان میدهد. محور افقی این نرم افزار طول موج هر خط طیفی برحسب نانومتر و محور عمودی شدت تابش نشری برای هر خط طیفی را نشان میدهد.

Start Single Dark Reference Measurement (all devices)	Acto Centigue Options No Sync. Tools - Spectrum SpectrumO TimeSeries Insidence Activitions	
Experiment Information	Spectrum 1	
p NameAccation	Home Ele Tools	0
-reads	Image: Sevent and the sevent	
150507401	Spectral Data Measure Mode Scale Options Display Splining	-
	65000	
Integration Time [ms]: 59.28	60000	
Harmonia I.	55000	
Measurements 0	50000 Cancel	
	45000 Eind Peak	
	Find valley FWHM	
	g 35000	
	Clear all	induced of the second
STREET, STREET	8 25000	
	20000	mail of particular the
	15000	1 15 1 100
	10000	
	5000	
	0 320 340 360 380 400 420 440 450 500 520 540 560 500 600 620 640 660 660 706 728 740 760 7 Wavneegts [wav	00 800 820 \$40 MB 880

شکل(۳-۱۹) فضای برنامهی نرم افزاری مربوط به سیستم طیفسنج آزمایشگاه شاهرود

۳-۱۰ نحوهی انجام آزمایش

در این پژوهش به منظور مطالعهی پلاسمای تخلیهی الکتریکی نورانی dc در ابتدا شدت تابش نشری طیف پلاسمای ایجاد شدهی آرگون در جریانهای مختلف و با فشار ثابت مورد بررسی قرار میگیرد. سپس به بررسی شدتهای طیفهای ایجاده شده در ولتاژهای مختلف با فشار ثابت پرداخته میشود. در ادامه به بررسی و اندازه گیری دما و چگالی الکترون در شرایط مختلف با استفاده از تکنیک نسبت شدت دو خط و معادلات حاکم بر مدل کرونای بیان شده در فصل دوم پرداخته شده است. برای انجام پژوهش، در ابتدا سیستم توسط پمپ روتاری دومرحلهای تخلیه شد و فشار پایه یدستگاه تخلیه تا ۲۰۳۴ torr رسید. سپس گاز آرگون توسط شیر سوزنی بطور پیوسته به سیستم تزریق شد و پلاسمای ایجاد شده در تیوب مشاهده شد. جدول(۳–۲) مقادیر ولتاژ و جریان اعمالی مورد استفاده در این آزمایش را نشان می دهد. قابل ذکر است که فشار استفاده شده در این پژوهش ۲/۰ و ۲/۰ تور میباشد. همچنین منظور از ولتاژ پلاسما، ولتاژ امست که فشار استفاده شده در این پژوهش ۲/۰ و ۲/۰ تور میباشد. همچنین منظور از ولتاژ پلاسما، ولتاژ است که فشار استفاده شده در این پژوهش ۲/۰ و ۲/۰ تور میباشد. همچنین منظور از ولتاژ پلاسما، ولتاژ است که فشار استفاده شده در این پژوهش ۲/۰ و ۲/۰ تور میباشد. همچنین منظور از ولتاژ پلاسما، ولتاژ است که فشار استفاده شده در این پژوهش ۲۰ و ۲۰ تور میباشد. همچنین منظور از ولتاژ پلاسما، ولتاژ است که فشار استفاده شده در این پژوه ولتاژ خود پلاسمای ستون مثبت تخلیه ی الکتریکی نورانی نیازمند استفاده از ابزار پیشرفته همانند پروب ولتاژ، پروب لانگمور و ... میباشد که در محدوده ی این پایان نامه نمی گنجد.

جريان (mA)	ولتاژ(kV)
•/۵	• /٨
١	۱/۶
١/۵	۲/۴
٢	٣/٢

جدول (۳–۲) شرایط انجام آزمایشها

فصل چهارم

اندازه گیری و نتایج

۴- فصل چهارم: اندازه گیری و نتایج

۴-۱ مقدمه

در این فصل به بررسی مشاهدات آزمایشگاهی دستگاه تخلیهی الکتریکی نورانی dc دانشگاه صنعتی شاهرود و همچنین تحلیل نتایج اندازه گیریهای بدست آمده، پرداخته شده است. درابتدای این فصل آزمایشات و نتایج اولیهی عملکرد دستگاه بیان میشود. در ادامه نتایج حاصل از بررسی اثر جریان و ولتاژ بر شدت طیفی چند خط مورد نظر در فشارهای ثابت گزارش داده میشود. در انتهای این فصل به محاسبهی اندازه دمای الکترونی و چگالی الکترونی در جریانهای متغیر و همچنین در ولتاژهای متغیر با استفاده از تکنیک نسبت شدت دو خط در مدل کرونا پرداخته شده و نمودارهای حاصل و نتیجه گیری نهایی نیز آورده شده است.

۲-۴ آزمایشات اولیه جهت بررسی عملکرد دستگاه

در بررسی عملکرد دستگاه تخلیهی الکتریکی نورانی، بخش اولیهی آزمایشات با فشار torr ۰/۲ و جریان ۱/۵ mA برای گاز آرگون انجام گرفته شده است. شکل (۴–۱) تصویری از تیوب تخلیه را تحت این شرایط نشان میدهد. همانطور که در این تصویر مشاهده میشود ستون مثبت مورد بحث در این پایان نامه بخش اعظمی از تیوب تخلیه را به خود اختصاص داده است.



شکل (۴-۱) تیوب تخلیهی الکتریکی نورانی dc در فشار ۲۰۲۲ or و جریان mA ۱/۵ mA

طیفسنجی انجام شده تحت این شرایط و توسط دستگاه طیفسنج StarLine AvaSpec-ULS3648 در شکل (۴-۲) آورده شده است.



شکل (۴-۲) طیف نشری ستون مثبت در فشار torr ۰/۲ و جریان MA ۱/۵ mA

خطوط طیفی غالب مشاهده شده برای گاز آرگون تحت شرایط آزمایشگاهی مذکور دارای طول موج-های ۶۹۶/۵۴، ۷۹۶/۷۹، ۷۳۸/۳۸، ۷۵۰/۴۲، ۷۵۳/۵۱، ۷۷۲/۳۸، ۷۹۴/۸۲ نانومتر میباشند. که این طول موجها مرتبط با اتم خنثی آرگون با بار یونی صفر میباشد. شکل (۴–۳) اطلاعاتی از ترازهای انرژی تعدادی از خطوط طیفی آرگون را نشان میدهد. در این پژوهش از چهار خط طیفی با طولموج های ۶۹۶/۵۴، ۷۲۶/۷۹، ۷۳۸/۳۸، ۷۵۰/۴۲ نانومتر استفاده شده است. در ابتدا شدت این خطوط طیفی در فشار ۱/۲torr و جریانهای ۵/۰، ۱، ۱/۵، ۲ میلی آمپر اندازه گیری شده است. در ادامه به اندازه گیری شدت خطوط طیفی با طول موجهای انتخابی، در فشار ثابت ۰/۴torr و ولتاژهای ۸/۰، ۱/۶، ۲/۴، ۲/۲ کیلو ولت پرداخته شده است.



شکل (۴–۳) اطلاعاتی از ترازهای انرژی خطوط طیفی آرگون[۶۶]

۴-۳ تغییرات شدت خطوط طیفی برحسب تغییرات جریان

شکل (۴-۴) نمودار تغییرات شدت خطوط طیفی برای چهار طول موج ۶۹۶/۵۴، ۷۰۶/۷۹، ۷۳۸/۳۸، ۷۳۸/۳۸، ۲۵۰/۴۲ نانومتر را برحسب تغییرات جریان در فشار ۲۰۲۲ نشان میدهد.



شکل (۴-۴) تغییرات شدت خطوط طیفی برحسب تغییرات جریان در فشار torr /۲

همانطور که مشاهده می شود با افزایش جریان، شدت تابشی خطوط طیفی نیز افزایش می یابد که دلیل این امر افزایش چگالی الکترونهای موجود در تیوب است که با جریان الکتریکی رابطهی خطی دارد.

۴-۴ تغییرات شدت خطوط طیفی برحسب تغییرات ولتاژ

شکل (۴–۵) نمودار تغییرات شدت خطوط طیفی با طول موجهای ۶۹۶/۵۴، ۷۰۶/۲۹، ۷۳۸/۳۸، ۷۳۸/۴۲ ۷۵۰/۴۲ نانومتر را برحسب تغییرات ولتاژ در فشار ۱/۴ torr ۰/۴ نشان میدهد. همانطور که در شکل مشاهده میشود با افزایش ولتاژ شدت تابشی مرتبط با هر خط طیفی افزایش می یابد که دلیل این امر افزایش سرعت الکترونهای موجود در تیوب و افزایش نرخ برانگیختگی میباشد.



شکل (۴-۵) تغییرات شدت خطوط طیفی برحسب تغییرات ولتاژ در فشار ۰/۴ torr

۴-۵ تغییرات نسبت شدت دو خط طیفی برحسب تغییرات جریان

اندازه گیری نسبت شدت دو خط طیفی به منظور محاسبه ی دما و چگالی الکترونی در مدل کرونا با استفاده از روش نسبت شدت دو خط، مورد نیاز است. معمولاً در روش های طیف سنجی این دو خط، نزدیک به هم انتخاب می شوند. در این پژوهش نسبت شدت دو خط نزدیک به هم ۶۹۶/۵۴ و ۷۰۶/۲۹ نانومتر و همچنین دو خط ۸۳/۸۳ و ۷۵۰/۴۲ نانومتر بررسی شده است. شکل (۴–۶) نمودار تغییرات نسبت شدت هر سری از این خطوط طیفی را بر حسب تغییرات جریان در فشار ۲۰۲۲ /۰ نشان می دهد.



شکل (۴-۶) نمودار تغییرات نسبت شدت دو خط طیفی برحسب تغییرات جریان در فشار ۲۰۲۲ /۲

همانطور که مشاهده می شود با افزایش جریان تخلیه نسبت شدت خطوط طیفی نیز بدلیل افزایش شدت هر کدام از این خطوط افزایش می یابد.

۴-۶ تغییرات نسبت شدت دو خط طیفی برحسب تغییرات ولتاژ

شکل (۴-۷) نمودار تغییرات نسبت شدت خطوط طیفی مورد استفاده در این پژوهش را برحسب تغییرات ولتاژ در فشار ۰/۴ torr نشان میدهد.



شکل (۴-۷) نمودار تغییرات نسبت شدت دو خط طیفی برحسب تغییرات ولتاژ در فشار torr ۱/۴ torr

همانطور که مشاهده میشود نسبت شدت خطوط طیفی نیز بدلیل افزایش شدت هر کدام از خطوط طیفی با افزایش ولتاژ، افزایش مییابد.

۴-۷ اندازه گیری دمای الکترون و تغییرات آن برحسب تغییرات جریان

۴–۷–۱ بوسیلهی نسبت شدت خطوط طیفی ۶۹۶/۵۴ و ۷۰۶/۷۹ نانومتر

شکل (۴–۸) نمودار تغییرات دمای الکترونی بدست آمده با استفاده از نسبت شدت دو خط طیفی با طول موجهای ۶۹۶/۵۴ و ۷۰۶/۷ نانومتر را بر حسب تغییرات جریان نشان میدهد. این تغییرات در فشار ثابت ۲۰۲۲ کزارش داده شده است. این اندازه گیری با استفاده از حل معادلهی (۱۸–۲) بدست آمده است. همچنین قابل ذکر است که دمای الکترون تابعی غیرصریح از نسبت شدت دو خط طیفی است که اندازه-گیری آن نیازمند حل معادلاتی با روشهای عددی میباشد. در این پژوهش محاسبات مربوطه با استفاده از نرم افزار متلب انجام شد.



شکل (۴–۸) نمودار تغییرات دمای الکترون برحسب تغییرات جریان با استفاده از نسبت شدت دو خط طیفی با طول موجهای ۶۹۶/۵۴ و ۷۰۶/۷۹ نانومتر در فشار torr /۰

۴–۷–۲ بوسیلهی نسبت شدت خطوط طیفی ۷۳۸/۳۸ و ۷۵۰/۴۲ نانومتر

شکل (۴–۹) نمودار تغییرات دمای الکترون بدست آمده با استفاده از نسبت شدت دو خط طیفی با طول موجهای ۷۳۸/۳۸ و۷۵۰/۴۲ نانومتر را برحسب تغییرات جریان نشان میدهد. این تغییرات در فشار ثابت ۰/۲ torr گزارش داده شده است.



شکل (۴–۹) نمودار تغییرات دمای الکترون برحسب تغییرات جریان با استفاده از نسبت شدت دو خط طیفی با طول موجهای ۷۳۸/۳۸ و ۷۵۰/۴۲ نانومتر در فشار ۰/۲torr

همانطور که در شکل نیز مشاهده می شود با افزایش جریان، نرخ برانگیختگی و در نتیجه نسبت شدت تابشی مربوط به خطوط طیفی افزایش یافته و همین امر منجر به تحرک بیشتر گونه های الکترونی و در نتیجه بالا رفتن میزان دمای آنها می شود. محدوده ی دمایی الکترون در فشار ۲/۰ تور برای تیوب تخلیه ی الکتریکی نورانی b در محدوده ی ۱ الکترون ولت بدست آمده است. که این مقدار با مقادیر پیش بینی شده برای تیوب تخلیه و بعلت اینکه بینی شده برای تیوب تخلیه و الکترون و در فشار v/r و در محدوده ی دمایی الکترون در فشار v/r و برای تیوب تخلیه ی الکتریکی نورانی b در محدوده ی دمایی الکترون ولت بدست آمده است. که این مقدار با مقادیر پیش $v_{e} = \left(\frac{2kT_{e}}{m_{e}}\right)^{1/2}$

۴–۸ اندازه گیری دمای الکترونی و تغییرات آن برحسب تغییرات ولتاژ

۴–۸–۱ بوسیلهی نسبت شدت خطوط طیفی ۶۹۶/۵ و ۷۰۶/۷۹ نانومتر

شکل (۴–۱۰) نمودار تغییرات دمای الکترون بدست آمده با استفاده از نسبت شدت دو خط طیفی با طول موجهای ۶۹۶/۵۴ و ۷۰۶/۷۹ نانومتر را بر حسب تغییرات ولتاژ نشان میدهد. این تغییرات در فشار ثابت ۰/۴ torr گزارش داده شده است.



شکل (۴–۱۰) نمودار تغییرات دمای الکترونی برحسب تغییرات ولتاژ با استفاده از نسبت شدت دو خط طیفی با طول موجهای ۶۹۶/۵۴ و ۷۰۶/۷۹ نانومتر در فشار ۰/۴ torr

۴–۸–۲ بوسیلهی نسبت شدت دو خط طیفی ۷۳۸/۳۸ و ۷۵۰/۴۲ نانومتر

شکل (۴–۱۱) نمودار تغییرات دمای الکترون بدست آمده با استفاده از نسبت شدت دو خط طیفی با طول موجهای ۷۳۸/۳۸ و ۷۵۰/۴۲ نانومتر را بر حسب تغییرات ولتاژ در فشار ۰/۴ torr نشان میدهد.



شکل(۴–۱۱) نمودار تغییرات دمای الکترونی برحسب تغییرات ولتاژ با استفاده از نسبت شدت دو خط طیفی با طول موجهای ۷۳۸/۳۸ و۷۵۰/۴۲ نانومتر در فشار ثابت ۰/۴ torr

همانطور که در اشکال نیز مشاهده می شود دمای الکترونی در چنین فشاری و تحت اعمال پتانسیل های مذکور در محدوهی ۱۱ الکترون ولت بدست آمده است. افزایش ولتاژ تخلیه منجر به بالا رفتن میزان سرعت الکترونها و در نتیجه افزایش دمای الکترونی می شود.

۴-۹ اندازه گیری چگالی الکترون و تغییرات آن برحسب تغییرات جریان

۴–۹–۱ بوسیلهی نسبت شدت خطوط طیفی ۶۹۶/۵۴ و ۷۰۶/۷۹ نانومتر

چگالی الکترونی تخلیهی الکتریکی نورانی با استفاده از محاسبهی دمای الکترونی و معادلهی (۱۹-۲) بدست میاید. شکل (۴–۱۲) نمودار تغییرات چگالی الکترون بدست آمده با استفاده از نسبت شدت دو خط طیفی با طول موجهای ۶۹۴/۵۴ و ۷۰۶/۷۹ نانومتر را برحسب تغییرات جریان در فشار ۰/۲ torr نشان میدهد.



شکل (۴–۱۲) نمودار تغییرات چگالی الکترون برحسب تغییرات جریان با استفاده از نسبت شدت دو خط طیفی با طول موجهای ۶۹۶/۵۴ و ۷۰۶/۷۹ نانومتر در فشار ۰/۲ torr

۴–۹–۲ بوسیلهی نسبت شدت خطوط طیفی ۷۳۸/۳۸ و ۷۵۰/۴۲ نانومتر

شکل (۴–۱۳) نمودار تغییرات چگالی الکترون بدست آمده با استفاده از نسبت شدت دو خط طیفی با طول موجهای ۷۳۸/۳۸ و ۷۵۰/۴۲ نانومتر را برحسب تغییرات جریان در فشار ثابت ۷/۲ torr نشان میدهد.



شکل (۴–۱۳) نمودار تغییرات چگالی الکترون برحسب تغییرات جریان با استفاده از نسبت شدت دو خط طیفی با طول موجهای ۷۳۸/۳۸ و ۷۵۰/۴۲ نانومتر در فشار ۱۲۰۲ ۲۰۲۲

همانطور که مشاهده می شود چگالی الکترونی تیوب تخلیه در محدوده ی فشاری ۲۰۲۲ در حدود ۲۰^{۱۰}cm⁻³ بدست آمده است که این مقدار با مقادیر پیش بینی شده برای آن، سازگاری دارد. همچنین مشاهده می شود که با افزایش جریان تخلیه، چگالی الکترونی نیز بدلیل رابطهی مستقیم خطی با آن، افزایش می یابد.

۴-۱۰ اندازه گیری چگالی الکترون و تغییرات آن برحسب تغییرات ولتاژ

۴–۱۰–۱ بوسیلهی نسبت شدت خطوط طیفی۶۹۴/۵۴ و ۷۰۶/۷۹ نانومتر

شکل (۴–۱۴) نمودار تغییرات چگالی الکترون بدست آمده با استفاده از نسبت شدت دو خط طیفی با طول موجهای ۶۹۶/۵۴ و ۷۰۶/۷۹ نانومتر را برحسب تغییرات ولتاژ نشان میدهد. این تغییرات در فشار ثابت ۰/۴ torr گزارش داده شده است.



شکل (۴–۱۴) نمودار تغییرات چگالی الکترون برحسب تغییرات ولتاژ با استفاده از نسبت شدت دو خط طیفی با طول موجهای ۶۹۶/۵۴ و ۷۰۶/۷۹ نانومتر در فشار ۱۲۰۲

۴–۱۰–۲ بوسیلهی نسبت شدت خطوط طیفی ۷۳۸/۳۸ و ۷۵۰/۴ نانومتر

شکل (۴–۱۵) نمودار تغییرات چگالی الکترون بدست آمده با استفاده از نسبت شدت دو خط طیفی با طول موجهای ۷۳۸/۳۸ و ۷۵۰/۴ نانومتر را برحسب تغییرات ولتاژ در فشار ثابت torr ۰/۴ نشان میدهد.



شکل (۴–۱۵) نمودار تغییرات چگالی الکترونی برحسب تغییرات ولتاژ با استفاده از نسبت شدت دو خط طیفی با طول موجهای ۷۳۸/۳۸ و ۷۵۰/۴۲ نانومتر در فشار ۱/۴ torr

همانطور که مشاهده میشود با افزایش ولتاژ شدت تابشی خطوط طیفی نیز افزایش مییابد و بدلیل اینکه شدت خط A_{pq} بصورت معادلهی (۱–۴) بیان میشود[۵۱] چگالی الکترونی نیز افزایش مییابد.

$$I_{pq} = N_e N < Q_{pq}(\nu_e)\nu_e >$$
(*-1)

در این معادله v_e سرعت الکترون است. Q_{pq} سطح مقطع برانگیختگی برای انتقال p - q میانگین گیری شده در سراسر توزیع انرژی میباشد. N_e برابر با چگالی الکترون و N برابر با چگالی اتمهای گاز مورد استفاده است.
۴–۱۱ نتیجهگیری

همانطور که در این پژوهش مشاهده گردیده است شدت خطوط طیفی ستون مثبت تخلیهی الکتریکی نورانی dc گاز آرگون متأثر از عواملی نظیر جریان و پتانسیل تخلیه میباشد. با افزایش جریان تخلیه، شدت خطوط طبق معادلهی (۱–۴) بهدلیل افزایش چگالی الکترون افزایش مییابد. همچنین با افزایش ولتاژ تخلیه و در نتیجه بالا رفتن نرخ برانگیختگی، شدت خطوط نیز افزایش مییابد. این نتایج برای نسبت شدتهای خطوط طیفی نیز برقرار است. در این پایان نامه به منظور محاسبهی دما و چگالی الکترونی بدلیل محدودهی پایین چگالی الکترونی آورده شده در مراجع برای تخلیهی الکتریکی نورانی dc طیفی نشری باز مدل کرونا استفاده شده است. همچنین در راستای این اهداف، تکنیک نسبت شدت دو خط طیفی نشری بکار گرفته شد. محدودهی دمای الکترون V9 ۵/۱-۱ و چگالی الکترون ^{3-۱} ۲۰۱ گزارش داده شده است که این اعداد بدست آمده با جداول مراجع مطابقت میکنند. همچنین با افزایش جریان و ولتاژ تخلیه بدلیل افزایش نرخ برانگیختگی و سرعت گرمایی الکترون، دمای الکترونی نیز افزایش مییابد. همچنین مشاهده شده است که این اعداد

ييشنهادات

شبیه سازی حرکت ذرات در ناحیهی ستون مثبت تخلیهی الکتریکی نورانی dc اندازه گیری ولتاژ ستون مثبت تخلیهی الکتریکی نورانی dc بوسیلهی پروب لانگمویر مقایسه دما و چگالی الکترونی نواحی ستون مثبت و درخشندگی منفی در تخلیهی الکتریکی نورانیdc مطالعهی تاثیر فشار تخلیه بر دما و چگالی الکترونی ناحیهی ستون مثبت تخلیهی الکتریکی نورانیdc [1] Zhu h X. M. and Pu Y. K. (2008) "Using OES to determine electron temperature and density in low-pressure nitrogen and argon plasmas" Plasma Sources Science and Technology., 17, 2, pp 240.

[2] Crintea D. L., Czarnetzki U., Iordanova S. and Koleva I. (**2009**) "Plasma diagnostics by optical emission spectroscopy on argon and comparison with Thomson scattering" **Journal of Physics Applied Physics.**, **42**, **4**.

[3] Shrestha R., Tyata R. B. and Subedi D. P. (2013) "Estimation of electron temperature in atmospheric pressure dielectric barrier discharge using line intensity ratio method" Kathmandu University Journal of Science, Engineering and Technology., 8, 2, pp 37.

[4] Yubero C., Garcia M. C., Varo M. and Martinez P. (**2013**) "Gas temperature determination in microwave discharges at atmospheric pressure by using different Optical Emission Spectroscopy techniques" **Spectrochimica Acta Part B:Atomic Spectroscopy.**, **90**, pp **61**.

[5] Hassouba M. A. and Dawood N. (2014) "A Comparative Spectroscopic Study on Emission Characteristics of DC and RF Discharges Plasma using Different Gases" Life Science Journal., 11, 9.

[6] Roth J. (1995), **"Industrial Plasma Engineering"**., Vol. 1, Department of Electrical and Computer Engineering University of Tennessee, Knoxville

[7] Nehra V., Kumar A. and Dwivedi H. K. (2008) "Atmospheric non-thermal plasma sources" International Journal of Engineerin., 2, 1, pp 53.

[8] Chen.f.f. (1986), "introduction to plasma physics and controlled fusion", Vol. 1, springer, New York. Second edition

[9] Braithwaite N. S. J. (2000) "Introduction to gas discharges" Plasma sources science and technology., 9, 4, pp 517.

[10] Conrads H. and Schmidt M. (2000) "Plasma generation and plasma sources" Plasma Sources Science and Technology., 9, 4, pp 441.

[11] Soderstrom D., (2008), PhD. thesis, "Modelling and Applications of the Hollow Cathode Plasma". Uppsala university.

[12] Piel A. (2009), "Plasma Physics, An Introduction to Laboratory, Space, and Fusion Plasmas", springer, New York.

[13] Samanta K., Jassal M. and Agrawal A. K. (**2006**) "Atmospheric pressure glow discharge plasma and its applications in textile" Indian Journal of Fibre and Textile Research, **31**, **1**, pp **83**.

[14] Kogelschatz U. (**2003**) "Dielectric-barrier discharges: their history, discharge physics, and industrial applications" Plasma chemistry and plasma processing., **23**, **1**, pp. **1**.

[۱۵]رستمی. م، گنجویی. ع، شجاعی. ف و فلاحت. ا، (۱۳۹۵)، "طیف سنجی پلاسمای سد دی الکتریک مخلوط نیتروژن و آرگون در فشار اتمسفری"، کنفرانس مهندسی و فیزیک پلاسما، ص ۲۸۳، یزد

[16] Conrad H. and Schmidt M. (2000) "Plasma generation and plasma sources" Plasma Sources Science and Technology., 9, 4, pp 441.

[17] Lisovskiy V. A., Yakovin S. D. and Yegorenkov V. D. (2000) "Low-pressure gas breakdown in uniform dc electric field" Journal of Physics D: Applied Physics, 33, 21, pp 2722.

[18] Lisovskiy V. A., Koval V. A., Artushenko E. P. and Yegorenkov V. D. (**2012**) "Validating the Goldstein–Wehner law for the stratified positive column of dc discharge in an undergraduate laboratory" **European Journal of Physics.**, **33**, **6**, pp **1537**.

[19] Yuhui Zh., (1995), PhD. thesis, "a spectraLa study of excitation processes in a glow discharge", Chemistry. Depart. Albert university.

[20] Caroli S. (**1987**) "Low-pressure discharges: fundamental and applicative aspects" A review. Journal of Analytical Atomic Spectrometry., **2**, **7**, pp **661**.

[21] Wissel S. A., Zwicker A., Ross J. and Gershman S. (**2013**) "The use of dc glow discharges as undergraduate educational tools" **American Journal of Physics.**, **81**, **9**, pp 663.

[22] Czarnetzki U., Schulze J., Schungel E. and Donko Z. (2011) "The electrical asymmetry effect in capacitively coupled radio-frequency discharges" Plasma Sources Science and Technology., 20, 2.

[23] Bogaerts A., Neyts E., Gijbels R. and Mullen J. (2002) "Gas discharge plasmas and their applications" **Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy.**, **57**, **4**, pp **609**.

[24] Hopwood J. (1992) "Review of inductively coupled plasmas for plasma processing" Plasma Sources Science and Technology., 1, 2, pp 109.

[25] Afshari R. and Hosseini H. (**2013**) "Non-thermal plasma as a new food preservation method, Its present and future prospec" **Journal of Paramedical Sciences**., **5**, **1**.

[26] Gleizes A., Gonzalez J. J. and Freton P. (**2005**) "Thermal plasma modelling" **Journal of Physics D: Applied Physics.**, **38**, **9**.

[27] Petitpas G., Rollier J. D., Darmon A., Gonzalez J. and Metkemeijer R. (2007) "A comparative study of non-thermal plasma assisted reforming technologies" International Journal of Hydrogen Energy., 32, 14, pp 2848.

[28] Tendero C., Tixier C., Tristant P., Desmaison J. and Leprince P. (**2006**) "Atmospheric pressure plasmas: A review" **Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy.**, **61**, **1**, pp **30**.

[29] Bogaerts A. (**1999**) "The glow discharge: an exciting plasma" **Journal of Analytical Atomic Spectrometry.**, **14**, **9**, pp, **1375**.

[30] Lange B., Matschat R. and Kipphard H (2007) "Enhancement of intensities in glow discharge mass spectrometry by using mixtures of argon and helium as plasma gases" Analytical and bioanalytical chemistry., 389, 7, pp 2287.

[31] Thiyagarajan M., Sarani A. and Nicula C. (**2013**) "Optical emission spectroscopic diagnostics of a non-thermal atmospheric pressure helium-oxygen plasma jet for biomedical applications" **Journal of Applied Physics.**, **113**, **23**.

[32] Qayyum A., Zeb S., Naveed M. A., Rehman N. U., Ghauri S. A. and Zakaullah M. (2007) "Optical emission spectroscopy of Ar–N2 mixture plasma" Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer., 107, 3, pp 361.

[33] Lee C. G., Kanarik K. J. and Gottscho R. A. (**2014**) "The grand challenges of plasma etching:a manufacturing perspective" **Journal of Physics D: Applied Physics.**, **47**, **27**.

[34] Little C. E. (**1996**) "Metal Vapour Ion Lasers: Kinetic Processes and Gas Discharges", pp **300** ISBN 0-471-95563-9.

[35]Kireev S. V., Shnyrev S. L., Simanovsky I. G. and Suganeev S. V. (**2014**) "Fluorescence of iodine-127 and iodine-129 isotopes excited by radiation of copper vapor laser (510.6 nm)" Laser Physics Letters., **11**, **7**.

[36] Tseng A. A. (2007) "Recent developments in micromachining of fused silica and quartz using excimer lasers" physica status solidi (a)., 204, 3, pp 709.

[37] Steen W. M. (2003) " Laser material processing an overview" Journal of Optics A: Pure and Applied Optics., 5, 4.

[38] Boeuf J. P. (2003) "Plasma display panels: physics, recent developments and key issues" Journal of physics D: Applied physics., 36, 6, R 53.

[39] Parker A.,(1996) PhD. thesis, "characterization of a radio frequency powered glow discharge device by atomic absorption and atomic emission spectrometries", Clemson University.

[40] Marcus R.K.,(1993), "Glow Discharge Spectroscopies", Springer Science.

[41] Quarles Ch.D,(2011) PhD. Thesis," particle beam glow discharge spectroscopy as a tool for speciation and metallomics analysis", Clemson university.

[42] Gijbels R.(1996) PhD. Thesis,"Mathematical modeling of a direct current glow discharge in argon", Scheikunde, depart., Antwerpen University.

[43] Rashkovan V. M. and Ponomaryova I. A. (2005) "Optical and probe measurements of the hollow cathode plasma" Journal of Physics D: Applied Physics., 38, 16, pp 2817.

[44] Bogaerts A. (2007) "Plasma diagnostics and numerical simulations: insight into the heart of analytical glow discharges" Journal of Analytical Atomic Spectrometry., 22, 1, pp 13.

[45] Bogaerts A. and Gijbels R. (**1998**) "Fundamental aspects and applications of glow discharge spectrometric techniques" **Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy.**, **53**, **1**, pp **1**.

[46] Bogdanov E. A., Demidov V. I., Kudryavtsev, A. A., and Saifutdinov A. I. (2015) "Is the negative glow plasma of a direct current glow discharge negatively charged?" Physics of Plasmas., 22, 2.

[47] Kagan Y. M., Cohen C. and Avivi P (**1988**) "The Faraday dark space of a He glow discharge" Journal of applied physics., **63**, **1**, pp **60**.

[48] Cicala G., DeTommaso E., Raino A. C., Lebedev Y. A. and Shakhatov V. A. (**2009**) "Study of positive column of glow discharge in nitrogen by optical emission spectroscopy and numerical simulation" **Plasma Sources Science and Technology.**, **18**, **2**.

[49] Golubovski Y. B., Skoblo A. Y., Wilke C., Kozakov R. V., Behnke J. and Nekutchaev V. O.
(2005) "Kinetic resonances and stratification of the positive column of a discharge" Physical Review E, 72, 2.

[50] Gnybida M., Loffhagen D. and Uhrlandt D. (2009) "Fluid modeling and analysis of the constriction of the dc positive column in argon" IEEE Transactions on Plasma Science., 37, 7, pp 1208.

[51] Garamoon A. A., Samir A., Elakshar F. F., Nosair A. and Kotp E. F. (**2007**) "Spectroscopic study of argon DC glow discharge" IEEE transactions on plasma science., **35**, **1**, pp **1**.

[52] Donnelly V. M. (2004) "Plasma electron temperatures and electron energy distributions measured by trace rare gases optical emission spectroscopy" Journal of Physics D: Applied Physics., 37, 19.

[53] Hebner G. A., Miller P. A. and Woodworth J. R. (2000), "Handbook of Advanced Plasma **Processing Techniques**", Springer, Berlin Heidelber, PP. 146.

[54] Fantz U. (2006) "Basics of plasma spectroscopy" Plasma Sources Sci. Technol, 15, PP 137.

[55] Kolpakova A., Kudrna P. and Tichy M. (2011) "Study of plasma system by OES (optical emission spectroscopy" In Proc. of 20th Annual Conference of Doctoral Student, pp 180.

[56] Yubero C., Garcia M. C., Varo M. and Martine P. (**2013**) "Gas temperature determination in microwave discharges at atmospheric pressure by using different Optical Emission Spectroscopy techniques" **Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy**., **90**, pp **61**.

[57] Lee W., Park K., Kwon D. H. and Oh C. H. (**2016**) "Optical diagnostics with radiation trapping effect in low density and low temperature helium plasma" **Physics of Plasmas.**, **23**, **6**.

[58] Zhu X. M. and Pu Y. K. (**2010**) "Optical emission spectroscopy in low-temperature plasmas containing argon and nitrogen: determination of the electron temperature and density by the line-ratio method" **Journal of Physics D: Applied Physics.**, **43**, **40**.

[59] Tian-Ye N., Jin-Xiang C., Lei L., Jin-Ying L., Yan W., Liang W. and You L. (**2007**) "A comparison among optical emission spectroscopic methods of determining electron temperature in low pressure argon plasmas" Chinese Physics., **16**, **6**, pp **2757**.

[60] Boivin R. F., Kline J. L. and Scime E. E. (**2001**) "Electron temperature measurement by a helium line intensity ratio method in helicon plasmas". Physics of Plasmas., **8**, **12**, pp **5303**.

[61] Goto M. and Sawada K. (**2014**) "Determination of electron temperature and density at plasma edge in the Large Helical Device with opacity-incorporated helium collisional-radiative model" Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer., **137**, pp **23**.

[62] Ochkin V. N. (2009), "Spectroscopy of low temperature plasma", WILEY-VCH.

[63] Podder N. K., Johnson J. A., Raynor C. T., Loch S. D., Balance C. P. and Pindzola M. S.(2004) "Helium line intensity ratio in microwave-generated plasmas" Physics of Plasmas., 11, 12, pp 5436.

[64] Kunze H. J. (**2009**) "Introduction to plasma spectroscopy", Vol. 56, Springer Science and Business Media.

[65] Meda A., Ruo-Berchera I., Degiovanni I. P., Brida G., Rastello M. L. and Genovese M. (2014)"Absolute calibration of a charge-coupled device camera with twin beams" Applied Physics Letters., 105, 10.

[66] Boffard J. B., Jung R. O., Lin C. C., and Wendt A. E. (**2009**) "Measurement of metastable and resonance level densities in rare-gas plasmas by optical emission spectroscopy" **Plasma Sources Science and Technology.**, **18**, **3**.

Abstract

Non-thermal plasmas in dc glow discharges are generally created in closed discharge vessels using interior electrodes. DC glow discharges and related plasmas have been used in a large number of scientific fields more than a century. Their use as a spectroscopic source for analytical chemistry is only one application; they are much more widely used for other purposes, such as in the microelectronics industry and in materials technology, and also as lasers, various kinds of light sources, and plasma displays. DC glow discharge can be subdivided into various regions between cathode and anode. The actual position and the occurrence of the various regions depend on the discharge parameters, like pressure, voltage, current, kind of gas and distance between cathode and anode. One of these areas is positive column. Positive column is a region that is quasi-neutral, and is what Irving Langmuir had in mind when he defined plasma. Various parameters involved in the optimization of dc glow discharge devises. Electron density and electron tempreture are two of most fundamental parameters in gas discharge and play very important roles in understanding discharge physics and optimization of operation of plasmas. Different methods are available to measure electron density and electron temperature of which most commonly used are Langmuir probe, microwave interferometer, laser Thomson Scattering and optical emission spectroscopy. In between these methods, optical emission spectroscopy is most popular technique, because of it is simple and it is produces no perturbation in plasma. In this thesis, emission spectra, electron tempreture and electron density of positive column region of dc glow discharge have been measured at different currents and potentiales.

Key Words: dc glow discharges, Positive column, electron tempreture, electron density, optical emission spectroscopy



Facultry of Physics and Nuclear Engineering

M.Sc.Thesis in Atomic and Molecular Physics

Study of the plasma parameters such as density, electron temperature and plasma potential in electrical discharge

By:Fereshteh Falahi

Supervisor(s):

Dr. M.Momeni

Dr. S.E.Hosseini

Fourier 2017