

10.10.17  
10.10.17



10.10.17



دانشگاه شهید بهشتی

پژوهشکده لیزر و پلاسما

پایان نامه

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد فوتونیک

عنوان:

مطالعه غلاف پلاسما و برهمکنش آن با کاتد

دانشجو:

شرمینه رستمی

استاد راهنما:

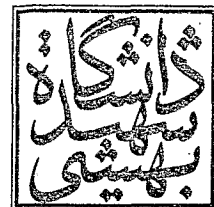
دکتر حمید رضا قمی

مرداد ۱۳۸۷

۱۰۸۰۲۶

فردا اطلاعات مدرک علمی را از  
سازمان اسناد و کتابخانه ملی  
استعلام فرمایید

۱۳۸۷ / ۱۰ / ۶



دانشگاه شهید بهشتی

تاریخ .....  
شماره .....  
پیوست .....

تهران ۱۹۸۳۹۶۳۱۱۳ اوین

تلفن: ۲۹۹۰۱

بسمه تعالی

« صور تجلسه دفاع از پایان نامه دانشجویان دوره کارشناسی ارشد »

بازگشت به مجوز دفاع شماره ۲۳۲۰+/۲۰+/ت/د مورخ ۸۷/۴/۵ جلسه هیأت داوران ارزیابی پایان نامه خانم شرمینه رستمی به شناسنامه شماره ۳۰۴۳ صادره از تهران متولد ۱۳۶۲ دانشجوی دوره کارشناسی ارشد ناپیوسته رشته فوتونیک

با عنوان: " مطالعه غلاف پلازما و برهمکنش آن با کاتود "

به راهنمایی: دکتر قمی مرزدشتی

طبق دعوت قبلی در تاریخ ۸۷/۵/۵ تشکیل گردید و براساس رأی هیأت داوری و با عنایت به ماده ۲۰ آئین نامه کارشناسی ارشد مورخ ۷۵/۱۰/۲۵ پایان نامه مزبور با نمره ۱۹/۲ و درجه عالی مورد تصویب قرار گرفت.

۱- استاد راهنما: دکتر قمی مرزدشتی

۲- استاد داور داخلی: دکتر توسلی

۳- استاد داور خارجی: دکتر قربانعلی

۴- نماینده تحصیلات تکمیلی پژوهشکده: دکتر نیکنام

تقدیم به

حامیان همیشگی زندگی زندگیم، پدر و مادر عزیزم

هر اثر که تنها با نام یک فرد ثبت می شود، در واقع حاصل همیاری و همدلی جمعی است که کم لطفی است اگر نامی از آنها برده نشود.

به پایان رسیدن این مطالعات بیش از هر چیز مرهون زحمات استاد عزیزم "دکتر حمید رضا قمی" است. حضور ایشان همواره نه تنها به عنوان یک راهنما بلکه به عنوان یک دوست باعث دلگرمی من در پیمودن این مسیر بود.

از دیدگاه من، پژوهشکده لیزر و پلاسما بدون اغراق کم نظیر ترین محیط علمی است که فضای همکاری بسیار صمیمانه ای بر آن حاکم است. هر مشکلی یا هر نیازی، اگر راهی داشته باشد، با همکاری دیگر اعضای آن بدون شک، حل خواهد شد.

دکتر سید حسن توسلی و اعضای گروهشان نمونه ی بارزی از افراد همراه در پژوهشکده لیزر هستند که بخش تجربی این کار بدون همکاری آنها به نتیجه ی مطلوب نمی رسید.

همچنین همکاران و دوستانم که در آزمایشگاه مانند اعضای یک خانواده همراه من بوده و از هیچ کمکی دریغ نکردند. به ویژه دوستان عزیزم، سیما صدریه و نسرين نواب صفا که در تک تک لحظه های تلخ و شیرین در کنارم بودند.

در آخر باید از دکتر رضا مسعودی که ریاست این پژوهشکده ی بی نظیر را بر عهده دارند، سپاسگزاری کنم. چرا که، پیگیری و کمکهای ایشان پشتوانه ی بسیار محکمی در طی این راه برای من بود.

فهرست مطالب

چکیده

مقدمه ..... ۱

فصل اول: تخلیه الکتریکی

- ۱-۱ مکانیزم کلی تخلیه الکتریکی ..... ۴
- ۲-۱ تقسیم بندی انواع تخلیه الکتریکی ..... ۷
- ۳-۱ ایجاد تخلیه الکتریکی ..... ۷
- ۴-۱ منحنی مشخصه ولتاژ- جریان ..... ۸
- ۵-۱ کاربردهای انواع تخلیه های الکتریکی ..... ۱۴
- ۱-۵-۱ تخلیه الکتریکی کرونا ..... ۱۴
- ۲-۵-۱ تخلیه الکتریکی نورانی ..... ۱۶
- ۳-۵-۱ تخلیه الکتریکی قوس الکتریکی ..... ۱۸
- ۶-۱ غلاف پلاسما ..... ۱۹
- ۱-۶-۱ توصیف ساده ای از غلاف پلاسما ..... ۱۹
- ۲-۶-۱ نگاهی اجمالی بر مطالعات انجام شده ..... ۲۰
- ۷-۱ طیف نگاری ..... ۲۱
- ۱-۷-۱ طبقه بندی روشها ..... ۲۱
- ۲-۷-۱ فرآیند اندازه گیری ..... ۲۲
- ۳-۷-۱ انواع متداول طیف نگاری ..... ۲۳
- ۴-۷-۱ طیف نگاری تابش اپتیکی تخلیه الکتریکی نورانی ..... ۲۵

فصل دوم: تخلیه الکتریکی نورانی

- ۱-۲ مکانیزم کلی تخلیه الکتریکی نورانی ..... ۲۶
- ۲-۲ فرآیندهای برخوردی داخل پلاسما ..... ۲۹
- ۱-۲-۲ برخوردهای الاستیک ..... ۲۹
- ۲-۲-۲ برخوردهای منجر به یونیزه یا برانگیخته شدن اتمهای آرگون ..... ۲۹
- ۳-۲-۲ یونیزاسیون و تحریک اتمهای کنده شده کاتد ..... ۳۱

۳۳	..... ۴-۲-۲ باز ترکیب یون مثبت- الکترون
۳۴	..... De-excitation ۵-۲-۲
۳۵	..... ۳-۲ فرآیندهایی که در محل دیواره ها رخ می دهند
۳۵	..... ۳-۲-۱ گسیل الکترونهاي ثانويه
۳۷	..... ۳-۲-۲ کندوپاش
۳۸	..... ۴-۲ مناطق مختلف تخلیه الکتریکی نورانی
۴۳	..... ۵-۲ تاثیر پارامترهای تخلیه الکتریکی بر مناطق مختلف

فصل سوم: غلاف پلاسما

۴۶	..... ۱-۳ مدل غلاف بوهمی
۴۶	..... ۱-۱-۳ حد غلاف بوهمی
۴۹	..... ۲-۳ غلاف ولتاژ بالا
۵۰	..... ۱-۲-۳ غلاف ماتریسی
۵۰	..... Child Law ۲-۲-۳
۵۲	..... ۳-۳ غلاف برخورداردی

فصل چهارم: تئوری و محاسبات

۴۸	..... ۱-۴ مدل‌های محاسباتی
۵۱	..... ۲-۴ مدل ارائه شده
۵۷	..... ۳-۴ محاسبات و نتایج
۵۹	..... ۱-۳-۴ حرکت یونی
۶۲	..... ۲-۳-۴ سرعت و چگالی یونی
۶۷	..... ۳-۳-۴ اثر فشار گاز (برخوردها) بر غلاف مغناطیده
۷۰	..... ۴-۳-۴ اثر میدان مغناطیسی و برخوردها بردینامیک الکترونی

فصل پنجم: مواد و روشهای تجربی

۷۹	..... ۱-۵ مراحل انجام آزمایش
۷۹	..... ۱-۳-۵ ایجاد تخلیه الکتریکی

---

۸۱	..... ۲-۳-۵ طیف نگاری
۸۳	..... ۴-۵ نتایج
۸۳	..... ۱-۴-۵ اثر فاصله از کاتد
۸۷	..... ۲-۴-۵ اثر تغییر فشار
۸۹	..... ۳-۴-۵ اثر جریان
۹۱	..... ۴-۴-۵ اثر میدان مغناطیسی
۹۲	..... ۵-۴-۵ اثر جنس کاتد
۹۶	..... ۶-۴-۵ بررسی طیف کاتد
۱۰۰	..... نتیجه گیری
۱۰۲	..... مراجع
۱۰۹	..... چکیده به انگلیسی



## چکیده

تخلیه الکتریکی نورانی و پدیده های مرتبط با آن، از دیدگاه تئوری و تجربی در این مطالعه بررسی شده است. مهمترین ناحیه در این نوع از تخلیه الکتریکی، لایه ای تاریک با بار فضایی مثبت و در مجاورت کاتد است که به "غلاف پلاسما" معروف است.

اثر برخورد های بین ذرات و همچنین میدان مغناطیسی خارجی بر دینامیک یونها، مسئله ی اصلی در بخش تئوری است. دستگاه معادلات مدل شاره به کمک تکنیک های محاسبات عددی حل شده و تغییرات پارامترهای مختلف مربوط به یونها و الکترونها به دست آمدند. میدان مغناطیسی به دلیل نیروی لورنتس، در سرعت و چگالی یونها نوسان ایجاد می کند و برخوردها باعث کاهش سرعت و انرژی یونها می شوند. همچنین یونها در راستای میدان مغناطیسی اعمالی، جهت گیری می کنند.

از تکنیک طیف نگاری تابش اپتیکی تخلیه الکتریکی نورانی نیز می توان برای مطالعه ناحیه کاتدی تیوب تخلیه الکتریکی استفاده کرد. اثر فشار، جریان، فاصله از کاتد، جنس کاتد و میدان مغناطیسی خارجی در تیوب تخلیه الکتریکی با گاز آرگون و هلیوم بررسی شده است.

همانطور که می دانیم، بیشتر تابش های مشاهده شده در تخلیه الکتریکی نورانی، از DE-EXCITATION امهای برانگیخته، ناشی می شود. بنابراین مطالعه تغییرات شدت طول موجهای گاز و ماده ی کاتدی در ناحیه ی مجاور کاتد، به درک فرآیندهای موجود در این ناحیه، به خصوص توزیع انرژی الکترونها کمک می کند.

شدت طیف گاز با دور شدن از کاتد، کاهش می یابد که البته روند این تغییر با تغییر گاز درون تیوب، کمی متفاوت می شود. با در نظر گرفتن اثرات غلاف پلاسما در فشارهای پایین، در نزدیکی کاتد شدت کمتری در فشار کمتر می بینیم. اما با افزایش فاصله، شدت در فشارهای کمتر، افزایش می یابد. با افزایش جریان الکتریکی نیز، شدت طیفهای گاز افزایش می یابد. اثر جنس کاتد بر طیف گاز نیز با در نظر گرفتن فرآیند کندوپاش کاتد توجه می شود و تنها به ضریب گسیل الکترونها ی ثانویه ی آن بستگی ندارد.

حضور ماده ی کاتدی در تیوب تخلیه الکتریکی که طی فرآیند کندو پاش از کاتد انجام می شود، با دور شدن از کاتد، کاهش می یابد. به دلیل افزایش حاصل کندو پاش با افزایش جریان و کاهش فشار و حضور میدان مغناطیسی، با اعمال این تغییرات، طیف شدیدتری برای ماده ی کاتدی خواهیم داشت. نتایج به دست آمده، در بهینه سازی کاربردهای پلاسما و تخلیه الکتریکی از جمله، کندوپاش و کاشت یون اهمیت به سزایی دارند.

## مقدمه

اصطلاح پلازما در فیزیک و شیمی معمولاً به گاز یونیزه شده، که حالت بسیار متفاوتی نسبت به جامد و مایع و گاز (سه حالت مرسوم مواد) نیز دارد، اطلاق می شود. بارهای الکتریکی آزاد، خاصیت رسانایی الکتریکی برای پلازما ایجاد کرده و باعث می شوند که به هر میدان الکترومغناطیسی به شدت پاسخ دهد.

این حالت از ماده، اولین بار در تیوب تخلیه الکتریکی و توسط ویلیام کروکس<sup>۱</sup> در سال ۱۸۷۹ (او آنرا ماده تابنده نامید [۱]) دیده شد. پس از آن نیز توصیفاتی از آن توسط جی جی تامسن<sup>۲</sup> (۱۸۷۹) [۲] و ایروینگ لانگمویر<sup>۳</sup> (۱۹۲۸) [۳ و ۴] ارائه شد. لانگمویر در مورد این کشف خود چنین نوشت:

"به جز در اطراف الکترودها، گاز یونیزه شده حاوی تعداد برابری از الکترونها و یونها است که حاصل، بار فضایی بسیار کمی خواهد بود. ما باید برای توصیف این منطقه ی شامل الکترونها و یونهای برابر از لغت پلازما استفاده کنیم. [۳]"

همانطور که لانگمویر نیز برای اولین بار اشاره کرد، در اطراف الکترودها، تعداد الکترونها و یونها برابر نیستند و بار فضایی مثبت وجود دارد. این لایه ی مجاور با الکترون که آنرا از تخلیه الکتریکی محافظت می کند، غلاف پلازما نام دارد. به دلیل اثرات قابل توجهی که غلاف پلازما روی الکترون و پدیده های درگیر با آن دارد، سالها مورد مطالعه گروه های مختلفی از دانشمندان قرار گرفته است.

بررسی های مربوط به غلاف، هنوز به نتایج واضح و دقیقی برای تعیین خواص آن، مرز آن با پلازما و دیگر مسائل مرتبط، نرسیده اند. این مطالعات بیشتر با استفاده از تقریبهها و مدلهای مختلف و محاسبات عددی و تطابق نتایج با تعاریف موجود انجام شده اند.

---

<sup>۱</sup> William Crookes

<sup>۲</sup> J.J. Thomson

<sup>۳</sup> Irving Langmuir

به عنوان مثال در نظر گرفتن ولتاژهای بسیار بالا و چگالی صفر برای الکترونها در بسیاری از مدلها برای ساده تر شدن، پایه ی محاسبات بوده است. این تقریبات و نتایج آنها در فصل ۳ به تفصیل توضیح داده شده اند. یکی از مهمترین پارامترها در مطالعه غلاف پلاسما، در نظر گرفتن برخوردهای یونها و اتمها در این ناحیه است که معمولا در فشارهای بسیار پایین از آنها صرف نظر می شود. اما همانطور که واضح است، حضور این برخوردها در محاسبات، مدل کاملتر و نتایجی دقیق تر و نزدیکتر به واقعیت خواهند داشت.

مطالعات زیادی در حوزه غلاف غیر برخوردی توسط گروه های مختلفی از جمله لم<sup>۴</sup> (۱۹۶۵) [۶]، فرانکلین<sup>۵</sup> (۱۹۷۰) [۷]، ریمن<sup>۶</sup> (۱۹۷۷ و ۱۹۹۱ و ۱۹۹۷) [۸-۱۰] و اسلمراد<sup>۷</sup> و استنبرگ<sup>۸</sup> (۲۰۰۱) [۱۱] انجام شده است. در این مطالعات، با استفاده از مدل یون شاره<sup>۹</sup>، توزیع الکترونها و یونها، سرعت آنها و اطلاعات و ساختار غلاف و پیش غلاف<sup>۱۰</sup> که لایه ای است برای گذار از پلاسما به غلاف آن، بررسی شده اند. در نظر گرفتن برخوردها در دینامیک پدیده های محدوده غلاف، تغییرات قابل توجهی ایجاد می کنند. این تغییرات در مطالعات سو<sup>۱۱</sup> و لم<sup>۱۲</sup> (۱۹۶۳) [۱۲]، فرانکلین<sup>۱۳</sup> (۱۹۷۰) [۷]، گودیاک<sup>۱۴</sup> و استرنبرگ<sup>۱۵</sup> (۱۹۹۰) [۱۳] و ریمن (۱۹۹۷) [۱۰] دیده می شوند. در این پایان نامه نیز این پارامتر در محاسبات انجام شده، در نظر گرفته شده است که تغییرات اساسی آن نسبت به مدلهای بدون برخورد، اهمیت این پارامتر را تایید می کند.

---

<sup>۴</sup>Lam

<sup>۵</sup>Franklin

<sup>۶</sup>Riemann

<sup>۷</sup>Slemrod

<sup>۸</sup>Sternberg

<sup>۹</sup>Fluid ion model

<sup>۱۰</sup>Pre sheath

<sup>۱۱</sup>Su

<sup>۱۲</sup>Lam

<sup>۱۳</sup>Franklin

<sup>۱۴</sup>Godyak

<sup>۱۵</sup>Sternberg

عامل مهم دیگری که به علت تغییراتی که در غلاف پلاسما ایجاد می کند کاربردهای زیادی دارد، اعمال میدان مغناطیسی است. بررسی های گذشته که در رابطه با اثر میدان مغناطیسی روی غلاف غیر برخورداردی، انجام شده اند، این تغییرات را نشان داده اند [۱۷-۱۴]. ما با توجه به در نظر گرفتن کاربردهای مهمی چون کاشت یون<sup>۱۶</sup> و کندوپاش<sup>۱۷</sup> ترمهای مربوط به میدان مغناطیسی را در محاسباتمان در نظر گرفته ایم و به بررسی جنبه هایی از دینامیک یونها که تا کنون به آن توجه نشده، پرداخته ایم. نتایج محاسبات با در نظر گرفتن میدان مغناطیسی، در بهینه سازی این فرآیندها بسیار موثر است. با توجه به این نکته که لحاظ کردن هر دو پارامتر برخورد و میدان مغناطیسی به طور همزمان کمتر انجام شده است، این مطالعه در نوع خود جدید است.

بررسی تخلیه الکتریکی نورانی توسط طیف نگاری، در مطالعه تجربی ناحیه کاتدی و اثراتی که غلاف پلاسما و پدیده های داخل آن روی شدت طیفهای موجود می گذارند، به تأیید نتایج تئوری، کمک می کنند. پدیده ی مهم دیگری که از اثرات آن نمی توان صرف نظر کرد، برخورد یونهای پرانرژی با کاتد و گسیل الکترونهای ثانویه از سطح آن است که برای پایدار نگه داشتن تخلیه الکتریکی بسیار ضروری هستند. نسبت تعداد این الکترونها به تعداد ذرات برخورد کننده، ضریب گسیل الکترونهای ثانویه نام دارد که به جنس کاتد به شدت وابسته است. نوع گاز، فشار، جریان و فاصله از کاتد نیز در نوع و شدت طول موجهای مشاهده شده ی حاصل از طیف نگاری اپتیکی بسیار موثراند.

گروه های مختلفی [۲۵-۱۷] از جمله رونسکی<sup>۱۸</sup> و همکارانش [۲۳-۲۵] مطالعات و آزمایشات زیادی در این زمینه انجام داده اند. حاصل این بررسی ها تأثیر به سزایی در بهبود شرایط و حاصل کندوپاش و کاربردهای دیگر داشته است.

در این پایان نامه، اثر جنس کاتد بر ناحیه کاتدی نیز، به کمک طیف نگاری اپتیکی بررسی شده است. نتایج به دست آمده، مطالعه تغییرات طیف نثری کاتد با تغییر شرایط آزمایش نیز اهمیت خود را به خصوص در فرآیند کندوپاش نشان می دهد.

<sup>۱۶</sup>Ion implantation

<sup>۱۷</sup>Sputtering

<sup>۱۸</sup>Wronski

# فصل اول

## تخلیه الکتریکی

### ۱-۱ مکانیزم کلی تخلیه الکتریکی

اصطلاح "تخلیه الکتریکی گاز" از فرآیند تخلیه یک خازن در مداری شامل دو الکترود با فاصله مشخص، نشئت گرفته است. اگر ولتاژ به حد کافی بالا باشد، شکست الکتریکی<sup>۱</sup> رخ داده و گاز یونیزه می شود. در این حالت مدار بسته شده و خازن تخلیه می شود. امروزه، این عبارت به شارش جریان الکتریکی از گاز یونیزه و هر فرآیند یونیزاسیون توسط اعمال میدان الکتریکی، اطلاق می شود.

اگر ولتاژ کمی به الکترودها اعمال شود، در حدود چند ده ولت، دستگاه های بسیار حساس، جریان بسیار کمی در حدود  $10^{-10}$  آمپر را نشان می دهند اما هیچ اثر قابل مشاهده ای به وجود نخواهد آمد.

---

<sup>۱</sup>Break down

بارهایی که توسط پرتوهای کیهانی و رادیواکتیو های طبیعی ایجاد شده اند توسط میدان اعمال شده، به سمت الکترودهای با بار مخالف کشیده می شوند. در پلاسما، الکترونها به سمت آند و یونهای مثبت به طرف کاتد شتاب گرفته و متناوباً با ذرات خنثی گاز زمینه برخورد می کنند و جریان کمی ایجاد می کنند. اگر گاز تحت تابش رادیواکتیو یا اشعه X قرار بگیرد، جریانی تا  $10^{-6}$  آمپر نیز ایجاد می شود اما هنوز یونیزاسیونهای ایجاد شده در حدی نیستند که نور تولید کنند. تخلیه یا جریانی که تنها با کمک منبع خارجی باقی بماند (مثلاً گرم کردن کاتد)، غیر خود نکه دار<sup>۲</sup> نامیده می شود. با ادامه افزایش ولتاژ، جریان غیر خود نکه دار افزایش می یابد. تا جایی که میدان تمام بارهای جدید را به سمت الکترودها کشانده و جریان به حالت اشباع برسد. زمان رسیدن به جریان اشباع به نرخ یونیزاسیون گاز بستگی دارد. با ادامه افزایش ولتاژ، جریان نیز زیاد شده و در ولتاژ خاصی که شکست الکتریکی رخ می دهد، تابش نور قابل مشاهده است. در فشار ۱ تور و فاصله ۱ سانتی متر بین الکترودها، اندازه این ولتاژ چند صد ولت است. پس از این مرحله، تخلیه به سرعت به حالت خود نکه دار<sup>۳</sup> می رسد. الکترونها با حرکت در میدان، انرژی بیشتری کسب کرده و با رسیدن به انرژی یونیزاسیون اتمی، باعث ایجاد الکترونها جدید می شوند. این الکترونها کم سرعت نیز فرآیند قبل را طی می کنند که نتیجه آن، بهمن الکترونی خواهد بود. گاز در این مرحله در مدت  $10^{-7}$  تا  $10^{-3}$  ثانیه به اندازه کافی یونیزه شده و جریان چندین برابر می شود.

در ادامه فرآیند با افزایش ولتاژ در فشارهای پایین ۱ تا ۱۰ تور و مقاومت بالای مدار خارجی که از افزایش بیش از حد جریان جلوگیری می کند، تخلیه الکتریکی نورانی<sup>۴</sup> ایجاد می شود. جریان در این نوع تخلیه الکتریکی در حدود  $10^{-1}$  \_  $10^{-6}$  آمپر و ولتاژ صد تا هزار ولت است. ستون نورانی تشکیل شده در طول تیوب یکنواخت بوده و از نظر الکتریکی در همه جا به جز نزدیک الکترودها خنثی است.

---

<sup>۱</sup>Non-Self Sustaining

<sup>۲</sup>Self sustaining

<sup>۴</sup>Glow Discharge

یونیزاسیون در این نوع تخلیه ضعیف،  $x = 10^{-6} - 10^{-9}$  (نسبت اتمهای یونیزه شده به کل اتمهای موجود در گاز) و از دو نظر نیز غیر پایدار است. اول اینکه، الکترونها در حدود ۱ الکترون ولت از میدان انرژی گرفته و دمایی حدود  $10^4$  کلوین دارند در حالی که دمای گاز و یونها بیشتر از ۳۰۰ کلوین نخواهد شد. همچنین به دلیل نرخ بالای خشتی شدن ذرات باردار در گاز سرد، درجه یونیزاسیون بسیار کمتر از حالت تعادل ترمودینامیکی است که الکترونها به طور معمول و با این دما به آن می رسند.

اگر فشار گاز بالا (در حد اتمسفری) و مقاومت مدار کم باشد، بلافاصله بعد از شکست، قوس الکتریکی<sup>۵</sup> ایجاد می شود. این نوع تخلیه الکتریکی اولین بار توسط محقق روسی، پترو<sup>۶</sup>، در سال ۱۸۰۲ کشف شد. معمولاً جریان در این حالت بیشتر از ۱ آمپر و ولتاژ چند ده ولت است. قوس الکتریکی گرمای زیادی تولید می کند که می تواند باعث از بین رفتن تیوب شیشه ای شود. در این مرحله، پلاسمای ایجاد شده تعادل ترمودینامیکی داشته (  $T_e \approx T \approx 10^4$  کلوین) و یونیزاسیون  $x = 10^{-3} - 10^{-1}$  می باشد. قوس الکتریکی در نوع فرآیند گسیل الکترونها از کاتد با تخلیه الکتریکی نورانی بسیار متفاوت است. در تخلیه الکتریکی نورانی، الکترونها توسط برخورد یونها مثبت با کاتد فلزی سرد ایجاد شده ولی در قوس الکتریکی، جریان بالا کاتد را گرم کرده و تابش گرمایونی<sup>۷</sup> خواهیم داشت.

در فشار حدود ۱ اتمسفر، فاصله بیشتر از ۱۰ سانتی متری الکترودها و ولتاژ بالا، جرقه الکتریکی<sup>۸</sup> ایجاد می شود. شکست الکتریکی گاز بین دو الکتروده، به سرعت گسترش یافته، الکترودها اتصال کوتاه شده و بین آنها کانالی با درجه یونیزاسیون بالا ایجاد می شود. رعد و برق که الکترودهای آن ابرهای باردار و زمین هستند، نمونه بزرگی از جرقه های الکتریکی است. در نهایت، تخلیه الکتریکی کرنا<sup>۹</sup> در میدانهای شدیداً غیر یکنواخت که برای ایجاد شکست گاز در طول فاصله بین الکترودها کافی نیستند، شکل می گیرد. کرنا<sup>۹</sup> نورانی در ولتاژهای بالا در انتهای نوک تیز سیمها و در کنار خطوط رسانای انتقال برق دیده می شود.

<sup>۵</sup>Arc Discharge

<sup>۶</sup>Petrov

<sup>۷</sup>Thermoionic

<sup>۸</sup>Spark

<sup>۹</sup>Corona Discharge



## ۲-۱ تقسیم بندی انواع تخلیه الکتریکی

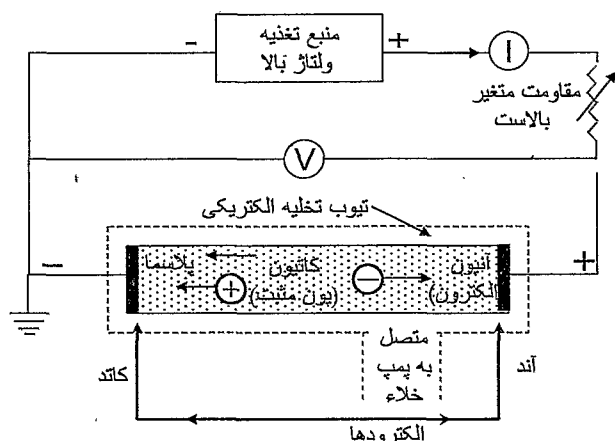
محدوده فرکانس میدان در تقسیم بندی تخلیه الکتریکی بسیار موثر است. فرکانس، میدانها را به چند دسته (۱) مستقیم، فرکانس پایین و پالسی (جز پالسهای خیلی کوتاه) (۲) فرکانس رادیویی (  $10^0 - 10^6 \text{ Hz}$  ) (۳) میدان های میکروویو<sup>۱۱</sup> (  $10^1 - 10^2 \text{ Cm}$  و  $10^9 - 10^{11} \text{ Hz}$  ) و (۴) میدانهای اپتیکی ( دور از مادون قرمز تا فرابنفش) تقسیم می کند [۳۴]. فشار و یا شرایطی که تخلیه الکتریکی در آن ایجاد می شود، از جمله اعمال میدان مغناطیسی نیز در این تقسیم بندیها موثر هستند [۳۵].

## ۳-۱ ایجاد تخلیه الکتریکی

ساده ترین آزمایش در بسیاری از انواع تخلیه، اغلب با استفاده از تیوب تخلیه الکتریکی، دو الکتروود فلزی که به منبع تغذیه جریان مستقیم متصل و داخل یک تیوب شیشه ای قرار گرفته اند، انجام می گیرد (شکل 1-1). تیوب ممکن است خلا شده و یا با گازهای مختلف در فشارهای متفاوت پر شود. کمتهایی که اندازه گیری می شوند، معمولاً ولتاژ بین دو الکتروود و جریان عبوری از مدار هستند. این ساختار ساده بیش از ۱۵۰ سال مورد استفاده قرار گرفته و هم اکنون نیز کاربرد دارد. با تغییر مقاومت بالاست<sup>۱۱</sup> (مقاومت مدار خارجی که برای کنترل جریان استفاده می شود) منحنی مشخصه ولتاژ-جریان که یک منحنی غیر خطی است، به دست می آید.

<sup>۱۱</sup> Microwave field

<sup>۱۱</sup>Ballast



شکل ۱-۱- نمای تیوب تخلیه الکتریکی کم فشار

### ۴-۱- منحنی مشخصه ولتاژ- جریان

مراحل مختلف تخلیه الکتریکی مستقیم در جدول ۱-۱ نشان داده شده اند. با استفاده از تیوبی مانند شکل ۱-۱ و افزایش ولتاژ همراه با اندازه گیری جریان، نموداری مانند شکل ۱-۲ به دست خواهد آمد [۳۶].

با شروع از ولتاژ پایین، در ابتدا ناحیه بین A و B، ناحیه یونیزاسیون توسط تابش های زمینه را مشاهده می کنیم که در آن با افزایش ولتاژ، کسر زیاد و رو به رشدی از یونها و الکترونها حاصل از تابش زمینه جابه جا می شوند (حرکت ذرات باردار در میدان الکتریکی به سمت الکترودهای با بار مخالف و ایجاد جریان کم از A تا B).

با افزایش ولتاژ بین الکترودها در ناحیه بین B و C، تمام یونها و الکترونها که توسط تابشهای زمینه به وجود آمده اند، در اثر نیروی حاصل از میدان الکتریکی، از ناحیه تخلیه جمع شده و منجر به اشباع جریان می شوند. در این منطقه که الکترونها انرژی کافی برای ایجاد یونیزاسیونهای جدید را ندارند با افزایش ولتاژ، جریان همچنان ثابت خواهد ماند. جریان ایجاد شده در این منطقه در حدود چند پیکو تا نانو آمپر است و مستقل از ولتاژ اعمالی، به صورت خطی با قدرت چشمه تابش ( $S = \frac{dn}{dt}$  تعداد الکترونها یا یونها که چشمه تابش در واحد حجم تیوب ایجاد می کند) رابطه دارد.

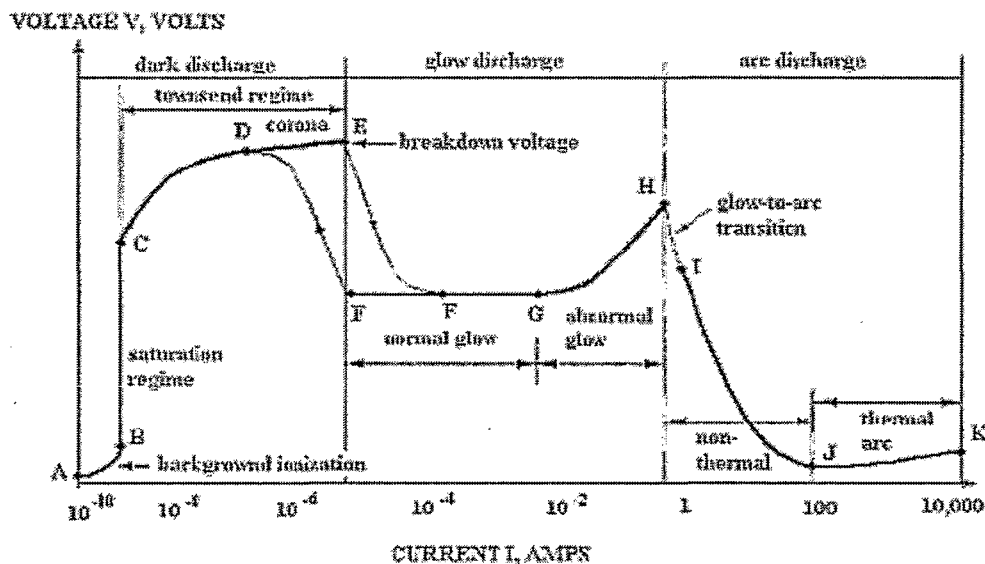
جدول ۱-۱- نواحی مختلف موجود در تخلیه الکتریکی جریان مستقیم کم فشار

<ul style="list-style-type: none"> <li>• یونیزاسیون زمینه</li> <li>• ناحیه اشباع</li> <li>• ناحیه تاونزند<sup>۱۳</sup></li> <li>• تخلیه الکتریکی کرونا</li> <li>• شکست الکتریکی</li> </ul>	تخلیه های الکتریکی تاریک
<ul style="list-style-type: none"> <li>• تخلیه الکتریکی نورانی طبیعی<sup>۱۳</sup></li> <li>• تخلیه الکتریکی نورانی غیر طبیعی<sup>۱۴</sup></li> <li>• گذار نورانی- قوس الکتریکی</li> </ul>	تخلیه های نورانی
<ul style="list-style-type: none"> <li>• قوس الکتریکی غیر حرارتی<sup>۱۵</sup></li> <li>• قوس الکتریکی حرارتی<sup>۱۶</sup></li> </ul>	تخلیه الکتریکی قوس الکتریکی

در ناحیه بین C و E، ناحیه تاونزند، الکترونها در منطقه تخلیه، از میدان الکتریکی انرژی کافی به دست می آورند و اتمهای خنثی گاز زمینه را نیز یونیزه می کنند. الکترونهاى اولیه به همراه الکترونهاى ثانویه ی ایجاد شده، از میدان انرژی گرفته و باعث یونیزاسیونهای جدید می شوند. به این ترتیب، بهمنی از الکترونها و یونها حاصل شده و جریان به سرعت و به صورت نمایی با افزایش ولتاژ، افزایش می یابد.

با در نظر گرفتن پدیده های موثر (مانند تکثیر الکترونها، تابش الکترونهاى ثانویه، یونیزاسیون توسط برخورد الکترونی) در تخلیه تاونزند به رابطه زیر برای چگالی جریان دریافتی توسط سطح الکترونها دست می یابیم:

<sup>۱۳</sup>Townsend<sup>۱۳</sup>Normal Glow Discharge<sup>۱۴</sup>Abnormal Glow Discharge<sup>۱۵</sup>Non-Thermal Arc Discharge<sup>۱۶</sup>Thermal Arc Discharge



شکل ۱-۲ - منحنی مشخصه جریان-ولتاژ برای انواع مختلف تخلیه های الکتریکی [۱۶]

$$J = J_0 \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (1-1)$$

$J_0$ ، چگالی جریان حاصل از الکترونهاى اولیه و الکترونهاى ثانویه گسیلى از کاتد،  $\alpha$ ، ضریب یونیزاسیون اول تاونزند، تعداد برخورد های یونیزه کننده ای است که به طور میانگین توسط الکترونی که یک متر در طول میدان الکتریکی حرکت می کند، انجام می شود و  $\gamma$  ضریب تابش الکترونهاى ثانویه، تعداد الکترونهاى گسیل شده از کاتد به ازای برخورد هر یون یا فوتون است.

بین نقاط D و E تخلیه های تک قطبی کرونا، از تمرکز محلی میدان الکتریکی در نقاط نوک تیز روی سطح الکترودها، لبه های تیز یا ناصاف، ایجاد می شوند. در جریانهای نسبتاً بالا این نوع تخلیه نیز با چشم دیده می شود. کرونا با جرقه های الکتریکی یا شکست الکتریکی نباید اشتباه گرفته شود. جرقه یا