بسم الله الرحمن الرحيم

١٣٠٢٦٠

دانشگاه شهید بهشتی

پژوهشکدهٔ لیزر و پلاسما

پایان نامه

جهت اخذ درجهٔ کارشناسی ارشد فوتونیک

عنوان:

بررسی عددی اثر دی الکتریک و میدان مغناطیسی برروی کاشت یون به روش غوطه ور شدن در پلاسما

دانشجو:

محمد رضا قاسم خانی

استاد راهنما:

دکتر حمید رضا قمی

۱۳۸۸/۱۰/۲۷

مرکز اطلاعات مدارک علمی

تیر ۱۳۸۸

۱۳۰۲۶۰

تاریخ .....
شماره .....
پیوست.....

دانشگاه شهید بهشتی

بسمه تعالی

تهران ۱۹۸۳۹۶۳۱۱۳ اوین
تلفن: ۲۹۹۰۱

« صورتجلسه دفاع از پایان نامه دانشجویان دوره کارشناسی ارشد»

بازگشت به مجوز دفاع شماره ۲۰۰/۱۱۴۰/د مورخ ۸۸/۳/۳۰ جلسه هیأت داوران ارزیابی پایان نامه آقای **محمدرضا قاسم خانی** به شناسنامه شماره ۹ صادره از **خوی** متولد ۱۳۶۲ دانشجوی دوره کارشناسی ارشد ناپیوسته رشته **فوتونیک** با عنوان:

" بررسی عددی اثر دی الکتریک و میدان مغناطیسی برروی کاشت یون به روش غوطه ور شدن در پلاسما "

به راهنمایی: دکتر قمی مرزدشتی

طبق دعوت قبلی در تاریخ ۸۸/۴/۳ 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 ۱۹/۸۰ و درجه عالی مورد تصویب قرار گرفت.

۱- استاد راهنما: دکتر قمی مرزدشتی

۲- استاد مشاور: -----

۱۳۸۸/۱۰/۲۷

۳- استاد داور خارجی: دکتر قربانعلیلو

۴- استاد داور داخلی: دکتر نیکنام

۵- نماینده تحصیلات تکمیلی پژوهشکده: دکتر توسلی

پژوهشکده فیزیک
کد (۸۲۰)

تقدیم به

پدر و مادرم

فهرست مطالب

چکیده..... سه

مقدمه.....پنج

فصل اول: تخلیه الکتریکی و روشهای شبیه سازی پلاسما..... ۱

۱-۱ مقدمه..... ۲

۱-۲ تخلیه الکتریکی نورانی در فشار کم..... ۳

۱-۲-۱ تشکیل تخلیه الکتریکی نورانی..... ٤

۱-۲-۲ رابطه های ولتاژ جریان..... ۷

۱-۲-۳ نواحی تخلیه الکتریک نورانی..... ۸

۱-۳ مدل های شبیه سازی پلاسما..... ۱۰

۱-۳-۱ معادله پیوستگی..... ۱۳

۱-۳-۲ معادله حرکت سیال..... ۱٤

۱-۳-۳ توضیح چند پارامتر مهم..... ۱۷

فصل دوم: کلیات کاشت یون..... ۲۰

۲-۱ مقدمه..... ۲۱

۲-۲ تکنولوژی کاشت یون..... ۲۲

۲-۲-۱ سازوکار کاشت یون..... ۲۳

۲-۳ کاشت یون به روش غوطه ور شدن در پلاسما..... ۲۵

۲-۳-۱ مقایسه روش سنتی کاشت یون با کاشت یون به روش غوطه ور شدن در پلاسما....۲۸

۲-٤ غلاف پلاسما و فیزیک ان..... ۳۲

۲-٤-۱ شرط بوهم در غلاف پلاسما..... ۳۷

۲-٤-۲ غلاف ولتاژبالا ۳۸
۲-٤-۳ غلاف چایلد ٤۰
۲-٤-٤ نقش پهنای غلاف در کاشت یون ٤۳
۲-۵ گسیل الکترون های ثانویه ٤٤
۲-٦ کاشت یون روی لایه های دی الکتریک ۵۰
۲-۷ روش های تولید پلاسما برای کاشت یون به روش غوطه ور شدن در پلاسما ۵۵
فصل سوم: شبیه سازی کاشت یون به روش غوطه ور شدن در پلاسما و تحلیل نتایج ان ٦٤
۳-۱ مقدمه ٦۵
۳-۲ اثر لایه دی الکتریک بر روی کاشت یون به روش غوطه ور شدن در پلاسما ٦٦
۳-۲-۱ نتایج بدست آمده از کاشت یون روی لایه های دی الکتریک ۷۲
۳-۳ مدل معادل برای تایید نتایج بخش ۲-۳ ..... ۷۷
۳-٤ اثر میدان مغناطیسی خارجی روی کاشت یون به روش غوطه ور شدن در پلاسما ۸۰
۳-٤-۱ نتایج بدست آمده از اثر میدان مغناطیسی روی کاشت یون ۸۳
نتیجه گیری ۸۹
مراجع ۹۰
چکیده به انگلیسی ۹۹

چکیده

کاشت یون به روش غوطه ور شدن در پلاسما یک روش نسبتا جدید در کاشت یون است که بخاطر سادگی سیستم و کارآیی بالای ان کاربرد های فراوانی در پرداخت سطوح مواد پیدا کرده است. در این روش، بر خلاف روش سنتی که در ان یون ها در راستای یک خط به طرف ماده هدف شتاب داده می شوند، ماده هدف درون یک محیط پلاسما شناور (غوطه ور) می شود و پالس های منفی ولتاژ بالا به ان اعمال می شود. در اثر اعمال این ولتاژ، یک غلاف در اطراف ماده هدف تشکیل می شود که با گذشت زمان به طرف داخل پلاسما گسترش می یابد. یون ها درون این غلاف به طرف ماده هدف شتاب گرفته و در ان کاشته می شوند. خواص سطحی (مانند سختی، مقاومت در مقابل سایش و خوردگی، قابلیت خیسی، اب دوستی و اب گریزی و...) طیف وسیعی از مواد مانند فلزها، نیمرساناها، سرامیک ها، و پلیمر ها می تواند به این طریق بهبود یابد.

کاشت یون روی لایه های نارسانا در سال های اخیر کاربرد های فراوانی در صنعت میکروالکترونیک پیدا کرده است. اندازه گیری و فهم صحیح از پارامترهای کاشت باعث افزایش کارآیی و دقت محصول تولید شده می شود. در این پایان نامه اثر لایه دی الکتریک و میدان مغناطیسی خارجی روی کاشت یون به روش غوطه ور شدن در پلاسما بصورت عددی مطالعه شده است. افزایش ضخامت لایه دی الکتریک باعث کاهش ولتاژ روی سطح ان می شود که این کاهش خود منجر به کاهش ضخامت غلاف پلاسما و دوز فرودی روی لایه دی الکتریک می شود. اثر گسیل الکترون های ثانویه هم در این مطالعه بررسی شد. چون ضریب گسیل این الکترون ها برای مواد دی الکتریک بیشتر از مواد رسانا است، اثر این الکترون ها بسیار بارز.بود که اهمیت توجه به گسیل این الکترون ها را در پرداخت مواد نارسانا می رساند. اعمال میدان مغناطیسی به سیستم کاشت یون به روش غوطه ور شدن در پلاسما با عث ایجاد چگالی جریان در راستاهای دیگر به غیر از راستای عمود بر سطح دی الکتریک می شود. با افزایش اندازه میدان مغناطیسی، چگالی جریان در این راستاها نیز افزایش می یابد که یک نتیجه طبیعی از افزایش نیروی لورنتز در این راستاها است. ضخامت غلاف و دوز فرودی بطور جزئی با افزایش میدان مغناطیسی کاهش می یابند. زاویه فرودی یون ها روی قطعه هدف نیز مهم است؛ تغییر در این زاویه باعث تغییر در چگالی جریان می شود.

کلمات کلیدی: کاشت یون، کاشت یون به روش غوطه ور شدن در پلاسما، مدل سیالی پلاسما، ، غلاف پلاسما، میدان مغناطیسی، چگالی جریان، دوز.

مقدمه

در فیزیک و شیمی، پلاسماها گازهای یونیده ای هستند که بخاطر وجود بارهای آزاد از لحاظ الکتریکی رسانا بوده و قویا به میدان های الکترومغناطیس پاسخ می دهند. از زمان مشاهده آنها برای اولین بار توسط *ویلیام کروکس*[1] [1] در سال ۱۸۷۹ میلادی، پلاسما کاربردهای وسیع در صنعت و تکنولوژی پیدا کرده اند. یک سری از این کاربردها برای فراوری مواد بکار می رود که به فراوری مواد با پلاسما[2] مشهور شده اند. هدف این فناوری در کل بهبود بخشیدن به خواص فیزیکی و شیمیایی سطح مواد است و شامل طیف وسیعی از روش ها مانند لایه نشانی با بخار فیزیکی و شیمیایی، لایه نشانی با کندوپاش، کاشت یون ها در نیمرساناها، حکاکی کردن و ... است. کاشت یون یکی دیگر از روش های فراوری مواد با پلاسما است که در ان یون ها از یک منبع تولید پلاسما بیرون کشیده می شوند و با انرژی زیاد در سطح یک جسم جامد، که همان ماده هدف است، کاشته می شوند. کاشت یون کاربردهای فراوانی در تولید وسایل نیمرسانا، فراوری فلزات و علم مواد دارد. یون های کاشته شده می توانند هم باعث تغییر شیمیایی در ماده هدف شوند، طوری که ماده تولید شده می تواند متفاوت از ماده اولیه باشد، یا باعث تغییر در ساختار ماده هدف شوند، طوری که با برخورد یون های پرانرژی ساختار ماده هدف می تواند آسیب ببیند یا کلا از بین برود. برای کاشت یون از دستگاه های کاشت یون استفاده می شود. دستگاه های سنتی کاشت یون معمولا از یک منبع تولید کننده یون، یک شتاب دهنده برای یون ها و یک اتاقک که در آنجا ماده هدف قرار داده می شود، تشکیل می شوند. جریان یونی در این دستگاه ها در حد چند میکروآمپر است و بنابراین یک مقدار زمان نسبتا طولانی لازم است که دوز کافی روی ماده هدف بنشیند.

کاشت یون به روش غوطه ور شدن در پلاسما[3] یک روش جدید برای کاشت یون است که در اواسط دهه ۱۹۸۰ میلادی *کنراد*[4] و همکارانش در دانشگاه ویسکانسین آمریکا آنرا اختراع کردند. این روش به عنوان یک روش جایگزین با هزینه کم برای روش سنتی کاشت یون با پرتو یونی بود. کاشت یون با پرتو یونی، علاوه برگران بودن، دارای یک سری معایب بود که مهمترین ان در راستای خط بودن مسیر کاشت یون است؛ یعنی

---

[1] William Crookes
[2] Plasma Processing
[3] Plasma Immerrsion Ion Implantation (PIII)
[4] J. R. Conrad

پرتو یونی فقط روی یک نقطه متمرکز می شود و کاشت فقط در ان نقطه انجام می گیرد. این عیب باعث محدودیت کاشت یون روی اجسام با شکل هندسی پیچیده می شود، طوری که برای کاشت روی این اجسام باید آنها بطور مکانیکی چرخانده شوند و پرتو یونی روی آنها اسکن شود. در کاشت یون به روش غوطه ور شدن در پلاسما قطعه کار درون پلاسما غوطه ور (شناور) می شود و یک ولتاژ منفی بالا مستقیما به قطعه کار اعمال می شود. میدان الکتریکی حاصل از این ولتاژ، الکترون ها را در یک مدت زمان بسیار کم، تقریبا عکس فرکانس پلاسمایی الکترون ها، از ماده هدف دور می کند و یک ناحیه تهی از الکترون در اطراف ماده هدف باقی می گذارد که به این ناحیه غلاف پلاسما[5] می گویند. یون هایی که در غلاف باقی مانده اند به سمت ماده هدف شتاب می گیرند و در سطح ان کاشته می شوند. با کاشته شدن یون ها، چگالی ان ها در غلاف پلاسما کم می شود که باعث می شود غلاف به سمت داخل پلاسما حرکت کند تا یون های بیشتری را تحت پوشش قرار دهد. غلاف پلاسما تا حدی گسترش می یابد که یک سری شرایط پایا حاصل شود، که این شرایط از قانون چایلد[6] بدست می آید، یا پتانسیل خاموش شود. بخاطر اینکه یون ها در تمام جهات در ماده هدف کاشته می شوند، کاشت یون یکنواخت بوده و محدودیت در راستای خط بودن کاشت برداشته می شود.

داشتن یک دانش خوب از دینامیک غلاف پلاسما در کاشت یون به روش غوطه ور شدن در پلاسما بسیار مهم است. برای مثال سرعت گسترش غلاف به داخل پلاسما دوز فرودی روی ماده هدف را تعیین می کند که یک فاکتور بسیار مهم در کاشت است. وقتی که تعداد زیادی از مواد باهم فراوری می شوند، آهنگ گسترش غلاف پلاسما مهم است زیرا می توان از برخورد میدان های الکتریک مجاور جلوگیری کرد که ممکن است به نایکنواختی دوز منجر شود. تا به حال مدل های تحلیلی و عددی گوناگونی برای توضیح دادن فیزیک غلاف پلاسما و دیگر پارامتر های کاشت در کاشت یون به روش غوطه ور شدن در پلاسما ارائه شده است. *لیبرمن*[7] [۲] یک مدل تحلیلی برای کاشت یون به روش غوطه ور شدن در پلاسما برای هندسه تخت ارائه داد. این مدل توسط *شوئر*[8] و همکارانش [۳] به هندسه های استوانه ای و کروی گسترش یافت. *وایدنر*[9] و

[5] Plasma Sheath
[6] Child Langmuir Law Limit
[7] M. A. Lieberman
[8] J. T. Scheuer
[9] M. Widner

همکارانش [٤] تحول زمانی غلاف پلاسما را هم به صورت تجربی و هم تئوری، با مدل سیالی پلاسما، در هندسه های تخت، استوانه ای و کروی بررسی کردند. معادلات سیالی پلاسما برای کاشت یون به روش غوطه ور شدن در پلاسما یک سری معادلات دیفرانسیل جزئی غیر خطی هستند که توسط *کنراد* و همکارانش [٦و٥] نیز حل شده و نتایج ان موجود است. همچنین، *امرت و هنری*[10] [٧] یک مدل شبیه سازی عددی برای تحول غلاف پلاسما در هندسه های تخت، استوانه ای و کروی ارائه دادند و به مقایسهٔ نتایج بدست آمده با داده های تجربی پرداختند. اثر برخورد در تحول غلاف پلاسما هم در نظر گرفته شده است. برای مثال، *واحدی*[11] و همکارانش [٨] یک مدل یک بعدی برخوردی برای کاشت یون به روش غوطه ور شدن در پلاسما ارائه دادند. *کین* و همکارانش [١٠و٩] نیز تحول غلاف برخوردی را در کاشت یون مطالعه کردند. آنها فرض کردند که جریان یون ها در غلاف از رابطه ای که *لیبرمن* [١١] و *شرایدن*[12] [١٢] بدست آورند، پیروی می کند. *ونگ*[13] و همکارانش [١٣] یک مدل تحلیلی برای تحول غلاف برخوردی ارائه دادند و سرعت گسترش غلاف پلاسما را در هندسه تخت بدست آوردند. *شرایدن و گوکنر*[14] [١٤] هم دینامیک غلاف برخوردی را به صورت یک بعدی بررسی کردند. *گانگ*[15] و همکارانش [١٥] مدل یک بعدی غلاف برخودی را برای هندسه های استوانه ای و کروی بسط دادند. کاشت یون روی لایه های دی الکتریک هم در سال های اخیر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است و مدل های تئوری در مورد ان ارائه شده است [١٧و١٦]. *لاکوسته*[16] [١٨] به بررسی محدودیت های فیزیکی کاشت یون به روش غوطه ور شدن در پلاسما روی زیرلایه های دی الکتریک پرداخته است. *ونگ* و همکارانش [١٩] با استفاده از مدل سیالی پلاسما یک روش دو بعدی شبیه سازی برای کاشت یون به روش غوطه ور شدن در پلاسما روی اجسام دی الکتریک ارائه دادند. آنها به بررسی تحول فضایی زمانی پتانسیل روی سطح دی الکتریک، بار جمع شده روی لایه دی الکتریک و اثر زاویه برخورد یون ها روی سطح دی الکتریک پرداختند. *تیان*[17] و همکارانش [٢٠] نیز یک مدل دو بعدی برای کاشت یون روی لایه های دی الکتریک ارائه

[10] G. A. Emmert and M. A. Henry
[11] Vahedi
[12] T. E. Sheridan
[13] Wang Ma
[14] M. J. Goeckner
[15] Ye Gong
[16] A. Lacoste
[17] Xiubo Tian

داده اند. همچنین، اثر میدان میدان مغناطیسی روی کاشت یون به روش غوطه ور شدن در پلاسما نیز توسط پژوهشگران مختلفی بررسی شده است [۲۶-۲۱].

در این پایان نامه، با درنظر گرفتن کارهای قبلی، اثر یک لایه دی الکتریک و میدان مغناطیسی خارجی روی کاشت یون به روش غوطه ور شدن در پلاسما بررسی شده است. نتایج نشان می دهد که الکترون های ثانویه اثر مهم روی کاشت یون به روش غوطه ور شدن در پلاسما دارند و میدان مغناطیسی خارجی باعث ایجاد چگالی جریان در راستاهای مختلف می شود. با توجه به این نکته که اثر میدان مغناطیسی در کاشت یون روی لایه دی الکتریک با در نظر گرفتن اثر گسیل الکترون های ثانویه انجام شده است، این مطالعه در نوع خود جدید است.

فصل اول

تخلیه الکتریکی و مدل های شبیه سازی پلاسما

۱-۱ مقدمه

پلاسما که معمولا به عنوان حالت چهارم ماده از ان یاد می شود یک محیط رسانای الکتریسیته است که در ان تقریبا تعداد مساوی از بارهای مثبت و منفی وجود دارد. این بارهای مثبت و منفی معمولا از یونیزاسیون یک گاز حاصل می شوند [۲۷]. می توان پلاسماها را به دو گروه عمده تقسیم کرد: الف) پلاسماهایی که در تعادل گرمای هستند که در این نوع پلاسماها تمام ذرات (الکترون ها، یون ها و ذرات خنثی) دارای دمای یکسان هستند. معمولا دماهای بسیار بالا (۴۰۰۰۰-۲۰۰۰ درجه کلوین) لازم است تا این تعادل گرمایی بدست آید. ب) پلاسماهایی که در تعادل گرمایی نیستند. در این پلاسماها ذرات مختلف دماهای مختلف دارند(معمولا الکترن ها دمای خیلی بالاتری از دیگر ذرات سنگینتر دارند). فرآیند های بسیاری در یک محیط پلاسما می تواند اتفاق بیافتد که یکی از این فرآیند ها تخلیه الکتریکی است. تخلیه الکتریکی عبارت است از ایجاد یک مسیر رسانش بار بین دو نقطه ای که دارای اختلاف پتانسیل هستند. اگر منبع تولید بارها بطور پیوسته بار تولید کند تخلیه الکتریکی دائمی خواهد بود، در غیر این صورت بصورت موقتی بوده و برای مساوی کردن پتانسیل دو نقطه بکار می رود. بسته به پارامتر های گوناگون مانند ترکیب و چگالی گاز، مدار خارجی و منبع ولتاژ و شکل و جنس الکترود و...، تخلیه های الکتریکی خود را به شکل های گوناگون مانند تخلیه الکتریکی ارک[18]، تخلیه الکتریکی کرونا[19]، شکست الکتریکی[20]، تخلیه الکتریکی نورانی[21] و... نشان می دهند. تخلیه های الکتریکی هم ابزار مناسب برای مطالعه فیزیک تحت شرایط گوناگون هستند و هم کاربردهای گوناگون در صنعت و تکنولوژی دارند از قبیل تولید نور در صنعت نورپردازی و استفاده در لیزرهایی که به صورت الکتریکی برانگیخته می شوند [۲۹-۲۸].

از دیگر کاربردهای تخلیه الکتریکی تولید پلاسما است که بطور وسیع از ان در صنعت فراوری مواد با پلاسما استفاده می شود. تخلیه الکتریکی مهمترین منبع تولید پلاسما در کاشت یون به روش غوطه ور شدن در پلاسماست، که این پایان نامه قصد دارد به بررسی ان روی لایه های دی الکتریک و با اعمال میدان مغناطیسی

[18] Arc Discharge
[19] Corona Discharge
[20] Electrical Breakdown
[21] Glow Discharge

بپردازد. بنابراین، یک اشاره کلی به تخلیه الکتریکی برای فهم روشهای تولید پلاسما، که در فصل دوم با جزئیات بیشتر بیان شده اند، بسیار مفید خواهد بود. مطالبی که در این فصل برسی می شوند به قرار زیر هستند. ابتدا در بخش ۱-۲ تخلیه الکتریکی نورانی بحث خواهد شد که یکی از بهترین روش ها برای تولید پلاسما در کاشت یون به روش غوطه ور شدن در پلاسماست. اگرچه دیگر تخلیه های الکتریکی در اینجا بحث نخواهند شد ولی اصول کلی همه آنها شبه هم بوده که در تخلیه الکتریکی نورانی توضیح داده خواهند شد و هم در فصل دوم حین مطرح کردن آنها برای تولید پلاسما، به اصول کلی آنها اشاره کوتاهی خواهد شد. در بخش ۱-۳ با توضیح اجمالی در مورد روش های کلی شبیه سازی در یک محیط پلاسما، به بیان نظریه سیالی پلاسما می پردازیم که برای شبیه سازی کاشت یون به روش غوطه ور شدن در پلاسما در این پایان نامه از این نظریه استفاده شده است. در این بخش معادلهٔ پیوستگی و معادلهٔ حرکت برای ذرات باردار استخراج شده اند و چند مفهوم مهم که برای درک بهترجواب های شبیه سازی در فصل سوم ضروری هستند، آورده شده اند.

۱-۲ تخلیه الکتریکی نورانی در فشار کم[۲۲]

تخلیه الکتریکی نورانی یکی از مشهورترین پدیده های فیزیکی است که نزدیک به یک قرن مطالعه شده است. نزدیک پنجاه سال یا بیشترنتایج فقط بصورت کیفی بودند [۳۰]. درطول سی یا چهل سال اخیر دانشمندان یاد گرفتند که بسیاری از فرآیند های اتمی را که به یونیزاسیون گازها می انجامد به طور کمی توصیف کنند که نتایج ان بطور موفقیت آمیز به تخلیه الکتریکی نورانی هم اعمال شده است. با این وجود بعضی از ویژگی های مهم این تخلیه ها، مانند ناحیه کاتدی و ستون مثبت خط دار[۲۳] (با ناحیه ای روشن و تاریک)، هنوز بطور کامل درک نشده اند. هم اکنون باور بر این است که تابش از تخلیه الکتریکی، که سال ها فکر می شد فقط برای مصارف عملی و طیف سنجی مفید است، در نگه داشتن خود تخلیه الکتریکی نقش اساسی دارد.

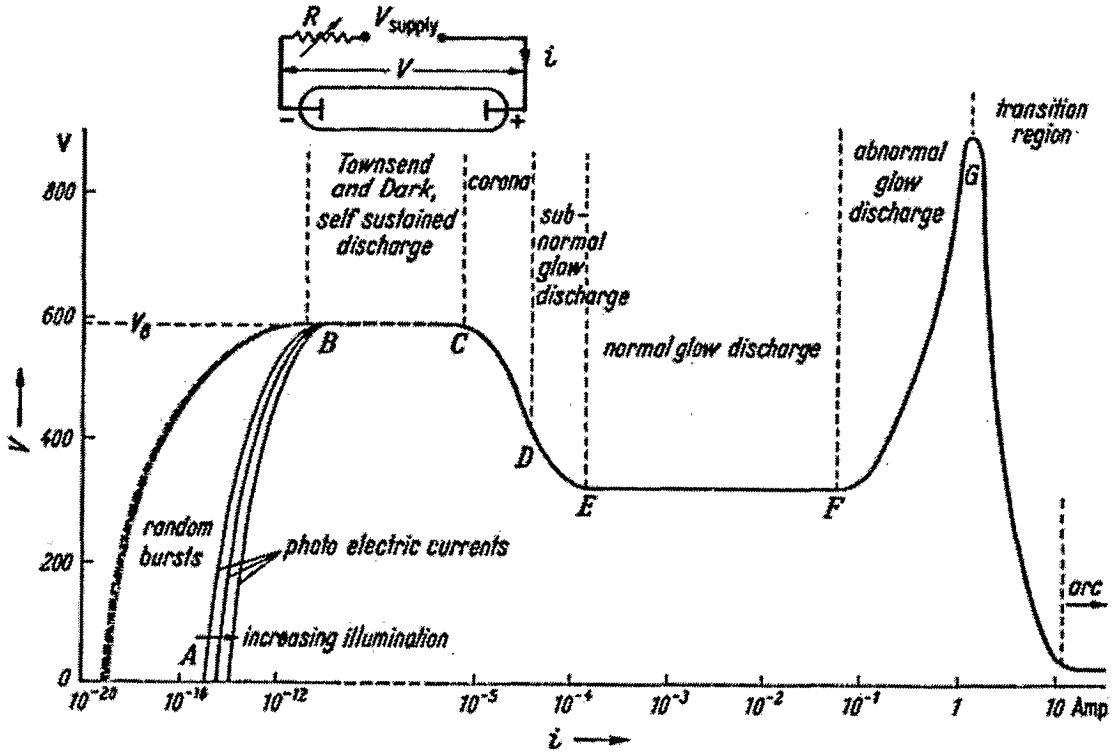
[22] The Glow Discharge at Low Pressure
[23] The Striated Positive Column

۱-۲-۱ تشکیل تخلیه الکتریکی نورانی

یک تیوب استوانه ای شیشه ای که دارای دو الکترود تخت در دو انتها است و با یک گاز کم فشار (کمتر از mm.Hg ۱۰) پر شده است را در نظر می گیریم. شکل تیوب فقط بخاطر راحتی استوانه ای انتخاب شده است و فقط بخش خیلی خاص از بحث را مورد تاثیر قرار خواهد داد نه اصول اصلی تخلیه الکتریکی را. یک پتانسیل *dc* سری بین الکترودها اعمال می شود که به یک مقاومت متغییر برای کنترل جریان وصل شده است و جریان با یک گالوانومتر اندازه گیری می شود. اگر پتانسیل اعمالی به صورت خیلی آهسته افزایش یابد ابتدا، اگر وسایل اندازه گیری به حد کافی حساس باشند، جریان های بسیار کم (درحد $۱۰^{-۱۸}$ آمپر) بصورت ناگهانی و تصادفی اندازه گیری می شود که اندازه و فرکانس این جریان ها با افزایش ولتاژ افزایش می یابد. اگر کاتد با نور فرا بنفش مورد تابش قرار گیرد، جریان های بزرگتر (در حد $۱۰^{-۱۲}$ تا $۱۰^{-۱۳}$ آمپر) مشاهده خواهند شد که شدت و روشنایی بالاتری دارند. با قطع این نور جریان به حالت قبلی خود برمی گردد. چنین جریان هایی بخاطر برخورد الکترون ها با مولکول ها و اتم های گاز و یونیزه کردن آنها بدست می آید؛ الکترون های اولیه توسط یونیزاسیون اشعه کیهانی بوجود می آیند که منجر به جریان های ناگهانی بسیار کوچک می شوند یا از طریق اثر فتوالکتریک، وقتی که کاتد با نور فرابنفش مورد تابش قرار می گیرد، بوجود می آیند. این پدیده ها در شکل۱-۱ با ناحیه *AB* نشان داده شده است. اگر همچنان که کاتد با نور ماوراء بنفش مورد تابش قرار می گیرد، پتانسیل را افزایش دهیم جریان به سرعت افزایش پیدا می کند و در یک محدوده بسیار کوچک از ولتاژ ناگهان به مقادیر بسیار بزرگتر افزایش پیدا می کند که توسط مقاومت مدار مشخص می شود. اگر منبع نور خارجی قطع شود جریان تغییر نمی کند؛ این حالت از پدیده ها یک تخلیه الکتریک پایا را تشکیل می دهند. کمترین ولتاژی که در ان چنین حالتی اتفاق می افتد بنام ولتاژ شکست معروف است (V_B).

توضیح چگونگی تشکیل این جریان پایا به صورت زیر است. هر الکترونی که کاتد را ترک می کند، بخاطر حرکت تصادفی که دارد، باعث ایجاد یون ها و مولکول های برانگیخته و توسط آنها باعث ایجاد فوتون می شود. بعضی از این فوتون ها به کاتد برخورد می کنند، و بخاطر اثر فتوالکتریک، موجب گسیل الکترون می شوند. اگر به این صورت، یک الکترون در مسیرحرکتش از کاتد به آند نابود شود و حداقل یک الکترون

دیگر توسط فوتون ها تولید شود، تخلیه الکتریکی پایا خواهد ماند. البته در این توضیح ایده ال جریان بسیار کوچک است و کوچکترین تغییرناخواسته موجب متوقف شدن جریان می شود. ولی کوچکترین افزایش V از V_B ،برخوردها را در گاز افزایش می دهد و جریان به شدت نسبت به V_B زیاد می شود ولی هنوز خیلی کوچک است که اندازه گیری شود.



شکل ۱-۱- بستگی پتانسیل به جریان برای تخلیه های الکتریکی گوناگون. مشخصات تیوب: گاز نئون درفشار ۱ mm.Hg ؛طول لوله برابر۵۰ سانتی متر و الکترودهای تخت مسی با مساحت ۱۰ سانتی متر مربع [۳۰].

تخلیه های خود پایایی[۲۴] از این نوع (ناحیه BC در شکل ۱-۱) معمولا بنام تخلیه های تاریک[۲۵] نامیده می شوند، چون نور تولید شده در آنها بقدری کم است که تخلیه عملا تاریک دیده می شود. با تنظیم کردن

[24] Self Sustained Discharge
[25] Dark Discharge

مقاومت خارجی، بدون اینکه تغییری در ولتاژ داده شود، جریان می تواند تا نزدیک $۱۰^{-٦}$ آمپر هم برسد. این جریان ها به قدری کوچک هستند که نور تولید شده و بارهای فضایی بوجود آمده توسط ان قابل صرف نظر کردن هستند و میدان الکتریکی فقط توسط V و هندسه تیوب مشخص می شود. اگرچه بسیاری از بارها بین الکترود ها ردوبدل می شوند، ولی بعضی، بخصوص الکترون ها، جذب دیواره های تیوب می شوند که مقداری از بار آنها بطور جزئی توسط جریان یون ها به دیواره خنثی می شود. وجود کمی از بار الکترون ها در دیواره باعث ایجاد گرادیان میدان می شود که موجب می شود این بارها شبیه یک لنز الکترواستاتیک عمل کنند. حال اگر جریان افزایش داده شود (تا تقریبا $۱۰^{-٤}$ آمپر) دو اثر قابل توجه مشاهده می شوند. اول اینکه تخلیه الکتریکی با یک سری از نواحی روشن و تاریک بطور ضعیف قابل مشاهده می شود که با یک آرایش خاص در طول تیوب قرار گرفته اند. دوم، پتانسیل بین الکترودها بطور قابل ملاحضه کاهش پیدا می کند تا اینکه در $۱۰^{-٤}$ آمپر به یک مقدار ثابت می رسد. این ناحیه با *CDE* در شکل ۱-۱ نشان داده شده است. آشکارا، بارهای فضایی حالا در مکانیزم تخلیه الکتریکی نقش دارند که باعث برهم زدن میدان الکتریکی در طول تیوب می کنند. افت ولتاژ نشان می دهد که این آرایش ناحیه های روشن و تاریک به یک فرآیند خیلی موثرتر برای تخلیه می انجامد، یا یونیزاسیون را سریعتر می کند یا تلافات را کاهش می دهد و یا هر دو. حالا، جریان نه تنها با مقاومت خارجی بلکه با خود تخلیه الکتریکی هم تایین می گردد. در این شرایط، وقتی که خواص تخلیه برای اولین بار توسط بارهای فضایی مشخص می شود، گفته می شود که تخلیه الکتریکی نورانی تشکیل شده است.

در عمل لازم نیست که از تمامی مراحلی که دربالا ذکر شد گذر کنیم تا تخلیه الکتریکی نورانی بدست آید. اگر $V > V_B$ بین الکترود ها اعمال شود، اولین الکترودی که در محل مناسب تولید شود (نزدیک کاتد) باعث شروع یک تخلیه الکتریکی پایا خواهد شد و تمام فرآیندهای توضیح داده شده با A→B→C→D در کسری از ثانیه اتفاق خواهند افتاد و وقتی رابطه $V+iR=V_{Supply}$ ارضاء شود، متوقف می شوند. اگر کاتد شدیدا با نور ماوراء بنفش مورد تابش قرار گیرد، طوری که جریان های فتوالکتریک قوی تولید شوند، ناحیه *BCD* ممکن است اصلا ظاهر نشود و خواص تخلیه الکتریکی تا حدی تغییر می کند. پتانسیل شروع کننده تخلیه

آشکارا از پتانسیل کار خیلی بزرگتر است؛ تخلیه های الکتریکی نورانی معمولا بخاطر وجود ناحیه هایی از بار الکتریکی روی دیواره، که ممکن است از تخلیه های قبلی باقیمانده باشند، سخت شروع می شوند.

۱-۲-۲ رابطه های ولتاژ جریان (تخلیه های نرمال، زیر نرمال[۲۶] و غیر نرمال[۲۷])

همانطوری که توضیح داده شد وقتی تخلیه الکتریکی نورانی از تخلیه تاریک بوجود می آید، پتانسیل با افزایش جریان کاهش می یابد، این ناحیه زیر نرمال تخلیه الکتریکی است (ناحیه DE در شکل ۱-۱). اگر جریان باز افزایش پیدا کند ولتاژ ثابت می ماند، حتی اگر جریان ۲ تا ۳ اندازه بزرگی تغییر کند (برای مثال از $۱۰^{-۴}$ آمپر تا ۰/۱ آمپر تغییر کند). این ناحیه نرمال تخلیه الکتریکی است (ناحیه EF در شکل ۱-۱) و در اینجا بطور واضح می بینیم که تخلیه الکتریکی تنها فقط بخشی از کاتد را می پوشاند که این ناحیه متناسب با جریان است و بنابراین چگالی جریان ثابت است. شکل کاتد هرچه باشد این رابطه برقرار است، برای مثال اگر کاتد به شکل میله ای باشد تخلیه الکتریکی اگر فقط یک جریان کوچک را حمل کند فقط نوک میله را می پوشاند؛ با افزایش جریان تخلیه از نوک به بدنه میله هم کشیده می شود و افزایش طول تخلیه روی بدنه متناسب با افزایش جریان خواهد بود. اگر تمام کاند را جریان بپوشاند و جریان باز افزایش داده شود پتانسیل در طول تخلیه بشدت افزایش می یابد، این ناحیه غیر نرمال تخلیه الکتریکی است (ناحیه FG در شکل ۱-۱). اگر همچنان جریان افزایش یابد باعث افزایش پتانسیل تا یک حد ماکزیمم می شود و درجریان های بزرگتر به مقادیر خیلی کم نزول می کند که بعد از ان ما تخلیه ارک را داریم. در این نقطه بسیاری از پدیده ها که در تخلیه الکتریکی نورانی دخیل نیستند مهم می شوند از جمله گرم شدن گاز.

مقادیری که در شکل ۱-۱ نشان داده شده اند اغلب در تخلیه های معمولی، یعنی تیوب هایی به قطر چند سانتی متر، طول تقریبا ۵۰ سانتی متر و فشار mm.Hg ۱، یافت می شوند. فاصله بین الکترود ها بطور جزئی ولتاژ لازم برای عبور دادن جریان در طول تیوب را تحت تاثیر قرار می دهد. چگالی جریان به جای

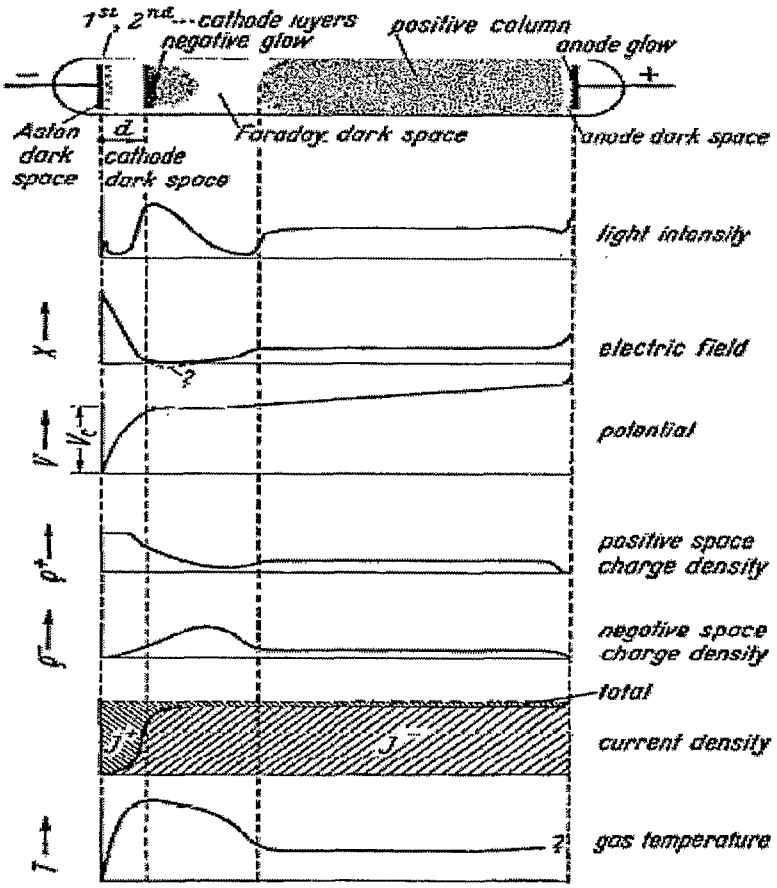
[26] Subnormal Discharges
[27] Abnormal Discharges

جریان ویژگی های تخلیه الکتریک را مشخص می کند، بنابراین در تیوب های پهن تر با الکترود های بزرگتر جریان در ناحیه EFG ممکن است تا ۱۰ مرتبه بزرگتر شود.

۱-۲-۳ نواحی تخلیه الکتریکی نورانی

تخلیه الکتریکی نورانی یک آرایش آشکار بین نواحی تاریک و روشن بین آند و کاتد دارد. جایگاه واقعی این نواحی و ترتیب قرار گرفتن آنها به جنس و فشار گاز و جریان و ولتاژ بین الکترود ها بستگی دارد ولی بیشتر ناحیه ها برای تمام تخلیه ها یکسان است.

یک تخلیه الکتریکی نورانی معمولی را در یک تیوب استوانه ای به طول چند سانتی متر که با گاز نئون با فشار mm.Hg ۱ پر شده است را در نظر بگیرید (شکل ۱-۲ را ببینید).



شکل ۱-۲- تغییرات پارامتر های تخلیه در طول تیوب تخلیه [۳۰].