

«مقاله پژوهشی»

طراحی و ساخت دستگاه تولید پلاسمای سرد اتمسفریک مناسب استفاده در صنایع غذایی

سید محمد ذبیحین پور*

استادیار، گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

تاریخ دریافت: 1401/07/07 تاریخ پذیرش: 1401/08/15

Design and Manufacture of Cold Atmospheric Plasma Production Device
Suitable for Use in Food Industry

S.M. Zabihinpoor*

Assistant Professor, Department of Physics, Payame Noor University, Tehran, Iran

Received: 2022/09/29 Accepted: 2022/11/06

Abstract

Plasma is often refer to the fourth state of matter in science and it is created from a partially or completely ionized gas, which is consisted of ions and free electrons, atoms in the ground or excited state, and most importantly, photons in different energies, and is divided into two categories. They divide into equilibrium (thermal plasma) and non-equilibrium (low temperature plasma or CP). CP is suitable for operations on food products that are sensitive to heat. Creating a suitable cold plasma environment with Townsend's mechanism is related to the control of many physical factors such as the gap and type of electrodes and dielectrics, ambient pressure, frequency and applied high voltage. In this research, after designing and building a food disinfection device based on atmospheric cold plasma technology, the optimal distance of aluminum electrodes was calculated in the potential range of 4 kV to 12 kV. The results made it clear that at distances of more than 9 mm, the phenomenon of Streamer breakdown even at maximum potential causes the destruction of the plasma environment.

Keywords

Cold Plasma, Streamer Breakdown, Townsend's Mechanism, Food Disinfection.

چکیده

معمولاً، پلاسما چهارمین حالت ماده در علم نامیده شده و از یک گاز نیمه یا کاملاً یونیزه ایجاد می‌گردد. این محیط متشکل از یون‌ها و الکترون‌های آزاد، اتم‌ها در حالت پایه یا برانگیخته و مهم‌تر از همه، فوتون‌ها در انرژی‌های مختلف است و به دو دسته تعادلی (پلاسمای حرارتی) و غیرتعادلی (پلاسمای با دمای پایین یا CP) تقسیم می‌شوند. CP برای عملیات بر روی محصولات غذایی حساس به حرارت مناسب است. ایجاد محیط پلاسمای سرد مناسب با مکانیسم تخلیه تاونسند²، به کنترل عوامل فیزیکی زیادی از جمله فاصله میان الکترودها و همچنین جنس الکترودها و دی‌الکتریک‌ها، فشار محیط، فرکانس و ولتاژ بالای اعمالی مرتبط است. در این پژوهش پس از طراحی و ساخت یک دستگاه ضدعفونی مواد غذایی بر اساس تکنولوژی پلاسمای سرد اتمسفریک، فاصله بهینه الکترودهای آلومینیومی در بازه پتانسیل 4kV تا 12kV، مشخص گردید. نتایج حاصل نشان می‌دهد که در فاصله‌های بیش از 9 میلی‌متر، پدیده شکست استریم³ حتی در پتانسیل بیشینه، موجب تخریب محیط پلاسما می‌گردد.

واژه‌های کلیدی

پلاسمای سرد، شکست استریم، مکانیسم تاونسند، ضدعفونی مواد غذایی

1. Cold Plasma
2. Townsend Discharge
3. Streamer Breakdown

مقدمه

اگرچه جو اطراف ما تقریباً به طور کامل از اتم‌های خنثی و مولکول‌ها تشکیل شده است، اما همیشه چگالی کمی از یون‌های باردار و الکترون‌های آزاد نیز در آن یافت می‌شود. این یونیزاسیون عمدتاً به دلیل پرتوهای کیهانی است و چگالی این ذرات باردار در حدود 10^9 ذره بر متر مکعب در سطح دریا است [1]. اگر در محیط، میدان الکتریکی نیز وجود داشته باشد، این ذرات باردار نیرویی را تجربه می‌کنند و شتاب خواهند گرفت و به طور طبیعی حرکت آنها در جهت میدانی که این شتاب را ایجاد می‌کند، خواهد بود. اما گاهی اوقات با برخورد با مولکول‌های گاز خنثی، مسیر حرکت آنها قطع و یا منحرف می‌شود. البته رفتار الکترون‌ها و یون‌ها در این برخوردها بسیار متفاوت است. ملاحظات مکانیکی اولیه نشان می‌دهد که وقتی دو ذره با جرم مجزا m_1 و m_2 با هم برخورد می‌کنند، تبادل انرژی بین آنها به نسبت جرم آنها (m_1/m_2) ، بستگی دارد. در نتیجه، برای یون‌هایی با نسبت m_1/m_2 برابر یک، انتقال کامل انرژی بین دو ذره وجود دارد و هر یون پس از برخورد اول متوقف می‌شود. اما برای الکترون‌ها، شرایط $m_1/m_2 \ll 1$ برقرار بوده و فقط بخش کوچکی از انرژی موجود، قابل معاوضه است. بنابراین، الکترون‌ها بر اثر اعمال میدان الکتریکی بسیار بیشتر از یون‌ها سرعت می‌گیرند. در نتیجه، در حضور میدان الکتریکی، دمای الکترون به آسانی بسیار بزرگتر از دمای گاز خواهد شد و نسبت 100 یا بیشتر برای آن غیر معمول نیست. این رفتار غیرتعادلی، تقریباً اساس کار تمام پلاسماهای دمای پایین است؛ زیرا الکترون‌های داغ، انرژی الکتریکی را هدایت می‌کنند و در تولید رادیکال‌های آزاد و واکنش پذیر (و نه گرم کردن گاز) مؤثر هستند [2]. یک واحد مرسوم برای اندازه گیری انرژی ذرات در چنین شرایطی، الکترون ولت است که انرژی منتقل شده به یک ذره یکبار یونیزه، درعبور از اختلاف پتانسیل یک ولت است و طبق این واحد، انرژی انتقالی یک ذره در دمای اتاق، حدود 0/04 الکترون ولت است. از طرفی می‌دانیم انرژی مورد نیاز برای یونیزه کردن یک اتم یا مولکول، معمولاً در حدود 10-20 الکترون ولت است. بنابراین بلافاصله می‌بینیم که چرا یونیزاسیون حرارتی که در دمای اتاق انجام می‌شود، در مقایسه با اثر ایجاد شده توسط پرتوهای کیهانی ناچیز است. در انرژی‌های بین دمای اتاق و حد یونیزاسیون،

فرآیندهای مختلف اتمی و مولکولی دیگری نیز می‌تواند رخ دهد. از جمله تولید حالت‌های برانگیخته الکتریکی و تجزیه که می‌توانند رادیکال‌های واکنشی را تولید نمایند. به عنوان مثال، گونه‌های مولکولی مانند اکسیژن، پس از دریافت ضربه از الکترون‌ها، باعث فرآیند زیر می‌شوند:



اکسیژن اتمی به خودی خود یک رادیکال مهم و همچنین پیش درآمد گونه‌های رادیکال دیگری از جمله ازن است که در اثر واکنش دیگری همراه با گونه سوم که با M نشان داده می‌شود، ایجاد می‌شود:



و همچنین اکسیدهای نیتروژن که از واکنش‌های جابه‌جایی تشکیل می‌شوند:



ازن، به ویژه، یک عامل ضد میکروبی قوی است. واکنش‌هایی مانند (1) فقط برای الکترون‌هایی با انرژی حداقل چندین الکترون ولت مجاز است که البته خیلی بیشتر از چیزی است که در دمای اتاق موجود است. در نتیجه، یک گام پایه در توسعه چنین کاربردهایی، فرآیند انتقال انرژی از برخی منابع انرژی الکتریکی به الکترون‌ها برای تولید پلاسما سرد است [3-7].

برای انجام تمام واکنش‌های تولید شده توسط پلاسما، الکترون‌ها عنصر ضروری هستند و منبع غالب ایجاد این فرآیند نیز یک پتانسیل الکتریکی است. در نتیجه، هر نوع درک اساسی از کاربردهای پلاسما با سینتیک الکترون آغاز می‌شود. همچنین باید در نظر بگیریم که چگونه محصولات فرآیندهای برخورد الکترون‌های پرانرژی می‌توانند پلاسما سرد را به ابزاری قدرتمند در بسیاری از حوزه‌های کاربردی تبدیل کنند.

یک موضوع مهم دیگر، توسعه ساختارهای فضایی پیچیده در برخورد و رفتار الکترون است، این پیچیدگی، دشواری طراحی یک منبع پلاسما بهینه را افزایش

می‌تواند در هر زمینه خاص، اطلاعات مهمی را از توزیع انرژی به دست دهد تا مورد استفاده قرار گیرد. برای مثال، سرعت واکنش‌های شیمیایی به توزیع انرژی ذرات بستگی دارد و قدرت برهمکنش بین هر جفت ذره با برخورد مشخص می‌شود و مقطع برخورد نیز به طور کلی تابعی از سرعت نسبی و انرژی ذرات بوده و از این رو با $\sigma(E)$ نشان داده می‌شود. اگر برخورد بین یک الکترون و برخی از گونه‌های خنثی را در نظر بگیریم، در بیشتر موارد به دلیل جرم کوچک‌تر و معمولاً دمای بیشتر الکترون‌ها، این سرعت نسبی عملاً برابر با سرعت الکترون است [9].

همچنین سطح مقطع برخورد ممکن است یک تابع از انرژی الکترون‌ها در نظر گرفته شود و توزیع سرعت گونه‌های خنثی می‌تواند نادیده گرفته شود. پس سرعت برخورد الکترون‌ها، دارای انرژی در محدوده E تا $E + dE$ با یک گونه خنثی را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$dS = nNv(E)\sigma(E)f(E)dE. \quad (8)$$

که در آن n چگالی الکترون، N چگالی گونه‌های خنثی، $\sigma(E)$ سطح مقطع برخورد (با واحد m^2) بوده و واحد dS m^3s^{-1} است. بنابراین:

$$S = Nn \int_0^\infty v(E)\sigma(E)f(E)dE = KNn \quad (9)$$

که k ثابت سرعت نامیده می‌شود. هنگامی که یک الکترون با یک اتم یا مولکول خنثی برخورد می‌کند، تعدادی پیامد امکان‌پذیر بوده که ساده‌ترین آن، پراکندگی الاستیک است که در آن الکترون کسر کوچکی از انرژی خود را به اتم یا مولکول خنثی منتقل می‌کند و باعث گرم شدن آن می‌گردد. بخش بزرگ‌تری از انرژی الکترون ممکن است با تغییر در وضعیت داخلی هدف برخورد، مانند تولید یک حالت برانگیخته الکترونیکی از بین برود. بنابراین، به طور کلی سطح مقطع کل برخورد به تعدادی مقطع کوچک‌تر برای هر یک از نتایج احتمالی برخورد، تقسیم می‌شود.

البته تعداد فرآیندهای مجاز که می‌تواند رخ دهد به علت تعدد حالت‌های برانگیختگی که می‌توان تولید کرد، زیاد است. با این حال، یک روش ساده این است که گروه‌هایی از حالت‌های برانگیخته را در تعداد کمی از مقاطع مؤثر جمع

می‌دهد. این موضوع به ویژه بر تکنیک‌های در نظر گرفته شده برای کار در فشار اتمسفر محیط تأثیرگذار است و اساساً توصیف این ساختارها از تحلیل ریاضی گریزان و بررسی وضعیت آنها در اکثر موارد محتاج ابزارها و روش‌های عددی مناسب است [8].

در تعادل حرارتی و در دمای معین T ، میانگین انرژی هر نوع ذره از رابطه $3/2K_B T$ به دست می‌آید که در آن K_B ثابت بنیادی بولتزمن است. البته در سطح میکروسکوپی هر ذره دقیقاً چنین انرژی متوسطی ندارد و برای توصیف توزیع انرژی نسبی ذرات در تعادل حرارتی، توزیع ماکسول-بولتزمن برقرار است. روش‌های مختلفی برای نوشتن این توزیع وجود دارد. به عنوان مثال، ما اغلب می‌توانیم به راحتی تصور کنیم که بردار سرعت v هر ذره با استفاده از سه جزء (v_x, v_y, v_z) بیان می‌شود. در حالت تعادلی، هر جزء سرعت توزیع یکسانی دارد که می‌توان آن را به صورت زیر نوشت:

$$f(v_x) = \sqrt{\frac{m}{2\pi K_B T}} \exp\left(-\frac{mv_x^2}{K_B T}\right) \quad (4)$$

به گونه‌ای که

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(v_x)dv_x = 1 \quad (5)$$

این یک توزیع احتمال است؛ به این معنی که شانس یافتن یک ذره خاص با سرعت بین v_x و $v_x + dv_x$ برابر $f(v_x)dv_x$ است. البته اغلب ما علاقه‌مندیم از توزیع انرژی ذرات نسبت به سرعت استفاده کنیم. اگر انرژی جنبشی تعدادی ذره خاص برابر $E = 1/2m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)$ باشد و هر یک از سه مولفه سرعت بر اساس معادله 4 توزیع شوند، آنگاه:

$$f(E) = 2\sqrt{\frac{E}{\pi}} \left(1/(K_B T)\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E}{K_B T}\right) \quad (6)$$

$$\int_0^\infty f(E)dE = \int_0^\infty \sqrt{E}g(E)dE = 1 \quad (7)$$

توجه داشته باشید که هر یک از توابع $f(E)$ یا $g(E)$ را می‌توان برای توصیف توزیع انرژی استفاده کرد و هیچ اصطلاح یا نشانه پذیرفته شده‌ای وجود ندارد که آنها را متمایز کند. بنابراین لازم است مشخص شود که کدام فرم

$$K(T) = \langle \sigma \rangle = \int_0^\infty v(E) \sigma(E) f(E) dE \quad (10)$$

که حاصل آن به صورت زیر خواهد بود:

$$\sigma_0 \sqrt{\frac{8K_B T}{\pi m}} \left(1 + \frac{E_0}{K_B T} \right) \exp\left(-\frac{E_0}{K_B T}\right). \quad (11)$$

هنگامی که $E_0 \gg K_B T$ باشد، برای بسیاری از فرآیندهای برانگیختگی الکتریکی یا یونیزاسیون، ضریب نمایی در معادله (11)، حاصل معادله را تابعی قوی از T می‌سازد. این اتفاق پیامدهای متعددی دارد. یکی اینکه سرعت (دمای الکترون)، به شدت بر خصوصیات شیمیایی پلاسما تأثیر می‌گذارد، زیرا جریان انرژی در کانال‌های برخورد مختلف، به شدت به ثابت‌های سرعت مرتبط است [11].

مورد دیگری که کمتر آشکار است، وابستگی شدید ثابت‌های سرعت به شکل تابع توزیع، $f(E)$ است. فرم ماکسول-بولتزمن که توسط معادله (5) ارائه شده است، در واقع فقط حالت عادی در تعادل حرارتی را نشان می‌دهد و به ندرت در پلاسمایی با دمای پایین مشاهده می‌شود. این بدان معناست که اگر ما به دنبال درک کمی از سینتیک الکترون باشیم، باید در پلاسما با دمای پایین، تابع توزیع انرژی الکترون را به درستی بدانیم و برای یافتن این تابع، لازم است معادله بولتزمن را حل کنیم [12].

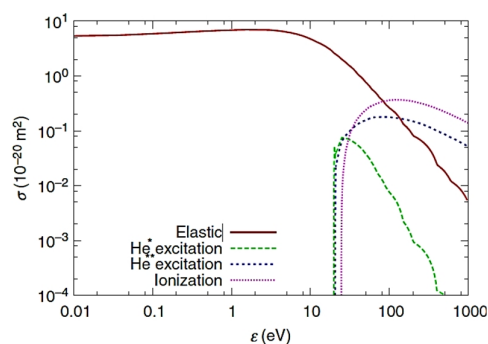
در تخلیه فشار اتمسفریک، ما معمولاً می‌توانیم حداقل به عنوان اولین تقریب فرض کنیم که تابع توزیع انرژی الکترون توسط میدان الکتریکی در هر نقطه از فضا تعیین می‌گردد که به عنوان تقریب میدان محلی شناخته می‌شود. در این حالت، هرگونه تأثیر گرادیان‌های مکانی نادیده گرفته می‌شود و وابستگی زمانی مهم است. در این شرایط فرض می‌شود که فقط از طریق وابستگی زمانی، میدان الکتریکی به وجود می‌آید. اما حل مسئله هنوز مشکل است؛ زیرا توزیع سرعت در امتداد هر یک از سه مولفه محورها، فقط به این دلیل که الکترون‌ها در جهت میدان الکتریکی حرکت می‌کنند، نمی‌تواند کاملاً یکسان باشد.

بنابراین توزیع سرعت در امتداد محور موازی با جهت میدان نمی‌تواند با توزیع سرعت در امتداد محورهای نرمال به میدان یکسان باشد. با این حال، تفاوت بین سه توزیع

کنیم. به عنوان مثال، هنگام برخورد با نمونه‌های اتمی مانند گازهای نجیب، یک انتخاب رایج این است که برانگیختگی کل حالت‌های برانگیخته را توسط یک یا دو مقطع مؤثر نشان دهیم. در این حالت، مجموعه‌ای از چهار مقطع مؤثر به دست می‌آید، یکی برای پراکندگی الاستیک، دو مقطع برای حالت‌های برانگیخته و یک سطح مقطع یونیزاسیون. مجموعه‌ای از این نوع مقاطع، در شکل 1 برای گاز هلیوم توسط پیچفورد¹ نشان داده شده است [10].

برای گونه‌های مولکولی، طیف وسیع‌تری از فرآیندها می‌تواند رخ دهد، زیرا جدا از حالت‌های برانگیختگی چرخشی و ارتعاشی، چنین حالت‌هایی را نیز می‌توان به قطعات مختلف خنثی یا باردار تقسیم‌بندی کرد. در نتیجه، مجموعه‌ای از مقاطع برای گونه‌های مولکولی معمولاً فرآیندهای بسیار بیشتری را شامل می‌شود.

تقسیم‌بندی توان بین فرآیندهای مختلف پس از برخورد الکترون معمولاً موضوعی مورد علاقه است؛ زیرا اساساً ویژگی شیمیایی محصول خروجی با فرآیندهای مربوط به تغییرات انرژی داخلی هدف خنثی تعیین می‌شود. کانال برخورد باید به روی الکترون‌های دارای انرژی کمتر از انرژی آستانه بسته شود و در نتیجه سطح مقطع برای انرژی‌های الکترونی کمتر از این آستانه باید صفر باشد.



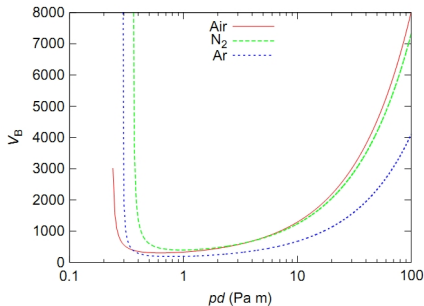
شکل 1. سطح مقطع الکترون برخوردی برای گاز هلیوم

[10]

برای ساده‌ترین حالت، زمانی که انرژی به اندازه مقدار ثابتی بالای انرژی آستانه E_0 است و برای سطح مقطع برخوردی که با σ_0 نشان داده می‌شود، داریم:

بنابراین طبق قسمت سمت راست منحنی پاشن عمل می‌کنند [13].

به عنوان مثال، دستگاهی با جداسازی الکتروود 1 میلی‌متر و با pd برابر 100 Pam، ولتاژ شکستی در حدود چند کیلوولت لازم دارد. دو مکانیسم فیزیکی اساسی شکل منحنی پاشن را تعیین می‌کنند. اولی یونیزاسیون مؤثر الکترون در فاز گازی بوده و دومی هم به انتشار ثانویه از الکتروودها معروف است. در فرآیند دوم، یونی که به کاتد برخورد می‌کند، با احتمال مشخصی، باعث گسیل یک الکترون دیگر می‌شود.



شکل 2. منحنی پاشن برای آرگون، نیتروژن و هوای خشک [9].

این احتمال که به طور معمول با γ نشان داده می‌شود، به مواد الکتروود بستگی دارد، اما اغلب مقداری کوچک دارد ($\gamma \lesssim 0.01$). هر یک از الکترون‌های ثانویه در سراسر شکاف الکتروود حرکت می‌کند و در نهایت در آن جذب می‌شود. فرآیند شکست تنها در صورتی می‌تواند آغاز شود که این فرآیندها، افزایش خالصی در تعداد ذرات باردار را ایجاد کنند. این شرایط شکست مستلزم آن است که برای هر الکترون ساطع شده از کاتد، حداقل $1/\gamma$ یون جدید در برخورد الکترون و یونیزاسیون در فضای بین الکتروودها تولید شود [9].

شکل کلی منحنی پاشن به رابطه بین مسیر آزاد میانگین الکترون و شکاف الکتروود بستگی دارد. در سمت چپ مینیمم پاشن، میانگین مسیر آزاد ممکن است بزرگ‌تر از فاصله باشد. در این حالت، فرکانس برخورد الکترون کم است و میدان الکتریکی بزرگی برای اطمینان از اینکه هر الکترون برخوردی دارای انرژی کافی برای تولید یونیزاسیون است، مورد نیاز است. در سمت راست مینیمم پاشن، تعداد زیادی مسیر آزاد برای حرکت الکترون بین الکتروودها وجود

مولفه سرعت، معمولاً کوچک است و در حل معادلات تخلیه الکتریکی، فرآیندهای شکست و تولید پلاسمای معمولاً برابر فرض می‌شود.

شکست، فرآیندی است که طی آن یک گاز خنثی با القای یونیزاسیون می‌تواند به پلاسمای تبدیل شود. شکست با اعمال یک میدان الکتریکی با قدرت کافی و با تکثیر الکترون‌های پس‌زمینه، ایجاد می‌شود، در اینجا مقدار پتانسیل الکتریکی لازم برای دستیابی به حالت پلاسمای سرد بهینه، سوالی مهم است. یک پاسخ تجربی توسط پاشن¹ در قرن نوزدهم برای این سوال مطرح شد. او مشخص کرد که وقتی دو الکتروود با فاصله d از هم جدا می‌شوند، حداقل ولتاژی که باید برای شروع یک شکست اعمال شود، توسط معادله زیر داده می‌شود [5]:

$$V_B = \frac{Apd}{\ln(Bpd)+C} \quad (12)$$

که در آن V_B ولتاژ شکست، p فشار بر حسب پاسکال و d بر حسب متر است، همچنین A ، B و C ضرایبی هستند که هم به گاز و هم به الکتروود بستگی دارند. نمونه‌هایی از منحنی‌های پاشن در شکل 2 نشان داده شده است [9]. یکی از ویژگی‌های همه این منحنی‌ها، وجود حداقل ولتاژ شکست است، که توسط رابطه زیر داده می‌شود:

$$V_{B,min} = \exp(l) \frac{AC}{B} \quad (13)$$

که خود شبیه معادله:

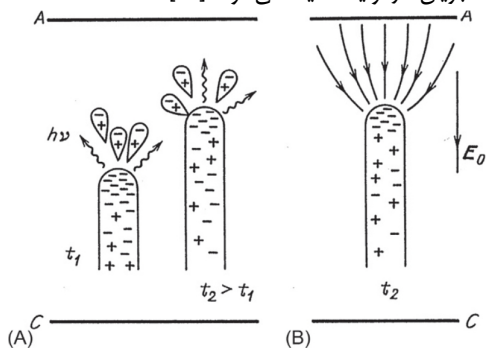
$$(pd)_{min} = \exp(l) \frac{C}{A} \quad (14)$$

است. برای pd حدود یک پاسکال متر، حداقل ولتاژ شکست معمولاً در محدوده 100-500 ولت رخ می‌دهد. این بدان معنی است که در فشار اتمسفر، شکاف الکتروود که در آن حداقل ولتاژ شکست رخ می‌دهد، حدود 10 میکرومتر است. اما اکثر دستگاه‌هایی که برای تولید پلاسمای در فشار اتمسفر استفاده می‌شوند، دارای ویژگی‌هایی با ابعاد بزرگتر هستند و

1. Paschen

در این رابطه، میدان الکتریکی نه تنها تابعی از ولتاژ اعمال شده، بلکه همچنین تابعی از توزیع بار در شکاف است. این موضوع تأثیر زیادی روی ولتاژ شکست ندرت اما ساختار فضایی پلاسمای در حال ایجاد را به شدت تغییر می‌دهد. شکست تاونسند پلاسمایی تولید می‌کند که فضای بین الکترودها را به طور یکنواخت پر می‌کند، در حالی که مکانیسم رادر-میک منجر به شکست استریم و تولید پلاسما با ساختار فضایی پیچیده که معمولاً مطلوب نیست، می‌گردد. زیرا پلاسمایی تولید خواهد کرد که فقط بخش کوچکی از حجم موجود را پر کرده و اغلب منجر به تولید حرارت می‌شود.

در شکل 3 ساختار بار فضایی یک بهمن الکترونی در معیار زمانی رادر-میک برآورده شده است. در هر دو حالت، آند در بالا و کاتد در پایین قرار دارد. پانل سمت چپ (A) ساختار بهمن را نشان می‌دهد و پانل سمت راست (B) بر روی توزیع میدان الکتریکی تأکید دارد. توزیع فضایی بار منفی ناشی از الکترون‌ها در سر استریم متمرکز شده و بار فضایی مثبت با چگالی کمتر بدنه استریم را پر می‌کند. وقتی این جداسازی بارهای فضایی یک میدان الکتریکی قابل مقایسه با میدان اعمال شده، ایجاد می‌کند، بهمن‌های ثانویه (که ممکن است توسط پرتوهای کیهانی یا فوتون‌های ساطع شده از بهمن اولیه تشکیل شوند) به سمت جریان‌ساز اولیه هدایت می‌شوند [16].



شکل 3. شمایی از ساختار بار فضایی یک بهمن الکترونی در معیار زمانی رادر-میک که توسط رایزر² و همکاران تهیه شده است. آند در بالا و کاتد در پایین قرار دارد. پانل سمت چپ (A) ساختار بهمن را نشان می‌دهد و پانل سمت راست (B) بر روی توزیع میدان الکتریکی تأکید دارد [16].

دارد. در این حالت، سیستم به یک تفاوت پتانسیل معین به ازای مسیر آزاد میانگین برای حفظ فرکانس یونیزاسیون قابل ملاحظه نیاز دارد. به طوری که ولتاژ شکست یک تابع تقریباً خطی از محصول pd است. این ترکیب از یونیزاسیون فاز گازی و انتشار ثانویه از کاتد به نام فرآیند شکست تاونسند نامیده می‌شود.

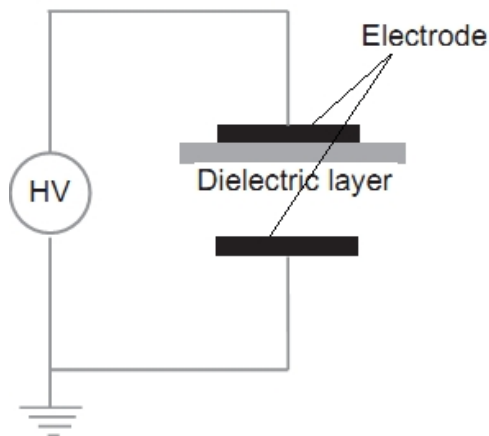
یک فرض مکانیسم شکست تاونسند این است که توده بارهای مرتبط با شروع فرآیند یونیزاسیون، بر میدان الکتریکی تأثیری ندارند. اما اگر میدان ناشی از بارهای فضایی با میدان اعمال شده قابل مقایسه باشد، موضوع متفاوت و مکانیسم‌های مهمی ایجاد می‌شود. هنگامی که شکست از یک جفت یون الکترون منفرد آغاز شود، الکترون از سمت کاتد حرکت کرده و در حین حرکت باعث یونیزاسیون می‌شود. یونیزاسیون پیاپی صورت گرفته و الکترون اولیه به ابری از الکترون تبدیل می‌شود. حرکت این الکترون‌ها ترکیبی از انتشار به دلیل حرکت تصادفی تک الکترون‌ها و رانش به دلیل میدان الکتریکی که برای هر یک از الکترون‌ها یکسان است، خواهد بود. در نتیجه، ابر الکترونی یک کره در حال انبساط را تشکیل می‌دهد که به سمت آند رانش می‌شود و البته یون‌ها بسیار کندتر به سمت کاتد حرکت می‌کنند. این فرآیند، جداسازی بار فضایی را ایجاد می‌کند؛ یعنی بار منفی در ابر الکترونی در حال حرکت و بار مثبت در ناحیه‌ای که در آن الکترون‌ها پس زده شده‌اند. این توزیع بار فضایی، یک میدان الکتریکی ایجاد می‌کند و اگر این میدان الکتریکی با میدان الکتریکی اعمال شده، قابل مقایسه باشد، مکانیسم تاونسند دیگر اعمال نمی‌شود. در این شرایط ممکن است که الکترون‌ها به نواحی دارای بار فضایی مثبت مانند آند رانش شوند و شکست‌های ثانویه رخ دهد [14-15]. اولین بار این مکانیسم با معیار رادر-میک¹ به صورت زیر تعریف شد:

$$\alpha \left(\frac{E}{N} \right) d \approx 20 \quad (15)$$

که در آن، α اولین ضریب یونیزاسیون تاونسند است.

مواد و روش‌ها

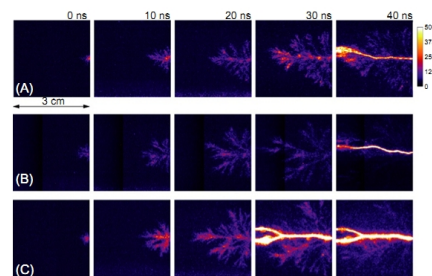
به طور معمول برای ایجاد پلاسمای سرد از تخلیه الکتریکی در محیط گازی استفاده می‌کنند. در این حالت آهنگ برخورد بین الکترون‌ها و مولکول‌های گاز به اندازه کافی نیست. بنابراین یک تعادل غیردمایی بین الکترون‌ها و مولکول‌های گازی به وجود می‌آید. در این شرایط اکثر ذرات پر انرژی از الکترون‌ها تشکیل شده و در نتیجه دمای الکترون‌ها به شدت بالاتر از دمای ذرات سنگین پلاسما خواهد بود و لذا دمای گاز، نزدیک به دمای اتاق باقی می‌ماند. روش‌های متفاوتی تا کنون برای تولید پلاسمای سرد پیشنهاد شده است [18]. در شکل 5، شمایی بسیار ساده از ساختار استفاده شده در این پژوهش برای ایجاد محیط پلاسمای سرد نشان داده است. در این روش دو صفحه رسانای تخت، محیط مد نظر برای تولید پلاسمای سرد را در بر گرفته و بر روی یکی از آنها یک صفحه دی‌الکتریک اضافه می‌گردد. با اعمال ولتاژ بزرگ متناوبی تحت شرایطی مناسب، شاهد ایجاد پلاسمای سرد در این محیط خواهیم بود.



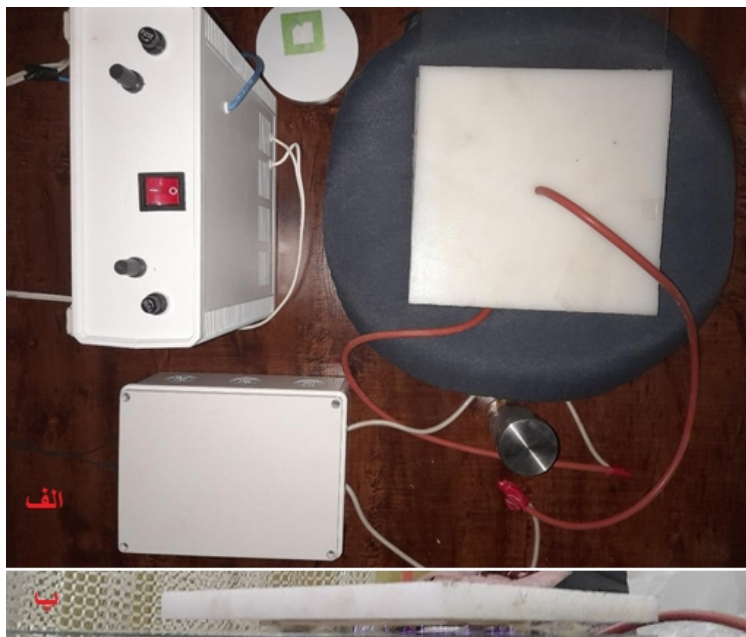
شکل 5. شمایی ساده از ساختار تولید پلاسمای سرد در این پژوهش نشان داده شده است، در سه روش بالایی نحوه ساختار دستگاه پلاسمای سرد مشعلی و در دو روش پایینی برای پلاسمای سرد تخت و شبه تخت نمایش داده شده است [19].

پلاسمایی که در آن دمای گاز و دمای الکترون تقریباً برابر است، برای اکثر کاربردها به خصوص در صنایع غذایی، ناکارآمد است، زیرا انرژی به جای تولید رادیکال‌های آزاد، توسط گرمایش گاز مصرف می‌شود. نمونه‌ای از تصاویر شکست استریم که منجر به تخلیه قوس حرارتی می‌شود، توسط تاکاهاشی¹ و همکارانش با استفاده از یک دوربین فوق سریع از جریان‌های در حال رشد گرفته شده است، در شکل 4 نشان داده شده است [17].

تفاوت‌های دیگری نیز بین شکست تاونسند و استریم وجود دارد. فرآیند شکست توسط مکانیسم تاونسند نسبتاً آهسته است، زیرا که یون‌ها در طول فرآیند به آرامی حرکت کرده و به کاتد می‌رسند. اما شکست استریم فرآیندی بسیار سریعتر بوده و ممکن است از یک جفت الکترون یون منفرد شروع شود. اگر ولتاژ در سراسر شکاف به اندازه کافی سریع اعمال شود، ممکن است یک تأخیر زمانی آماری بین اعمال ولتاژ و شروع شکست وجود داشته باشد [15].



شکل 4. تصاویری از شکست استریم که توسط تاکاهاشی و همکارانش ثبت شده است. سه حالت (A)، (B) و (C) مربوط به اعمال ولتاژهای 18، 20 و 22 کیلو ولت است. شکست از یک آند سوزنی شکل آغاز می‌شود. در شکل سمت چپ، ناحیه 3 سانتی متری بین آند و کاتد با آرگون در فشار 1 اتمسفر پر شده است. برای $pd = 300 \text{ Pam}$ ، این شکست در سمت راست منحنی پاشن در حال رخ دادن است. در همه این موارد، پس از 40 ns یک تک استریم شدید ظاهر شده، که به یک قوس تبدیل می‌شود [17].



شکل 6. در قسمت فوقانی (الف)، قسمت‌های مختلف دستگاه پلاسمای سرد مورد استفاده در این پژوهش و در پایین تصویر (ب) تصویری از گپ میان پنل‌ها (منطقه ایجاد پلاسمای سرد) قابل مشاهده است.

مدت زمان روشن بودن و همچنین مدت استراحت دستگاه است.

نهایتاً قسمت چشمه دستگاه، با دقت و ظرافت لازم ساخته شد. هر گونه نقص در ساخت این قسمت و یا استفاده از مواد نامناسب مخصوصاً در تهیه الکترودها و یا دی‌الکترونیک باعث کارکرد دستگاه در نواحی تخلیه تارنیک یا تخلیه مخرب (استریم) به جای ایجاد محیط پلاسمای خواهد شد. همچنین باید توجه داشت که ولتاژ بسیار بالای ورودی و خروجی چشمه، دقت بسیار بالایی در نحوه اتصال الکترونیک آن طلب می‌کند. در این موارد استفاده از سیم‌ها و عایق‌های رایج خطرآفرین است و باید از سیم‌ها و اتصالات مخصوص با عایق‌های چند لایه بهره برد.

الکترودها از جنس آلومینیوم با خلوص بالا به طول 15 و عرض 10 سانتیمتر و صفحه دی‌الکترونیک از جنس کوارتز شفاف با ضخامت 3 میلی متر انتخاب گردید. گپ میان الکترودها همانگونه که بحث شد، یک پارامتر مهم در آغاز مکانیسم تاونسند و ایجاد محیط پلاسمای است. از طرفی افزایش این فاصله برای عبور مواد غذایی که نیاز به ضدعفونی دارند، ضروری است و از جهتی دیگر این افزایش سبب بروز شکست استریم و تخریب محیط پلاسمای می‌گردد. بنابراین مهم‌ترین هدف این پژوهش، یافتن عمق بهینه در

در این پژوهش برای ایجاد محیط پلاسمای سرد، دستگاهی برای تخلیه الکترونیک تحت یک پتانسیل متناوب با فرکانس و ولتاژ بالا بین دو الکترودها تحت موازی همراه با یک صفحه دی‌الکترونیک مناسب (همانند شکل 5) طراحی گردید. تصویری از اجزای این دستگاه شامل منبع ولتاژ و فرکانس بالا، سیستم کنترل، و چشمه پلاسمای در شکل 6 نشان داده شده‌اند.

البته با توجه به محدودیتهای فنی و ایمنی در ولتاژهای بسیار بالا و برای محصولات مورد تابش با شکل، اندازه و مشخصات متفاوت، نیاز به طراحی خاص و متناسب با شرایط آنها است و لذا در این پژوهش، طراحی دستگاه تولید پلاسمای سرد به گونه‌ای صورت گرفت که با کارکرد در ناحیه مؤثر منحنی جریان-پتانسیل، آفت زدایی مورد انتظار برای محصولات مورد نظر برآورده گردد. در مرحله اول این پژوهش، سیستم تغذیه دستگاه برای ایجاد ولتاژ تا مرز 12 کیلوولت و با فرکانس بالا طراحی و با دقت و استفاده از مواد با کیفیت ساخته شد. هرگونه نقص در این مدار باعث اختلال در عملکرد کلی دستگاه و یا از بین رفتن آن در هنگام استفاده خواهد شد. در مرحله بعدی سیستم کنترل دستگاه طراحی و ساخته شد. کارکرد اصلی این قسمت ایجاد دسترسی به کاربر دستگاه در تنظیم ولتاژ اعمالی به چشمه،

بحث و نتیجه گیری

آلودگی‌های میکروبی غذاها یک موضوع مهم و اساسی برای صنایع غذایی است. اگرچه روش‌های مرسوم غیرفعال نمودن یا از بین بردن پاتوژن‌های مواد غذایی، حرارت دادن است اما حرارت دادن غذاها، اثرات جنبی ناخواسته‌ای در طعم و خواص اصلی آنها می‌گذارد. لذا روش‌های قدیمی برای مواد حساس به گرما مناسب نیستند و از طرف دیگر پس ماندهای مضر به جای می‌گذارند [20-21]. لذا نیاز به استفاده از فناوری‌های نوینی مانند پلاسمای سرد در ضدعفونی محصولات غذایی بیشتر احساس می‌گردد.

امروزه پلاسمای سرد به عنوان نوین‌ترین فناوری در عرصه میکروبی‌کشی، ویروس‌زدایی، ضدعفونی و آفت‌کشی و در نتیجه افزایش طول زمان انبارداری محصولات غذایی شناخته می‌شود. پلاسمای سرد از طریق بمباران الکترونی و یونی و همچنین ایجاد اشعه ماوراء بنفش و میدان الکتریکی بسیار قدرتمند و مؤثر، باعث تخریب غشای سلولی و تخریب DNA باکتری‌ها و ویروس‌ها می‌گردد اما یکی از محدودیت‌های فنی در توسعه این فناوری، وابستگی شدید فاصله الکترودی بر کیفیت پلاسمای ایجاد شده است. از طرفی افزایش این فاصله برای کاربردهای خاص صنایع غذایی، ضروری بوده و از جهتی دیگر این افزایش سبب بروز شکست استریم و تخریب محیط پلاسمای می‌گردد. لذا همواره یافتن عمق گپ و ولتاژ کاری بهینه متناظر با آن در هر دستگاه تولید پلاسمای سرد اهمیت بسزایی دارد.

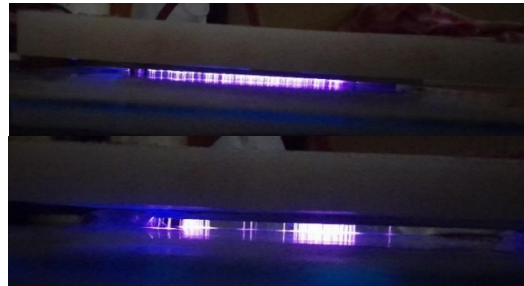
در این پژوهش پس از طراحی و ساخت دستگاه پلاسمای سرد اتمسفریک، فاصله الکترودی بهینه برای کاربردهای ضدعفونی محصولات غذایی در اختلاف پتانسیل‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. این نتایج عمق گپ 8 میلیمتری در اختلاف پتانسیل 12 کیلوولتی را مناسب‌ترین هندسه برای این دستگاه نشان می‌دهند. در این شرایط فشار و دمای محیط پلاسمای تقریباً با دمای محیط پیرامونی برابر بوده و جریان ورودی نیز در شرایط بهینه، حدود 1/2 آمپر اندازه‌گیری گردید.

همان گونه که پژوهشگران زیادی از جمله نابورا¹ و همکارانش اثربخشی این نوع از پلاسمای سرد در ضدعفونی مواد غذایی را نشان داده‌اند، کارایی مناسب این دستگاه در از بین بردن آفت انباری شب پره هندی در پژوهش دیگری بررسی و منتشر شده است [22-23].

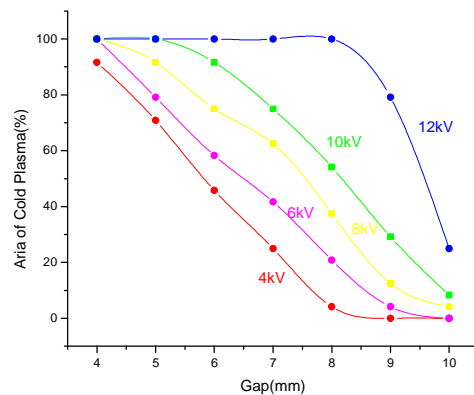
فشار اتمسفریک و بازه ولتاژی 4 تا 12 کیلو ولت برای این دستگاه نمونه است.

نتایج

پس از طراحی و ساخت دستگاه و طی شدن موفقیت‌آمیز آزمون‌های اولیه، یافتن عمق گپ بهینه مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور برای ولتاژهای اعمالی از 4 کیلوولت تا 12 کیلوولت با بازه‌های دو کیلوولتی، در فشار هوای حدود یک اتمسفر، تأثیر تغییر فاصله الکترودها بررسی گردید. برای نشان دادن میزان مساحت پلاسمای ایجاد شده، طول الکترودها به 6 قسمت و عرض آنها به 4 قسمت 25 میلی متری و در مجموع 24 پیکسل تقسیم‌بندی گردید. نتایج حاصل برحسب درصد مساحت پلاسمای ایجاد شده در کل ناحیه میان الکترودها برای فاصله‌های 4 تا 10 میلی متری و برای اختلاف پتانسیل‌های اعمالی از 4kV تا 12kV در نمودار شکل 8 نشان داده شده‌اند.



شکل 7. محیط یکنواخت پلاسمای در شکل بالا و تخریب استریم برای این محیط به دلیل افزایش غیرمتبادل فاصله الکترودها (عمق گپ) در شکل پایین مشاهده می‌گردد.



شکل 8. منحنی تغییرات مساحت محیط پلاسمای ایجاد شده با فاصله میان الکترودها در بازه اختلاف پتانسیل‌های اعمالی از 4kV تا 12kV.

1. Nwabor

منابع

- [1] Hulburt EO. Atmospheric ionization by cosmic radiation. *Physical Review*. 1931 Jan 1; 37(1):1.
- [2] Levatter, J., Lin, S., 1980. Necessary conditions for the homogeneous formation of pulsed avalanche discharges at high gas-pressures. *J. Appl. Phys.* 0021-8979. 51 (1), 210–222. WOS:A1980JF79800034.
- [3] Cherrington, B., 2014. *Gaseous Electronics and Gas Lasers*. Elsevier, New York, ISBN: 978-1-4832-7896-4.
- [4] Francis, G., 1956. *The Glow Discharge at Low Pressure*, vol. 4/22. Springer, Berlin, Heidelberg. pp. 53–208. ISBN 978-3-642-45849-1, 978-3-642-45847-7.
- [5] Llewellyn-Jones, F., 1966. *Ionization and Breakdown in Gases*. Methuen, London.
- [6] Raether, H., 1964. *Electron Avalanches and Breakdown in Gases*. Butterworths, London.
- [7] Raizer, Y., 2011. *Gas Discharge Physics*. Springer, New York. ISBN: 978-3-642-64760-4.
- [8] Shkarofsky, I., Johnston, T., Bachynski, M., 1966. *The Particle Kinetics of Plasmas*. Addison-Wesley Pub. Co., Boston, MA.
- [9] Misra, N. N., Schlüter, O., & Cullen, P. J. (Eds.). (2016). *Cold plasma in food and agriculture: fundamentals and applications*. Academic Press.
- [10] Pitchford, L., ONeil, S., Rumble, J., 1981. Extended Boltzmann analysis of electron swarm experiments. *Phys. Rev. A* 23 (1), 294–304.
- [11] Palmer, A., 1974. Physical model on initiation of atmospheric-pressure glow discharges. *Appl. Phys. Lett.* 0003-6951. 25 (3), 138–140. A1974T569500006.
- [12] Kogelschatz, U., 2003. Dielectric-barrier discharges: their history, discharge physics, and industrial applications. *Plasma Chem. Plasma Process.* 0272-4324. 23 (1), 1–46. WOS:000181061100001.
- [13] Marinov, D., Guerra, V., Guaitella, O., Booth, J.P., Antoine, R., 2013. Ozone kinetics in low-pressure discharges: vibrationally excited ozone and molecule formation on surfaces. *Plasma Sources Sci. Technol.* 22 (5), 055018. ISSN 0963-0252, 1361-6595.
- [14] Meek, J., 1940. A theory of spark discharge. *Phys. Rev.* 57 (8), 722–728.
- [15] Rawlins, W., Caledonia, G., Armstrong, R., 1987. Dynamics of vibrationally excited ozone formed by three-body recombination: II. Kinetics and mechanism. *J. Chem. Phys.* 00219606. 87 (9), 5209.
- [16] Raizer, Y., 2011. *Gas Discharge Physics*. Springer, New York. ISBN: 978-3-642-64760-4.
- [17] Takahashi E, Kato S, Furutani H, Sasaki A, Kishimoto Y, Takada K, Matsumura S, Sasaki H. Single-shot observation of growing streamers using an ultrafast camera. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2011 Jul 7;44(30):302001.
- [18] Hernández-Hernández H, Moreno-Vilet L, Villanueva-Rodríguez S (2019) Current status of emerging food processing technologies in Latin America: novel non-thermal processing. *Innov Food Sci Emerg Technol* 58:102233
- [19] Rifna E, Singh SK, Chakraborty S, Dwivedi M (2019) Effect of thermal and non-thermal techniques for microbial safety in food powder: recent advances. *Food Res Int* 126:108654
- [20] Singh S, Shalini R (2016) Effect of hurdle technology in food preservation: a review. *Crit Rev Food Sci Nutr* 56:641–649
- [21] Isbary G, Shimizu T, Li Y-F, Stolz W, Thomas HM, Morfill GE, Zimmermann JL (2013) Cold atmospheric plasma devices for medical issues. *Expert Rev Med Devices* 10:367–377
- [22] Nwabor, O. F., Onyeaka, H., Miri, T., Obileke, K., Anumudu, C., & Hart, A. (2022). A cold plasma technology for ensuring the microbiological safety and quality of foods. *Food Engineering Reviews*, 14(4), 535-554.
- [23] Zabihinpour, M., 2023. Designing and manufacturing dry Fruit Pesticide Device Based on Coldplasma Technology. *The National Conference on Technological Advances In Applied Physics*. <https://civilica.com/doc/1666479>

COPYRIGHTS



© 2022 by the authors Licensee PNU, Tehran, Iran This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4 0 International (CC BY4 0) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)