

ORIGINAL ARTICLE

Comparative Modeling and Simulation of Plasma Produced by Microwaves with Different Input Powers

Noushin Dadashzadeh Gargari*

Assistant Professor, Department of Electrical Engineering Aras Branch, Islamic Azad University, Jolfa, Iran.

Correspondence

Noushin Dadashzadeh Gargari

Email:

noushindadashzadeh@yahoo.com

How to cite

Dadashzadeh Gargari, N. (2025) Comparative Modeling and Simulation of Plasma Produced by Microwaves with Different Input Powers, Optoelectronic, 7(3), 49-56.

ABSTRACT

Plasma technology is widely applied in various domains, including ozone generation, surface treatment, surface modification, medicine and more. Microwave-induced plasma is a promising and interesting technology due to its unique and versatile properties. These features of microwave plasma is a potential alternative to conventional thermal chemical reactors, provided that specific technical challenges are addressed.

This numerical study investigated the characteristics of a 2.45 GHz microwave plasma generated in argon gas under atmospheric conditions. By varying the input power of the device from 10 to 20 watts within a magnetically confined TM mode, comparative profiles of electron density, electron temperature, and electric field were analyzed. The simulation results demonstrate the production of chemical species within the microwave plasma. High-energy electrons and electron density were identified as primary factors influencing the microwave plasma's properties.

KEYWORDS

Microwave Plasma, Electron Density, Argon Gas, Numerical Simulation.

فصلنامه علمی
اپتوالکترونیک

«مقاله پژوهشی»

مدل سازی و شبیه سازی مقایسه ای پلاسمای تولید شده به کمک میکروویو با توان های ورودی متفاوت

نوشین داداش زاده گرگری*

استادیار، گروه آموزشی برق، واحد ارس، دانشگاه آزاد اسلامی، جلفا، ایران.

چکیده

فناوری پلاسما در بسیاری از کشورها در زمینه های مختلفی مانند تولید ازن، تصفیه سطح، اصلاح سطح، پزشکی و غیره استفاده می شود. پلاسمای تولید شده با امواجی مانند میکروویو، یک فناوری امیدوارکننده و جالب برای ویژگی های منحصر به فرد و همه کاره آن است. این ویژگی های پلاسمای میکروویو یک فناوری جایگزین در مقایسه با راکتورهای شیمیایی حرارتی سنتی به شرط رفع چالش های فنی خاص آن است. در این مطالعه عددی، خواص پلاسمای میکروویو با فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز و گاز آرگون در فشار اتمسفر بررسی شد. با تغییر توان ورودی دستگاه در محدوده ۱۰ وات تا ۲۰ وات در حالت مغناطیسی و مد (TM)، پروفایل های مقایسه ای چگالی الکترون، دمای الکترون، میدان الکتریکی نشان داده می شود. نتایج شبیه سازی، تولید المان های شیمیایی در پلاسمای میکروویو را نشان می دهد. الکترون های پرانرژی و چگالی الکترون به عنوان عوامل اصلی مؤثر بر خواص پلاسمای میکروویو در نظر گرفته شده اند.

واژه های کلیدی

پلاسمای میکروویو، چگالی الکترون، گاز آرگون، شبیه سازی عددی.

نویسنده مسئول:

نوشین داداش زاده گرگری

رایانامه:

noushindahashzadeh@yahoo.com

استناد به این مقاله:

نوشین داداش زاده گرگری (۱۴۰۴). مدل سازی و شبیه سازی مقایسه ای پلاسمای تولید شده به کمک میکروویو با توان های ورودی متفاوت. فصلنامه علمی اپتوالکترونیک، ۷(۳)، ۴۹-۵۶.

<https://jphys.journals.pnu.ac.ir>

مقدمه

با رشد سریع تقاضای جهانی برای انرژی‌های پاک، کاربردهای مختلف فناوری پلاسما در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است [۱-۴]. پلاسما به عنوان یکی از چهار حالت اصلی ماده به گاز شبه‌خنثایی از ذرات باردار و خنثی گفته می‌شود که رفتار جمعی از خود ارائه می‌دهد. واژه پلاسما به گاز یونیزه شده‌ای گفته می‌شود که همه یا بخش قابل توجهی از اتم‌های آن یک یا چند الکترون از دست داده و به کاتیون تبدیل شده باشند. در حقیقت پلاسما در فیزیک، یک رسانای الکتریکی است که در آن تقریباً تعداد مساوی ذرات دارای بار مثبت و منفی وجود دارد.

پلاسماهای سرد را می‌توان با استفاده از روش‌های مختلفی مانند جریان مستقیم^۱ (DC)، فرکانس رادیویی^۲ (RF) یا فرکانس مایکروویو تولید کرد [۵، ۶]. اکثر پلاسماهای تولید شده با فرکانس پایین مانند تخلیه سد دی‌الکتریک^۳ (DBD) دارای تنظیمات ساده‌ای هستند.

پلاسمای تولیدی فرکانس پایین باید از ولتاژ بالا برای تولید گونه‌های فعال پلاسما استفاده کند. این یک نقص آشکار برای برخی کاربردها مانند زیست‌پزشکی است. بمباران یونی به دلیل ولتاژ بالا یکی دیگر از مسائلی است که هنگام استفاده از پلاسمای فرکانس پایین وجود دارد [۶]. بمباران یونی با انرژی بالا نیز منجر به ایجاد قوس می‌شود که می‌تواند باعث آسیب شدید به اهداف شود. پلاسمای مایکروویو^۴ (MWP) یک جایگزین جالب و ساده در مقایسه با پلاسمای فرکانس پایین در کاربردهای مختلف می‌باشد.

پلاسمای مایکروویو نوعی پلاسمای سرد است که با استفاده از انرژی مایکروویو ایجاد می‌شود. این روش برخلاف روش‌های سنتی تولید پلاسما، نیازی به الکترودهای فیزیکی نداشته و به همین دلیل، از آلودگی پلاسما و هزینه‌های مرتبط با آن جلوگیری می‌کند. راندمان انتقال انرژی در پلاسمای مایکروویو به مراتب بالاتر از تخلیه‌های فرکانسی رادیویی (RF) است و در شرایط بهینه، تقریباً تمام انرژی مولد مایکروویو به پلاسما منتقل می‌شود. پلاسمای مایکروویو، بسته به طراحی سیستم، می‌تواند بدون تشعشع یا با تشعشع کم باشد. در حالت کلی، پلاسماهای مایکروویو با چگالی الکترونی بالاتر، تمایل به تشعشع بیشتری دارند [۷].

پلاسمای مایکروویو به دلیل راندمان بالای یونیزاسیون،

تراکم بالای گونه‌های فعال را با صرف انرژی کمتری نسبت به روش‌های تخلیه خازنی یا DC تولید می‌کند. همچنین پتانسیل پلاسمای ایجاد شده در این روش معمولاً کمتر است. این ویژگی‌ها باعث می‌شود که پلاسماهای مایکروویو بسیاری از خصوصیات تخلیه‌های القایی را داشته باشند [۸]. با اعمال فرکانس مایکروویو در فشار پایین، می‌توان پلاسمای یکنواخت با چگالی الکترونی بالا ایجاد کرد که انعطاف‌پذیری بالایی در کاربردهای مختلف دارد [۴، ۹، ۱۰].

فناوری پلاسمای مایکروویو به عنوان یک روش کارآمد و مؤثر در پردازش مواد، به ویژه در زمینه‌های اصلاح سطح، رو به گسترش است. این فناوری در صنایع مختلفی همچون الکترونیک، پزشکی و محیط زیست کاربرد دارد [۱۱-۱۴]. پلاسمای مایکروویو برای استریل‌سازی، تمیزکاری و فعال‌سازی سطوح مواد مختلفی از جمله فلزات، پلیمرها و مواد کامپوزیتی به کار می‌رود. همچنین، در فرایندهای رسوب‌دهی فیلم‌های نازک و اصلاح خواص سطحی نانوالیاف و سایر مواد کاربرد دارد [۱۵-۱۸].

پلاسماهای مایکروویو به دلیل توانایی ایجاد محیطی غنی از گونه‌های فعال شیمیایی، پتانسیل بالایی برای بهبود خواص سطحی مواد دارند. از جمله کاربردهای مهم پلاسمای مایکروویو می‌توان به رسوب‌دهی شیمیایی بخار (CVD) و پلیمریزاسیون پلاسما اشاره کرد [۱۹-۲۲].

با توجه به مزایای متعدد پلاسمای مایکروویو، این فناوری به عنوان جایگزینی امیدوارکننده برای روش‌های سنتی پردازش مواد مطرح شده است. با این حال، برای گسترش کاربردهای این فناوری در مقیاس صنعتی، لازم است چالش‌هایی همچون مقیاس‌پذیری و بهینه‌سازی فرآیند تولید پلاسما برطرف شود [۲۳-۲۵].

پلاسماهای مایکروویو، علی‌رغم مزایای فراوان، با محدودیت‌هایی نیز همراه هستند. از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به مسیر آزاد کوتاه ذرات در چگالی‌های بالا اشاره کرد که اندازه پلاسمای تولیدشده را محدود می‌کند. با این حال، نفوذپذیری بالای میدان‌های الکترومغناطیسی با فرکانس بالا در پلاسماهای با چگالی الکترون بالا، یک مزیت مهم برای این نوع پلاسماهای محسوب می‌شود [۲۶].

در پژوهش حاضر، با هدایت یک موج مایکروویو از طریق یک موجبر عمودی به داخل یک کانال حاوی گاز آرگون در فشار پایین، پلاسمای آرگون تولید شد. با توجه به حساسیت شدید پارامترهای پلاسما به توان ورودی و شکل هندسی پلاسما، تأثیر تغییر توان ورودی بر مشخصه‌های پلاسما بررسی شد. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده تغییرات قابل توجهی در

1 Direct Current
2 Radio Frequency
3 Dielectric Barrier Discharge
4 Microwave Plasma

پروفایل های چگالی الکترون، دمای الکترون و توزیع میدان الکتریکی با افزایش توان ورودی بود.

ساختار و معادلات استفاده شده در مسئله

چگالی الکترون و انرژی متوسط الکترون با حل یک جفت معادله رانش - انتشار برای چگالی الکترون و انرژی الکترون متوسط محاسبه می شود:

$$\frac{\partial}{\partial t}(n_e) + \nabla[-n_e(\mu_e E) - D_e \nabla n_e] = R_e \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(n_e) + \nabla[-(n_e(\mu_e E) - D_e \nabla n_e) + E \Gamma_e] = R_e \quad (2)$$

که در آن R_e منبع الکترون، E میدان الکتریکی، Γ_e شار الکترون و R_e اتلاف انرژی ناشی از برخوردهای غیر کشسان است. D_e ظرفیت انتشار الکترون ها، μ_e تحرک انرژی و D_e ضریب انتشار انرژی است که در معادلات زیر استفاده می شود [۲۷]:

$$D_e = \mu_e T_e \quad (3)$$

$$\mu_e = 5/3 \mu_e \quad (4)$$

$$D_e = \mu_e T_e \quad (5)$$

ضرایب منبع در معادلات فوق توسط شیمی پلاسما با استفاده از ضرایب سرعت تعیین می شود. M واکنش هایی است که به افزایش یا کاهش چگالی الکترون کمک می کنند و P نشان دهنده برخوردهای غیرالاستیک الکترون خنثی است. به طور کلی، $M \gg P$. در مورد ضرایب نرخ، عبارت منبع الکترون با معادلات زیر ارائه می شود [۲۷]:

$$R_e = \sum_{j=1}^M x_j k_j N_n \quad (6)$$

در اینجا x_j کسر مولی گونه هدف برای واکنش j ، $k_j(m^3/s)$ ضریب سرعت برای واکنش j و N_n چگالی عدد خنثی کل را نشان می دهد. اتلاف انرژی الکترون از مجموع تلفات کل انرژی برخورد در تمام واکنش ها حاصل می شود:

$$R_e = \sum_{j=1}^P x_j k_j N_n n_e \Delta \varepsilon_j \quad (7)$$

در اینجا، $\Delta \varepsilon_j (V)$ اتلاف انرژی واکنش j است. ضرایب نرخ را می توان از داده های مقطعی با انتگرال زیر محاسبه کرد [۲۷]:

$$k_k = \gamma \int_0^\infty \varepsilon \sigma_k(\varepsilon) f(\varepsilon) d\varepsilon \quad (8)$$

در رابطه بالا $\gamma = (2q/m_e)^{1/2} (C 1/2/kg 1/2)$ نرخ برخورد، $m_e (kg)$ جرم الکترون، $\varepsilon (V)$ انرژی، $\sigma_k (m^2)$ مقطع برخورد، همچنین $f(\varepsilon)$ نشان دهنده تابع توزیع انرژی الکترون (EEDF) است. EEDF تابعی است که نشان

می دهد الکترون ها با چه انرژی هایی در پلاسما وجود دارند. در بسیاری از موارد، EEDF به صورت ماکسولی در نظر گرفته می شود. با این حال، در فشارهای پایین، به دلیل افزایش مسیر آزاد متوسط الکترون، EEDF می تواند از توزیع ماکسولی منحرف شود [۲۴].

در فشارهای پایین، به دلیل طولانی بودن مسیر آزاد متوسط الکترون ها، برخوردهای بین الکترون ها و ذرات دیگر کمتر رخ می دهد و در نتیجه، توزیع انرژی الکترون ها (EEDF) ممکن است به طور قابل توجهی از توزیع ماکسولی منحرف شود. این امر به ویژه زمانی اهمیت می یابد که ابعاد محفظه پلاسما با مسیر آزاد متوسط الکترون قابل مقایسه باشد. در چنین شرایطی، اثرات جنبشی نقش مهمی در شکل گیری توزیع انرژی الکترون ها ایفا می کنند [۲۵].

در پژوهش حاضر، با توجه به فشار بالای گاز استفاده شده، انتظار می رود که برخوردهای الکترون - الکترون فراوانی رخ دهد. این برخوردها باعث می شوند که توزیع انرژی الکترون ها به تدریج به سمت توزیع ماکسولی میل کند. با این حال، برای محاسبات دقیق رسوب توان و چگالی گونه های مختلف در پلاسما، لازم است که EEDF به صورت دقیق در شبیه سازی محاسبه شود و به عنوان یک پارامتر ورودی در نظر گرفته شود. به ویژه در شرایطی که درجه یونیزاسیون بالا باشد، تأثیر برخوردهای الکترون - الکترون بر شکل توزیع انرژی الکترون ها قابل توجه خواهد بود.

معادله زیر میدان الکترواستاتیک تولید شده را محاسبه می کند [۲۳، ۲۲]:

$$\nabla \varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla V = \rho \quad (9)$$

که در آن ε_0 گذردهی خلاء است، ε_r گذردهی نسبی (ثابت دی الکتریک) است. میدان الکتریکی فرکانس بالا در یک راکتور مایکروویو در حوزه فرکانس با استفاده از معادله زیر تعیین می شود:

$$\nabla(\mu_r^{-1} \nabla E) - k_0^2 \left(\varepsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega \varepsilon_0} \right) E = 0 \quad (10)$$

ارتباط بین چگالی جریان پلاسما و میدان الکتریکی با وجود یک میدان مغناطیسی DC پیچیده تر می شود. فرمول زیر این رابطه را تعیین می کند:

$$\sigma^{-1} J = E \quad (11)$$

در اینجا σ تانسور رسانایی پلاسما را نشان می دهد که تابعی از چگالی الکترون ها، فرکانس برخورد و چگالی شار مغناطیسی تولید شده است:

$$\alpha = \frac{q}{m_e(v_e + j\omega)} \quad (12)$$

$$\beta = n_e q \alpha \quad (13)$$

را تحریک کرده و به گونه‌های یونی و فعال تقسیم می‌کنند. این گونه‌های فعال تراکم بسیار بالایی در ناحیه پلاسمای تولید شده دارند. بنابراین آن‌ها با یکدیگر برخورد می‌کنند و در طول فرآیند تولید پلازما بیشتر ترکیب می‌شوند. پلاسمای مایکروویو از نظر چگالی الکترون، دمای الکترون‌ها، شبیه‌سازی توزیع میدان الکتریکی در پلاسمای مایکروویو و توان جذبی مایکروویو با تغییر توان ورودی توصیف و تحلیل می‌شود.

شکل ۱ توزیع چگالی الکترون را برای توان‌های ورودی ۱۰ و ۲۰ وات نشان می‌دهد. مشاهدات حاکی از آن است که حداکثر چگالی الکترون کمی پایین‌تر از نقطه تقاطع امواج رخ می‌دهد. همچنین، به دلیل جذب نامتقارن امواج الکترومغناطیسی، توزیع چگالی در جهت محور y نیز از تقارن خارج شده است.

شکل ۲ دمای الکترون در داخل محفظه پلازما را برای توان‌های ورودی ۱۰ و ۲۰ وات نشان می‌دهد. به دلیل فشار عملیاتی بالا، دمای الکترون در کل محفظه نسبتاً پایین و تقریباً ثابت مانده است. بیشترین دما در زیر ناحیه موجبر، جایی که امواج توسط پلازما جذب می‌شوند، مشاهده می‌شود. با دور شدن از این ناحیه، دما کاهش می‌یابد.

شکل ۳ پتانسیل پلازما را برای شرایط مختلف نشان می‌دهد که تقریباً برای همه موارد حدود ۱۰ ولت است. با توجه به رسانایی بالای پلازما، توزیع پتانسیل الکتریکی نقش مهمی در رفتار پلازما ایفا می‌کند.

شکل ۴ نمودارهای توزیع میدان الکتریکی را در دو حالت با توان ورودی ۱۰ و ۲۰ وات نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رود، با افزایش توان ورودی، شدت میدان الکتریکی نیز افزایش می‌یابد و به ترتیب به مقادیر ۲۰۰۰ و ۵۰۰۰ ولت بر متر می‌رسد. این میدان الکتریکی قوی در داخل موجبر ایجاد می‌شود و به نظر می‌رسد تلفات قابل توجهی در آن وجود نداشته باشد.

موج الکترومغناطیسی که به پلازما برخورد می‌کند، توسط الکترون‌های آزاد جذب شده و باعث افزایش دمای آن‌ها می‌شود. این افزایش دما به نوبه خود، باعث یونیزاسیون بیشتر گاز و تولید الکترون‌های جدید می‌شود. نرخ یونیزاسیون به اندازه‌ای است که پلازما به صورت پایدار حفظ شود.

شکل ۴ همچنین کانتورهای چگالی بحرانی پلازما را نشان می‌دهد. چگالی بحرانی، حداکثر چگالی پلاسمایی است که امواج الکترومغناطیسی می‌توانند در آن نفوذ کنند. در مناطقی که چگالی پلازما از چگالی بحرانی بیشتر است، موج به دلیل بازتاب کامل، نمی‌تواند نفوذ کند. از آنجایی که دمای الکترون‌ها در این ناحیه نسبتاً پایین است، پتانسیل پلاسمایی

در اینجا q نشان دهنده بار الکترون، m_e جرم الکترون، n_e و w به ترتیب فرکانس برخورد و فرکانس زاویه‌ای میدان الکترومغناطیسی هستند. در این حالت، معکوس رسانایی پلازما به دلیل اینکه میدان مغناطیسی DC خارجی وجود ندارد، موزب است.

فهرست واکنش‌های شیمیایی داخل محفظه پلازما، علاوه بر واکنش‌های حجمی، واکنش‌های سطحی نیز است که در جدول ۱ و ۲ در نظر گرفته شده است [۲۶].

جدول ۱. واکنش‌های الکترون با گاز آرگون [۲۶]

$\Delta E(\text{ev})$	نوع	فرمول	واکنش
۰	الاستیک	$e + \text{Ar} \Rightarrow e + \text{Ar}$	۱
۱۱/۵	تحریک شدگی	$e + \text{Ar} \Rightarrow e + \text{Ar}^*$	۲
-۱۱/۵	سوپرالاستیک	$e + \text{Ar}^* \Rightarrow e + \text{Ar}$	۳
۱۵/۸	یونیزه شدن	$e + \text{Ar} \Rightarrow 2e + \text{Ar}^+$	۴
۴/۲۴	یونیزه شدن	$e + \text{Ar}^* \Rightarrow 2e + \text{Ar}^+$	۵
-	Penning ionization	$\text{Ar}^* + \text{Ar} \Rightarrow e + \text{Ar} + \text{Ar}^+$	۶
-	Metastable quenching	$\text{Ar}^* + \text{Ar} \Rightarrow \text{Ar} + \text{Ar}$	۷

در اینجا Ar^* نشانگر اتم‌های آرگون برانگیخته، Ar^+ اتم آرگون، Ar^+ اتم آرگون یونیزه شده است [۲۷].

جدول ۲. واکنش‌های سطحی [۲۶]

ثابت چسبناکی ^۱	فرمول	واکنش
۱	$\text{Ar}^* \Rightarrow \text{Ar}$	۱
۱	$\text{Ar}^+ \Rightarrow \text{Ar}$	۲

نتایج شبیه‌سازی

در پژوهش انجام شده، تشکیل پلاسمای آرگون تحت تأثیر تابش مایکروویو با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی چند فیزیکی Comsol Multiphysics نسخه ۵.۶ به صورت عددی شبیه‌سازی شده است. در این شبیه‌سازی‌ها، ارتباط بین پارامترهای پلازما و توان ورودی بررسی شده است. اصل راکتور مایکروویو پیشنهادی به صورت شماتیک در مدل‌سازی شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، مدل به کار گرفته شده از دو مستطیل عمود بر هم تشکیل شده است. از مستطیل افقی، گاز آرگون عبور می‌کند. از مستطیل عمودی، امواج مایکروویو اعمال می‌گردد. در ناحیه فعال پلازما، با اعمال موج الکترومغناطیسی که در فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز کار می‌کند، در گاز تغذیه، تشکیل پلازما آغاز می‌شود و الکترون‌های پر انرژی، مولکول‌های گاز

1 Sticking Coefficient

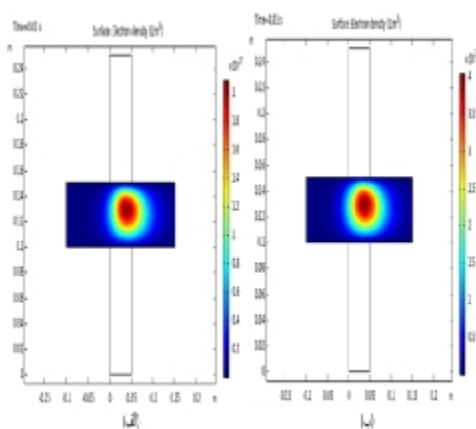
نیز کم خواهد بود.

میدان الکتریکی به دلیل وجود چگالی بحرانی، نمی تواند از آن عبور کند و حداکثر شدت خود را در نزدیکی این مرز خواهد داشت. همچنین، بیشترین میزان رسوب توان نیز در ناحیه ای اتفاق می افتد که چگالی پلاسما به چگالی بحرانی نزدیک است. شکل ۵ نشان می دهد که با افزایش توان ورودی از ۱۰ به ۲۰ وات، اتلاف مقاومتی در پلاسما به طور قابل توجهی افزایش می یابد. دلیل اصلی این افزایش، تولید گونه های فعال مانند الکترون ها، یون ها و رادیکال های آزاد در اثر افزایش یونیزاسیون و برانگیختگی است. افزایش تعداد برخوردهای بین این ذرات، باعث اتلاف انرژی به صورت گرما و در نتیجه افزایش اتلاف مقاومتی می شود.

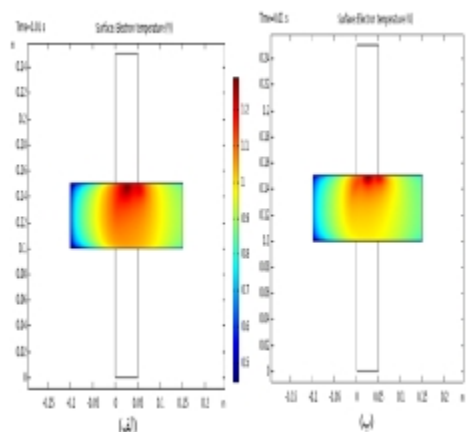
شکل ۶ توزیع دمای الکترون ها را در مدت زمان ۰/۰۱ ثانیه و با توان ورودی ۲۰ وات نشان می دهد. همان طور که در شکل مشاهده می شود، حداکثر دمای الکترون ها (نشان داده شده با رنگ تیره) به تدریج از قسمت افقی کانال به سمت خروجی عمودی آن حرکت می کند.

شکل ۷ نیز توزیع چگالی الکترون ها را در همان بازه زمانی نشان می دهد. در ابتدای فرآیند، چگالی الکترون ها به طور تقریبی در کل قسمت افقی کانال یکسان است. با گذشت زمان، در ۰/۰۰۱ ثانیه چگالی به سمت مرکز کانال متمایل می شود و سپس در ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ ثانیه به سمت خروجی عمودی کانال حرکت می کند.

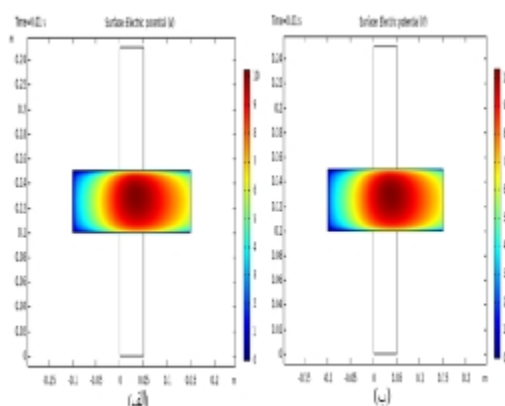
اعمال مد TM روی موجبر باعث حرکت الکترون ها در صفحه در مقیاس زمانی مایکروویو می شود. در مناطقی که چگالی الکترون ها برابر با چگالی بحرانی است (یعنی مرز نفوذ موج)، الکترون ها در معرض یک میدان الکتریکی متناوب با فرکانس بالا قرار می گیرند. به دلیل این میدان متناوب، الکترون ها نمی توانند با میدان الکتریکی سنکرون شوند و در نتیجه انرژی خود را به صورت پیوسته از میدان می گیرند. این پدیده، از دست دادن انسجام فاز بین الکترون ها و میدان الکتریکی نامیده می شود.



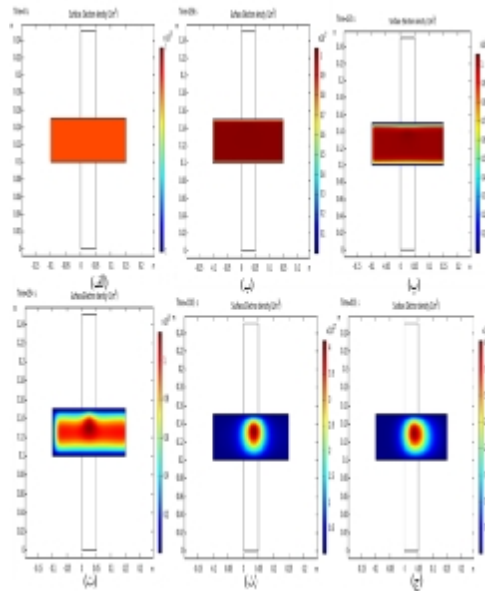
شکل ۱. نمودارهای چگالی الکترونی زمانی که توان ورودی بین (الف) ۱۰ وات، (ب) ۲۰ وات تغییر می کند.



شکل ۲. نمودارهای درجه حرارت الکترونی، زمانی که توان ورودی بین (الف) ۱۰ وات، (ب) ۲۰ وات تغییر می کند.



شکل ۳. نمودارهای پتانسیل الکتریکی زمانی که توان ورودی بین (الف) ۱۰ وات، (ب) ۲۰ وات تغییر می کند.



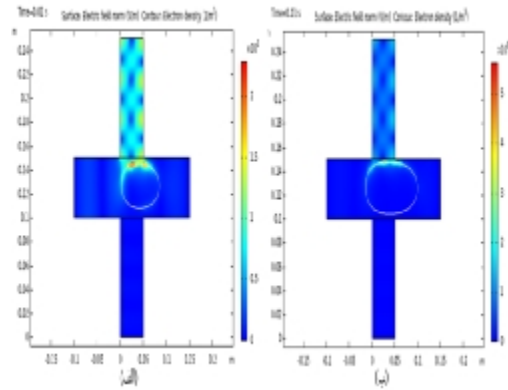
شکل ۷. تغییرات چگالی الکترون‌ها را در حالت اعمال توان ورودی ۲۰ وات و مدت زمان ۰/۱ ثانیه نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

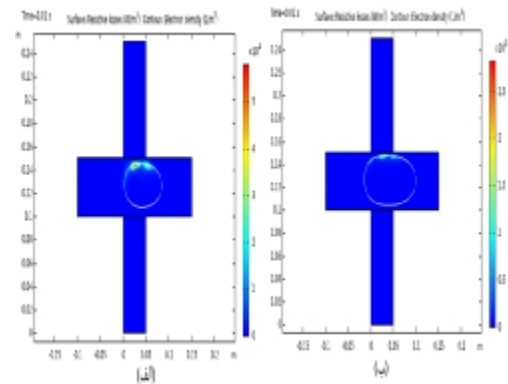
پلاسمای میکروویو (MWP) به عنوان یک فناوری نوظهور و پرکاربرد در حوزه‌های مختلف، پتانسیل بالایی برای ایجاد تغییرات اساسی در صنایع مختلف نشان داده است. نتایج این مطالعه حاکی از آن است که پلاسمای میکروویو در مقایسه با سایر روش‌های تولید پلاسما، به دلیل بهره‌وری انرژی بالاتر و تولید الکترون‌های پرانرژی‌تر، کارایی بیشتری در ایجاد گونه‌های فعال دارد. این ویژگی‌ها باعث می‌شود تا پلاسمای میکروویو به عنوان یک ابزار قدرتمند برای اصلاح سطح مواد، بدون ایجاد آسیب حرارتی، مورد توجه قرار گیرد.

با افزایش توان ورودی به سیستم پلاسمای میکروویو، چگالی الکترون‌ها نیز افزایش می‌یابد که این امر منجر به بهبود عملکرد پلاسما در فرایندهای مختلف می‌شود. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده نیز این موضوع را تأیید می‌کنند.

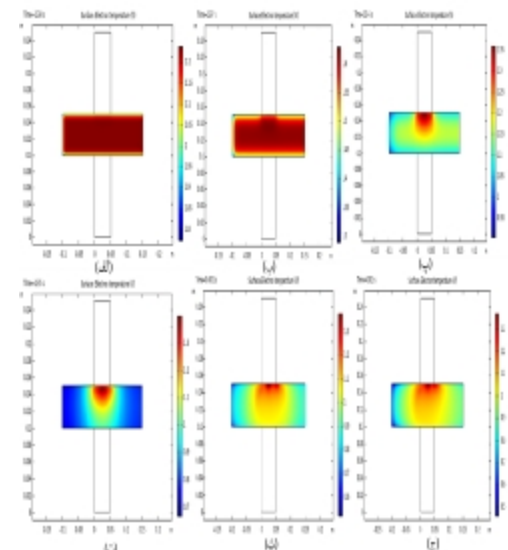
با توجه به مزایای متعدد پلاسمای میکروویو، می‌توان انتظار داشت که در آینده شاهد توسعه بیشتر این فناوری و کاربردهای گسترده‌تر آن در صنایع مختلف باشیم.



شکل ۸. نمودارهای میدان الکتریکی زمانی که توان ورودی بین (الف) ۱۰ وات، (ب) ۲۰ وات تغییر می‌کند.



شکل ۹. نمودارهای اتلاف مقاومتی زمانی که توان ورودی بین (الف) ۱۰ وات، (ب) ۲۰ وات تغییر می‌کند.



شکل ۱۰. تغییرات دمای الکترون‌ها را در بازه زمانی ۰/۱ ثانیه و با توان ورودی ۲۰ وات نشان می‌دهد.

References

- [1] N. Dadashzadeh and E. Poorreza, Comparative analysis and simulation of a dielectric discharge barrier reactor using the finite element method, *Quarterly Journal of Optoelectronic* 6 (3), 7-16

منابع

- (2024). <https://doi.org/10.30473/jphys.2024.69563.1172>
- [2] E. Poorreza and N. Dadashzadeh Gargari, Computational Study of an Inductively Coupled Plasma with Different Copper Coil Designs and

- Dielectric Thickness *Russian Journal of Physical Chemistry A* 98, pp. 249–256. (2024). <https://doi.org/10.1134/S0036024424050224>
- [3] E. Poorreza and N. Dadashzadeh, Modeling and Finite element analysis of argon gas plasma produced by inductively coupled plasma method with variable input power, coil position and dielectric thickness, *Quarterly Journal of Optoelectronic* 6 (1), 33-40 (2023). <https://doi.org/10.1134/S1990793123030235>.
- [4] E. Poorreza and N. Dadashzadeh Gargari, The Investigating and Simulating the Corona Phenomenon in The Power Transmission Lines of Power Networks Using the Finite Element Method, *Majlesi Journal of Telecommunication Devices*. Vol. 12, No. 1, pp.49-52, (2023). DOI: 10.30486/mjtd.2023.1981758.1030
- [5] M.S. Kim, H.Y. Kim, H.K. Shin, H.C. Kwon, J.Y. Sim, J.K. Lee, Comparative study between atmospheric microwave and low-frequency plasmas: Production efficiency of reactive species and their effectiveness, *Japanese Journal of Applied Physics*, 53(5S1) (2014) 05FR02.
- [6] M. Ong, S. Nomanbhay, F. Kusumo, P. Show, Application of microwave plasma technology to convert carbon dioxide (CO₂) into high value products: A review, *Journal of Cleaner Production*, 336 (2022) 130447.
- [7] V. Shumova, D. Polyakov, L. Vasilyak, The Chemi-ionization Rate Constant of Metastable Neon Atoms in a Glow Discharge at Cryogenic Temperature, *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 15 (2021) 691-695.
- [8] E. Poorreza and N. Dadashzadeh Gargari, Modeling and simulation of a microwave-assisted plasma with different input power for plasma-based applications, *Russ. J. Phys. Chem. B* 17 719–724 (2023). <https://doi.org/10.1134/S1990793123030235>.
- [9] B. Ramamurthi, D.J. Economou, I.D. Kaganovich, Effect of electron energy distribution function on power deposition and plasma density in an inductively coupled discharge at very low pressures, *Plasma sources science and technology*, 12(3) (2003) 302.
- [10] P.L. Ventzek, R.J. Hoekstra, M.J. Kushner, Two-dimensional modeling of high plasma density inductively coupled sources for materials processing, *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 12(1) (1994) 461-477.
- [11] R. Bussiahn, R. Gesche, S. Kühn, K. Weltmann, Integrated microwave atmospheric plasma source (IMAPlaS): thermal and spectroscopic properties and antimicrobial effect on *B. atrophaeus* spores, *Plasma Sources Science and Technology*, 21(6) (2012) 065011.
- [12] Y.H. Na, G. Park, E.H. Choi, H.S. Uhm, Effects of the physical parameters of a microwave plasma jet on the inactivation of fungal spores, *Thin Solid Films*, 547 (2013) 125-131.
- [13] H.S. Uhm, Y.C. Hong, Various microplasma jets and their sterilization of microbes, *Thin Solid Films*, 519(20) (2011) 6974-6980.
- [14] Noushin Dadashzadeh. Optimization of Electricity Consumption using Dielectric Barrier Discharge Method (DBD), *Majlesi Journal of Electrical Engineering* 17 (1), 117-121 (2023) <https://doi.org/10.30486/mjee.2023.1975011.1024>
- [15] S.K. Dubey, S. Parab, A. Alexander, M. Agrawal, V.P.K. Achalla, U.N. Pal, M.M. Pandey, P. Kesharwani, Cold atmospheric plasma therapy in wound healing, *Process Biochemistry*, 112 (2022) 112-123.
- [16] J. Muñoz, J. Bravo, M. Calzada, Aluminum metal surface cleaning and activation by atmospheric-pressure remote plasma, *Applied Surface Science*, 407 (2017) 72-81.
- [17] R. Kovacs, N. Bibinov, P. Awakowicz, H.E. Porteanu, S. Kühn, R. Gesche, An integrated atmospheric microwave plasma source, *Plasma Processes and Polymers*, 6(S1) (2009) S233-S236.
- [18] J. Hnilica, J. Schäfer, R. Foest, L. Zajíčková, V. Kudrle, PECVD of nanostructured SiO₂ in a modulated microwave plasma jet at atmospheric pressure, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 46(33) (2013) 335202.
- [19] T. Matsubayashi, H. Hidaka, H. Muguruma, Microwave-assisted atmospheric pressure plasma polymerization of hexamethyldisiloxane, *Japanese Journal of Applied Physics*, 55(7) (2016) 076201.
- [20] A. Kilicaslan, O. Levasseur, V. Roy-Garofano, J. Profili, M. Moisan, C. Côté, A. Sarkissian, L. Stafford, Optical emission spectroscopy of microwave-plasmas at atmospheric pressure applied to the growth of organosilicon and organotitanium nanopowders, *Journal of Applied Physics*, 115(11) (2014) 113301.
- [21] P. Vazquez-Quintal, J. Barrón-Zambrano, S. Medina-Peralta, Y. Moguel-Ordoñez, J. Nelson, D. Muñoz-Rodríguez, Elemental analysis of propolis tinctures by microwave plasma–atomic emission spectrometry (MP-AES), *Analytical Letters*, 56(14) (2023) 2249-2261.
- [22] P.K. Baghel, Application of microwave in manufacturing technology: A review, *Materials Today: Proceedings*, (2023).
- [23] T.U. Rahman, H. Roy, A. Fariha, A.Z. Shoronika, M.R. Al-Mamun, S.Z. Islam, M.S. Islam, H.M. Marwani, A. Islam, A.K. Alsukaibi, Progress in plasma-based doping semiconductor photocatalysts for efficient pollutant remediation and hydrogen generation, *Separation and Purification Technology*, (2023) 124141.
- [24] A.A. Kiss, Distillation technology–still young and full of breakthrough opportunities, *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 89(4) (2014) 479-498.
- [25] E.D. Lavric, P. Woehl, Advanced-FlowTM glass reactors for seamless scale-up, *Chemistry Today*, 27(3) (2009) 45-48.
- [26] F. Sohbatzadeh, H. Soltani, Time-dependent one-dimensional simulation of atmospheric dielectric barrier discharge in N₂/O₂/H₂O using COMSOL Multiphysics, *Journal of Theoretical and Applied Physics*, 12(1) (2018) 53-63
- [27] E. Poorreza and N. Dadashzadeh Gargari, Study of the Time Dependence and One Dimensional Simulation of a Dielectric Barrier Discharge Reactor Driven by Sinusoidal High-Frequency Voltage, *Russ. J. Phys. Chem. B* 17 (3) (2023). DOI:10.1134/S1990793123030107