



مشخصه‌یابی پلاسمای حاصل از منبع میکروموج در حضور میدان مغناطیسی ناشی از آهنرباهای دائمی

زهره دهقانی، الناز خلیلزاده^{*}، نرگس رضوی‌نیا، امیر چخماچی

پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۱۴۳۹۹-۵۱۱۱۳، تهران-ایران

*Email: el_84111005@aut.ac.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۳/۱۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۶/۶

چکیده

در این کار، ابتدا یک پلاسمای میکروموج آرگون با فرکانس ۲/۴۵ گیگا هرتز در فشار پایین به صورت تجربی به دست می‌آید. سپس سعی می‌شود مشخصات پلاسمای تشکیل شده (دما و چگالی الکترون‌ها) در حضور و بدون حضور میدان مغناطیسی با استفاده از بیناب‌نمایی نشر نوری محاسبه و مقایسه شود. از آهنرباهای دائمی جهت محصورسازی پلاسما و تأمین میدان مغناطیسی در مکانیزم تشدید سیکلوترونی الکترونی استفاده شده و به کمک شبیه‌سازی، چیدمان مناسب آهن‌رباها برای تولید میدان مغناطیسی مورد نظر به دست می‌آید. در ادامه با استفاده از مدل‌های فیزیکی مربوطه، دما و چگالی الکترون‌ها محاسبه می‌شود. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد میدان مغناطیسی اثر قابل توجهی روی مشخصات پلاسما داشته و حدود ۱۲۵ درصد افزایش دما و ۲۰۰ درصد افزایش چگالی الکترون‌ها را در پی دارد. همچنین نشان داده می‌شود طبق انتظار با کاهش فشار، دمای الکترون‌ها افزایش و چگالی آن‌ها کاهش می‌یابد که این، صحت آزمایش و نتایج به دست آمده را تأیید می‌کند.

کلیدواژه‌ها: پلاسمای میکروموج، مشخصه‌یابی پلاسما، مکانیزم تشدید سیکلوترونی الکترون

Characterization of microwave source plasma in the presence of a magnetic field caused by a permanent magnet

Z. Dehghani, E. Khalilzadeh*, N. Razavinia, A. Chakhmachi

Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O. Box: 14399-51113, Tehran - Iran

Research Article

Received 6.6.2022, Accepted 28.8.2022

Abstract

In this work, an argon microwave plasma with a frequency of 2.45 GHz at low pressure is experimentally demonstrated. Then, the characteristics of the formed plasma (temperature and density of electrons) in the presence and without the presence of a magnetic field are calculated and compared by optical emission spectroscopy. Permanent magnets are used to confine the plasma and supply the magnetic field in the electron cyclotron resonance mechanism. With the help of simulation, the proper arrangement of the magnets to produce the desired magnetic field is obtained. Then, using the relevant physical models, the temperature and density of the electrons are calculated. The results show that the magnetic field has a significant effect on the plasma characteristics and causes about 125% increase in temperature and 200% increase in electron density. It is also shown that, as expected, as the pressure decreases, the temperature of the electrons increases and their density decreases. This confirms the accuracy of the experiment and the obtained results.

Keywords: Microwave plasma, Plasma characterization, Electron cyclotron resonance mechanism



۱. مقدمه

امروزه، پلاسماهای غیرحرارتی به دلیل توانایی آن در ارائه غلظت‌های بالایی از گونه‌های فعال شیمیایی بدون نیاز به دمای گاز بالا، در کاربردهای مختلف صنعتی اهمیت قابل توجهی یافته‌اند. ویژگی اصلی تولید پلاسماهای غیرحرارتی این است که انرژی الکتریکی عمدتاً برای تولید الکترون‌های پرانرژی بدون گرم کردن محیط گازی استفاده می‌شود. برای تولید و حفظ پلاسماهای غیرحرارتی، وجود نیروی الکتریکی برای تفکیک و تحریک اتم‌ها و مولکول‌ها با تولید بعدی رادیکال‌ها و حالت‌های مولکولی ناپایدار ضروری است. روش‌های مختلفی برای تأمین این نیروی الکتریکی وجود دارد. تمام این روش‌های مختلف اعمال تخلیه الکتریکی گاز، تولید طیف گسترده‌ای از انواع پلاسما را ممکن می‌سازد. بسته به مکانیسمی که برای تولید پلاسماهای غیرحرارتی استفاده می‌شود، می‌توان بین تخلیه‌های زیر تمایز قائل شد: تخلیه تابشی، پلاسماهای جفت شده خازنی، پلاسماهای جفت شده القایی تولید شده در فشار کم و هم‌چنین تخلیه تاج، تخلیه سد دی الکتریک، تخلیه فرکانس رادیویی و تخلیه میکروموج [۱].

تخلیه‌های میکروموج، تخلیه‌های الکتریکی تولید شده توسط امواج الکترومغناطیسی با فرکانس‌های بیش از ۳۰۰ مگاهرتز هستند. طول موج‌های مورد استفاده میکروموج‌ها در محدوده میلی‌متر تا چند ده سانتی‌متر هستند و باید با فرکانس‌های مجاز میکروموج برای کاربردهای صنعتی، پزشکی و علمی مطابقت داشته باشد [۲]. فرکانس ۲/۴۵ گیگا هرتز بیش‌ترین استفاده را دارد. از آنجایی که در پلاسماهای معمول و رایج تولید شده توسط منابع میکروموج، فرکانس برخورد الکترون‌ها نزدیک به فرکانس میکروموج است، مقدار جذب توان در میکروموج‌ها بالا بوده و باعث می‌شود نسبت یونیزاسیون و چگالی پلاسما بالاتری در مقایسه با منابع دیگر به دست آید. با این حال، عملکرد پلاسما میکروموج را می‌توان به روش دیگری مانند اعمال میدان مغناطیسی بهبود بخشید. این باعث افزایش دمای پلاسما می‌شود. این ایده از پدیده فیزیکی انتشار امواج میکروموج در پلاسما ناشی می‌شود. انرژی میکروموج تلف شده در پلاسماهای سرد با جفت شدن فرکانس‌های میکروموج و پلاسما محدود می‌شود. هنگامی که فرکانس پلاسما بیش‌تر از فرکانس میکروموج باشد، بیش‌تر انرژی میکروموج توسط پلاسما منعکس می‌شود [۳]. با این حال، یک میدان مغناطیسی اعمال شده می‌تواند الکترون‌ها را وادار به چرخش در اطراف خطوط شار مغناطیسی کند و فرصت‌های برخورد بیش‌تری با ذرات

دیگر ایجاد کند. در نتیجه انرژی میکروموج بیش‌تری در پلاسما رسوب می‌کند. در این حالت که فرکانس چرخش الکترون برابر با میکروموج باشد، پلاسما در حالت تشدید سیکلوترون الکترون^۱ (ECR) قرار دارد و انرژی جذب شده توسط پلاسما به حداکثر نزدیک می‌شود [۴]. میدان‌های مغناطیسی ایستا خارجی اعمال شده را می‌توان از طریق آهن ربا‌های دائمی یا سیم‌پیچ‌های الکترومغناطیسی که خارج هر ساختار قرار می‌گیرند اعمال کرد. با توجه به اهمیت تأثیر میدان مغناطیسی روی پلاسماهای میکروموج، تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شده است. مطالعات نشان می‌دهند با قرارگیری صحیح میدان مغناطیسی در محفظه تخلیه، بازدهی جفت شدگی میکروموج به شدت بهبود خواهد یافت. میدان‌های مغناطیسی ایستا اتلاف پخش ذرات باردار در چشمه پلاسما و محفظه پردازش را نیز کاهش می‌دهند و بنابراین کارایی کلی رآکتور را بهبود می‌بخشند. علاوه بر این، با اعمال صحیح میدان مغناطیسی ایستا می‌توان چگالی گونه‌های باردار و چگالی‌های شار و دما را در محفظه پردازش کنترل کرد [۵-۸]. هم‌چنین در زمینه رانش‌گرهای پلاسمایی نشان داده شده است که با انتخاب درست میدان مغناطیسی می‌توان زمان شکست پلاسما میکروموج را طولانی کرد [۹]. در کار دیگری، از آرایش صحیح میدان مغناطیسی برای افزایش طول عمر مؤثر کاتر از طریق تنظیم جریان استفاده شده است [۱۰]. لازم به ذکر است استفاده از آهن‌ربای دائمی به جای استفاده از سیم‌پیچ‌های الکترومغناطیسی سبب کاهش قابل توجه هزینه‌ها می‌شود. چرا که یکی از اشکالات سیم‌پیچ‌های الکترومغناطیسی، استفاده از آهن‌رباهای الکتریکی و هزینه‌های مربوط به سیم‌پیچ‌ها، منابع تغذیه، توان مصرفی و خنک کردن کویل‌ها است [۵].

در این مقاله از چیدمان صحیح و مؤثر آهن‌رباهای دائمی جهت محصورسازی پلاسما و تأمین میدان مغناطیسی در مکانیزم تشدید سیکلوترونی الکترونی در حضور امواج میکروموج استفاده شده است. جهت مشخصه‌یابی پلاسماهای تولیدی و تخمین دما و چگالی از یک اسپکترومتر نوری به مدل V-۹۹۰ استفاده شده است. جهت مشخص شدن تأثیر میدان مغناطیسی، طیف‌سنجی در حضور و بدون آهن‌رباهای دائمی انجام شد و مشخصات پلاسماهای تولیدی با هم مقایسه گردید. نتایج به دست آمده، نشان داد که میدان مغناطیسی ناشی از آهن‌رباهای دائمی تأثیر به‌سزایی در افزایش دما و چگالی الکترون‌ها دارد.



۲. چیدمان آزمایش

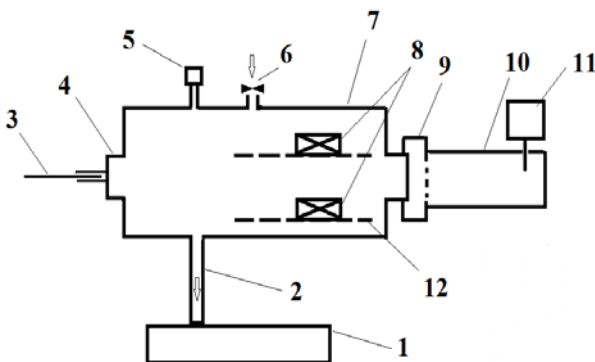
در این آزمایش از چیدمان آهن‌رباهای دایمی جهت محصورسازی پلاسمای در حضور امواج میکروموج استفاده شده است. در حقیقت منبع تولید توان جهت تولید پلاسمای یک مگنترون^۱ با توان خروجی ۱ کیلووات بوده، که می‌تواند امواج میکروموج با فرکانس ۲٫۴۵ گیگا هرتز تولید نماید. این امواج تولیدی از طریق یک موج‌بر استاندارد در باند ۱۳ سانتی‌متری با عنوان تجاری WR-۳۴۰، به محفظه خلأ رآکتور منتقل می‌شوند. البته انتقال به محفظه از طریق یک پنجره بروسیلیکاتی انجام پذیرفته و موج‌بر با یک عایق فیبر استخوانی از محفظه خلأ رآکتور ایزوله الکتریکی گردیده است. هم‌چنان که در بالا نیز ذکر شده امواج میکرو موج به حجم مابین دو آهن‌ربای دایمی (به ابعاد ۱۵ در ۱۰ در ۷٫۵ سانتی‌متر) که در محفظه خلأ رآکتور قرار دارند تابش می‌شود. در شکل ۱ شماتیکی از رآکتور پلاسمایی که طراحی و ساخته شده، به همراه اجزاء تشکیل‌دهنده آن آورده شده است. مطابق شکل ۱ اجزاء رآکتور مورد نظر عبارتند از: (۱) پمپ خلأ توربو، (۲) خروجی محفظه به پمپ، (۳) فیبر نوری اسپکترومتر، (۴) پنجره بروسیلیکاتی دید محفظه خلأ رآکتور، (۵) پیچ خلأ، (۶) ورودی و تزریق گاز به همراه شیرسوزنی، (۷) محفظه خلأ رآکتور، (۸) آهن‌رباهای دایمی، (۹) نجره بروسیلیکاتی دید محفظه خلأ رآکتور به همراه عایق فیبر استخوانی، (۱۰) موج‌بر، (۱۱) مگنترون، (۱۲) نگه‌دارنده‌های آهن‌رباهای دایمی. مشخص است که برای دست‌یابی به مکانیزم تشدید سیکلوترونی الکترونی فرکانس ۲٫۴۵ گیگا هرتز، نیاز به میدان مغناطیسی ۸۷۴٫۸ گوس می‌باشد. با انتخاب فاصله مناسب بین دو آهن‌ربا می‌توان به میدان ۸۷۴٫۸ گوس دست یافت. بنابراین برای رسیدن به بهترین چیدمان آهن‌رباها، از نرم‌افزار کامسول جهت شبیه‌سازی مسئله استفاده می‌کنیم. حالت‌های مختلف بررسی شده و سطوح شار مغناطیسی حاصل از آهن‌رباهای دائمی با هم مقایسه شدند. در نهایت بهترین چیدمان، قرار گرفتن آهن‌رباها به صورت عمودی در امتداد محفظه چنبره به فاصله ۳٫۳ سانتی‌متر از یک‌دیگر به دست آمد که در شکل ۲، کاملاً مشخص می‌باشد. جهت بهره‌گیری بیشتر از سطوح تشدید ECR و قرارگیری الکترون‌های بیش‌تر روی این سطوح، آهن‌رباها در نزدیکی محل تزریق گاز و پنجره کوآرتز قرار داده می‌شوند. در شکل ۳ کانتورهای پتانسیل اسکالر مغناطیسی و چگالی شار مغناطیسی برحسب گوس رسم شده‌اند. لازم به ذکر است جهت دست‌یابی به پلاسمای مبتنی بر مکانیزم تشدید سیکلوترونی الکترونی محفظه خلأ رآکتور باید تا آن‌جا که امکان دارد تمیز و عاری از

آلودگی باشد. فشار اولیه مورد نیاز پس از ورود گاز آرگون به محفظه در آزمایش از مرتبه 10^{-3} میلی بار می‌باشد. این خلأ مورد نیاز به‌وسیله یک پمپ خلأ توربو تأمین شده و فشار در هر لحظه توسط یک گیج خلأ فول رنج از نوع پیرانی- پنینگ ثبت و خوانده می‌شود. پس از رسیدن به فشار مورد نظر، منبع میکروموج روشن شده و پلاسمای طبق انتظار تشکیل می‌شود که در شکل ۴، کاملاً مشخص است. در ادامه با استفاده از طیف‌سنجی نشر نوری، مشخصات پلاسمای ایجاد شده به دست آمده و با حالت بدون حضور آهن‌رباها و میدان مغناطیسی مقایسه شده‌اند.

۳. روش مشخصه‌یابی

۱.۳ طیف‌سنجی نشر نوری

برای شناسایی مشخصات پلاسمای میکروموج آرگون با فرکانس ۲٫۴۵ GHz گیگاهرتز مانند دما و چگالی الکترون در پلاسمای، در شرایط در حضور و بدون حضور میدان مغناطیسی از بیناب‌نمایی نشر نوری استفاده شده است. بدین منظور، داده‌های تجربی با اندازه‌گیری شدت نسبی خطوط آرگون (از آرگون با درجه خلوص ۵ استفاده شده است) در ۳ فشار مختلف (5.4×10^{-3} mbar، 6.3×10^{-3} mbar و 7.4×10^{-3} mbar) به دست آمدند.



شکل ۱. شماتیکی از رآکتور پلاسمایی.



شکل ۲. چیدمان آهن‌ربا.

1. Magnetron

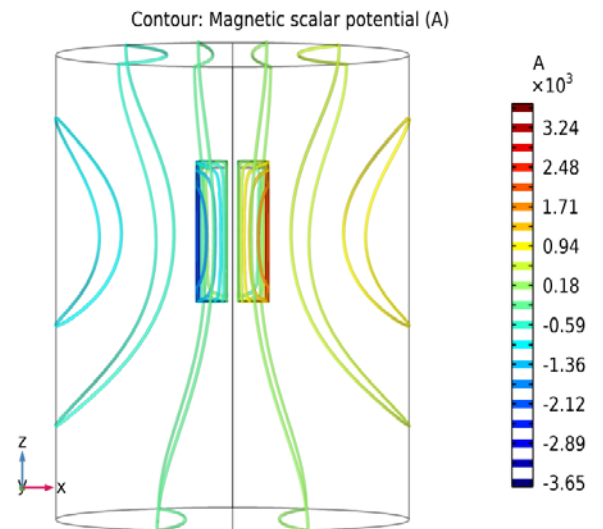


طیف‌سنج ساخته شده مدل V900 (محصول شرکت فن‌آوران فیزیک نوین) با وضوح طیفی ۱ نانومتر، در محدوده طیفی ۲۰۰-۱۱۰۰ nm برای اندازه‌گیری شدت نور نشری از پلاسمای آرگون مورد استفاده قرار می‌گیرد. فیبر فوتو مولتی پلایر که پاسخ آن بین ۲۰۰ تا ۹۰۰ نانومتر است، برای جمع‌آوری فوتون‌ها استفاده می‌شود و سیگنال خروجی آن پس از تقویت به رایانه منتقل می‌شود. به منظور کالیبره کردن کل سیستم نوری از جمله فیبر نوری، از منبع نوری یک نمونه تک اتمی شناخته شده مانند لامپ‌های جیوه و هلیوم، استفاده می‌شود. نتایج کالیبراسیون برای اصلاح شدت خطوط طیفی برای محاسبه مربوطه استفاده می‌شود. پروب منفرد روبه‌روی پنجره در محور ناحیه‌ای که پلاسمای میکروموج تشکیل شده قرار می‌گیرد. طیف به‌دست آمده از پلاسمای میکروموج شامل گونه‌های آرگون می‌باشد. آرگون اتمی در خطوط طیفی کم‌تر از ۴۰۰ نانومتر و گستره ۷۰۰-۸۰۰ نانومتر در همه پلاسما مشاهده می‌شود.

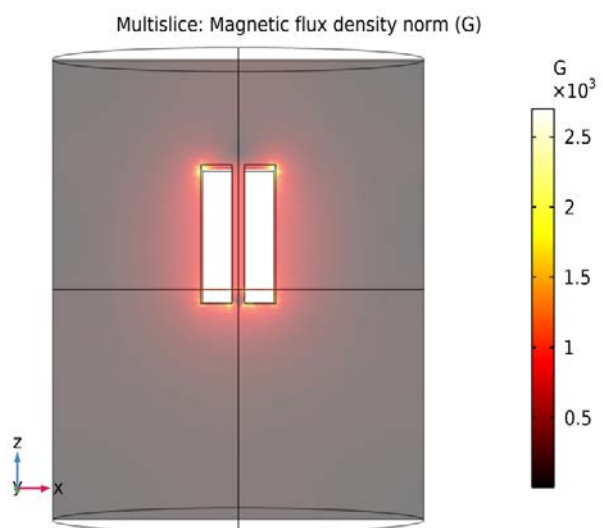
طیف نشری پلاسمای آرگون ۲/۴۵ گیگا هرتز در شرایط فشاری مختلف، در حضور و بدون حضور میدان مغناطیسی در شکل ۵ آورده شده است. خطوط طیفی برجسته در طیف با استفاده از داده‌های NIST شناسایی و برچسب گذاری شده‌اند. در جدول ۱، مشخصات برخی از خطوط طیفی مشاهده شده آورده شده است.

جدول ۱. برخی از خطوط طیفی مشاهده شده در طیف حاصل از پلاسمای آرگون

طول موج (nm)	$A_{ki} \times 10^7$ (s^{-1})	E_k (eV)	g
۳۵۷,۶	۲۷	۱۸,۵	۶
۳۸۸,۰۳	۲,۱	۲۲,۸	۲
۴۱۹,۸	۲۸	۱۴,۵	۵
۴۲۵,۹	۳,۹۸	۱۱,۸	۳
۴۲۷,۵	۸	۱۴,۵۲	۴
۴۸۶,۵	۱,۶	۱۴,۶۴	۶
۶۵۶,۳	۰,۰۲	۱۷,۹	۶
۶۹۶,۵	۰,۶۴	۱۳,۳۲	۳
۷۲۷,۳	۰,۱۸	۱۳,۳۱	۳
۸۱۱,۵	۳,۳۱	۱۳,۰۷	۷



(الف)



(ب)

شکل ۳. کانتورهای (الف) پتانسیل اسکالر مغناطیسی، (ب) چگالی شار مغناطیسی برحسب گاوس.



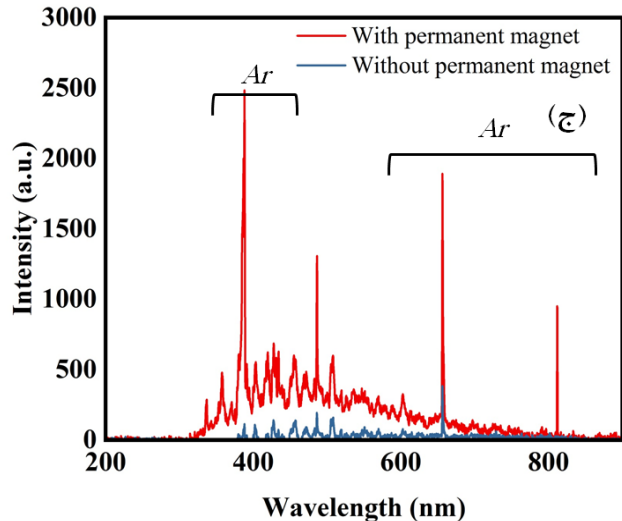
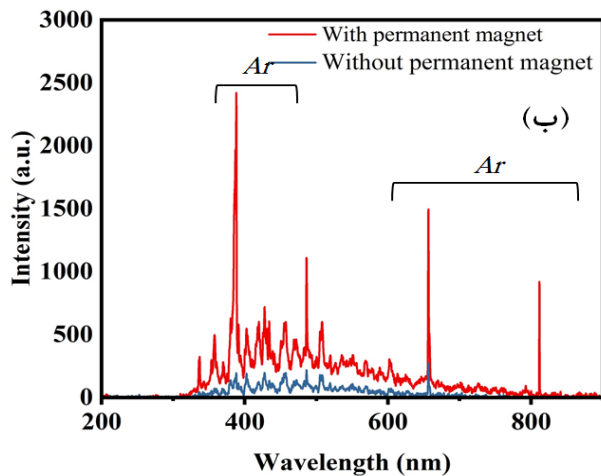
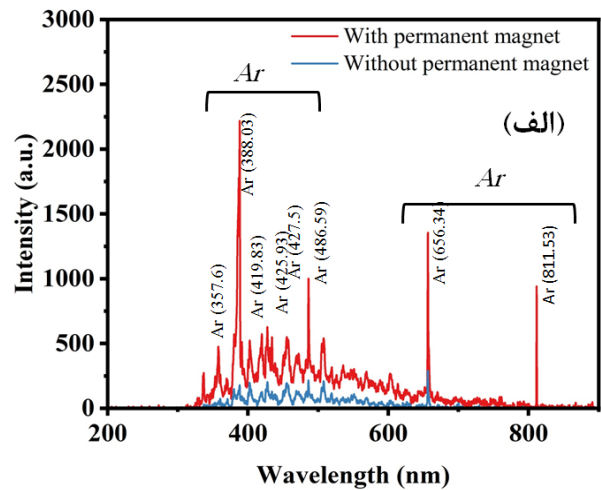
شکل ۴. تصویر تشکیل پلاسما.



همان‌طور که از طیف‌های به‌دست آمده از پلازما مشاهده می‌شود، این طیف‌ها شامل گونه‌های آرگون بوده که در بازه طیفی ۳۵۰-۵۵۰ نانومتر و ۸۵۰-۶۰۰ نانومتر قرار می‌گیرند. همان‌طور که در شکل‌ها بدیهی است خطوط نشری در طیف‌ها، دارای توزیع شدت متفاوتی هستند که می‌تواند به جمعیت‌های مختلف حالت‌های انتشاری مربوطه‌ی آن‌ها نسبت داده شود و از این واقعیت ناشی می‌شود که حالت‌های نشری دارای برانگیختگی‌های آستانه متفاوتی هستند و بنابراین گروه‌های مختلفی از الکترون‌ها را برای برانگیختگی برخوردار می‌کنند. هم‌چنین با توجه به طیف‌ها می‌توان مشاهده کرد که شدت گونه‌های پلاسمایی تحت شرایط یکسان، در حضور میدان مغناطیسی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابند که این پدیده نشان‌دهنده افزایش انرژی و در نتیجه افزایش دمای گونه‌های پلاسمایی در داخل پلازما است.

۲.۳ محاسبه دمای الکترونی و نتایج آن

در طی فرایندهای موجود در پلاسمای میکروموج، الکترون‌های موجود در پلازما از تابش‌های الکترومغناطیسی تشکیل شده، انرژی کسب کرده و بخشی از انرژی خود را از طریق برخورد به ذرات گاز منتقل می‌کنند. این برخوردها بسته به انرژی الکترون‌های فرودی ممکن است کشسان یا غیرکشسان باشند. برخی از اتم‌ها با برخوردهای غیرکشسان به حالت‌های انرژی بالاتر رفته که متعاقب آن واپاشیده شده و فوتون‌های مشخصه ساطع می‌کنند. شدت این فوتون‌های مشخصه اطلاعاتی را در مورد چگالی جمعیت حالت بالایی گونه‌های ساطع‌کننده و هم‌چنین توزیع انرژی الکترون‌ها که انرژی‌شان در اثر فرایند برخورد الکترونی تغییر می‌کند، فراهم می‌نماید [۱۱]. در تخمین دمای الکترونی با استفاده از روش طیف‌سنجی نشر نوری و بدون استفاده از پهن شدگی‌ها، لازم است که پلاسمای مورد نظر در تعادل ترمودینامیکی موضعی و یا شبه تعادل ترمودینامیکی موضعی باشد. در تعادل ترمودینامیکی موضعی^۱ (LTE)، فرض بر این است که توزیع الکترون‌ها منحصراً توسط فرایندهای برخورد ذرات تعیین شوند و تغییرات در پلازما به اندازه کافی سریع رخ دهد تا هر تغییری پلازما را در شرایط تعادل ترمودینامیکی موضعی قرار دهد. بدین منظور باید، فرایند برخورد بر تابش غالب باشد که در این شرایط نیاز به چگالی الکترونی بالایی است. یک معیار پیشنهادی توسط مکورتز [۱۲] بیان می‌شود که برای آن که چگالی بحرانی الکترون، شرایط



شکل ۵. طیف نشری پلاسمای آرگون ۲٫۴۵ گیگا هرتز در شرایط فشاری مختلف و با و بدون حضور میدان در فشارهای (الف) 0.54×10^{-2} mbar، (ب) 6.3×10^{-2} mbar و (ج) 0.74×10^{-2} mbar.



$$\ln \frac{I_{ij} \lambda_{ij} \sum_{i>j} A_{ij}}{A_{ij} a_{ij}} = -\frac{E_{ij}}{kT_e} + C \quad (۴)$$

که در آن a_{ij} ضریب نرخ برانگیختگی ناشی از برخورد الکترون از حالت پایه به حالت i ام و E_{ij} انرژی برانگیختگی از تراز i ام می‌باشند. بنابراین، با فرض این که تابع توزیع انرژی الکترون‌ها ماکسولی است و اتم‌ها از حالت پایه خود بدون هیچ‌گونه تحریک چندمرحله‌ای یا تحریک‌زدایی برانگیخته می‌شوند، دمای الکترون را می‌توان از شیب نمودار بولتزن اصلاح شده به دست آورد. در کار حاضر از همین روش استفاده شده است.

در این بررسی دمای الکترون به عنوان تابعی از فشار محفظه با اندازه‌گیری شدت تعدادی از خطوط آرگون از طیف به دست می‌آید. شکل ۶ نمودار بولتزن را نشان می‌دهد که از شدت‌های انتشار چندین خط طیفی آرگون، با انرژی‌های تحریک آستانه متفاوت در رسم آن استفاده شده است. این خطوط طیفی، حاصل پلاسمای آرگون در فشار $5/4 \times 10^{-3}$ mbar، در حضور و بدون حضور میدان مغناطیسی می‌باشد. در این شکل، دمای الکترونی پلاسمای بدون میدان مغناطیسی در حدود $0/62$ الکترون ولت است، این در حالی است که در حضور میدان مغناطیسی این دما به حدود $1/4$ الکترون ولت می‌رسد. بنابراین شاهد افزایش 125 درصدی دمای الکترون‌های پلاسمای با حضور میدان مغناطیسی هستیم که این نتیجه در توافق با نتایج قبلی می‌باشد [۵، ۷]. در ادامه، در شکل ۷، نمودار تغییرات دمای الکترونی پلاسمای ماکروویو در حضور و بدون حضور میدان مغناطیسی برحسب تغییرات فشار آورده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود در هر دو حالت (در حضور و بدون حضور میدان مغناطیسی)، مطابق انتظار با افزایش فشار، دمای الکترونی کاهش می‌یابد. این پدیده، به دلیل کاهش میانگین انرژی جنبشی با کاهش میانگین مسیر آزاد و برخوردهای مکرر بین الکترون‌ها ناشی از افزایش فشار است. با توجه به وابستگی انرژی جنبشی متوسط به دما، دمای الکترونی نیز کاهش می‌یابد.

تبادل ترمودینامیکی را در محیط فراهم کند بایستی برخورد حداقل 10 برابر فرایند تابش باشد و از معیار مگگیل که به صورت زیر می‌باشد پیروی کند:

$$n_e > 10^{13} T_e^{1/2} \Delta E^2 [\text{ev}] \Leftrightarrow n_e > 10^{18} \text{cm}^{-3} \quad (۱)$$

که در آن n_e چگالی الکترونی، T_e دمای الکترونی و ΔE اختلاف بین 2 تراز می‌باشد. در شرایط تعادل ترمودینامیکی برای محاسبه دما و چگالی می‌توان از رابطه بولتزن استفاده کرد. در این روش از توصیف آماری ساها بولتزن استفاده می‌شود که برای گذار از تراز k به تراز i ، به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\ln \left(\frac{I_{ki} \lambda_{ki}}{A_{ki} g_k} \right) = \frac{-E_k}{k_B T} + \ln \left(\frac{hc}{4\pi U(T)} \frac{N_o}{T} \right) \quad (۲)$$

که در آن λ_{ki} طول موج، I_{ki} شدت اندازه‌گیری شده، A_{ki} احتمال گذار، g_k وزن آماری می‌باشند که برحسب واحد (arb.u) نوشته شده‌اند. در نهایت این رابطه را می‌توان به صورت معادله (۳) نوشت [۱۳]:

$$\ln \left(\frac{I_{ki} \lambda_{ki}}{A_{ki} g_k} \right) = \frac{-E_k}{k_B T} + C \quad (۳)$$

در رابطه (۳)، C ثابت برای یک گونه اتمی معین است. روش نمودار بولتزن، خطاهای ناشی از پلاسمای غیرحرارتی را کاهش می‌دهد. چراکه چندین خط طیفی با انرژی‌های تحریک مختلف در این روش استفاده می‌شود.

از آنجایی که پلاسمای کم فشار، چگالی الکترونی در حدود 10^9cm^{-3} تا 10^{13}cm^{-3} می‌باشد، روش مرسوم نمودار بولتزن در تعیین دمای الکترونی نادرست است زیرا انحراف چگالی اتم یا یون در سطوح برانگیخته از توزیع بولتزن وجود دارد. در این حالت، تحریک مستقیم از حالت پایه با واپاشی تابشی فرایند غالب در افزایش و کاهش جمعیت حالت‌های برانگیخته خواهد بود. طبق نتایج فوجیموتو [۱۴]، تعادل کرونا، فرایند اولیه در پلاسمای کم فشار و کم چگالی است. گوردیلو- وازکز و همکاران مدل کرونا را بررسی کرده و فرمول بولتزن اصلاح شده زیر را بر مبنای این مدل ارائه دادند [۱۵]:



هستند [۱۶]. مطابق با این مدل‌ها، فرایندهای مهم درگیر با ترازهای برانگیخته (۳p، ۵p، ۴p)، برانگیختگی ناشی از برخورد الکترون از حالت پایه هستند. از آنجایی که طول عمر این ترازها به طور قابل توجهی بیش‌تر از ترازهای ۲p است، فرایندهای انتقال جمعیت ناشی از برخورد الکترونی که به چگالی الکترون وابسته هستند، می‌توانند به اندازه فرایندهای تابشی، حتی در فشارهای پایین (۱-۱۰ پاسکال) نیز مهم باشند. در نتیجه، نسبت‌های خطی این ترازها تابعی از چگالی الکترون و مستقل از دمای الکترونی است [۱۷].



که گذارهای ناشی از برخورد الکترون بین ترازهای برانگیخته،



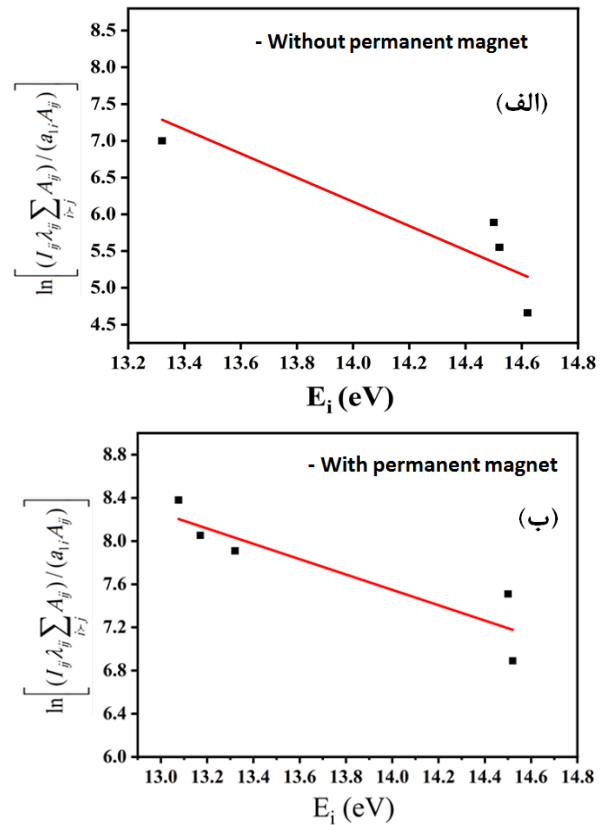
و تابش‌های خودبه خودی



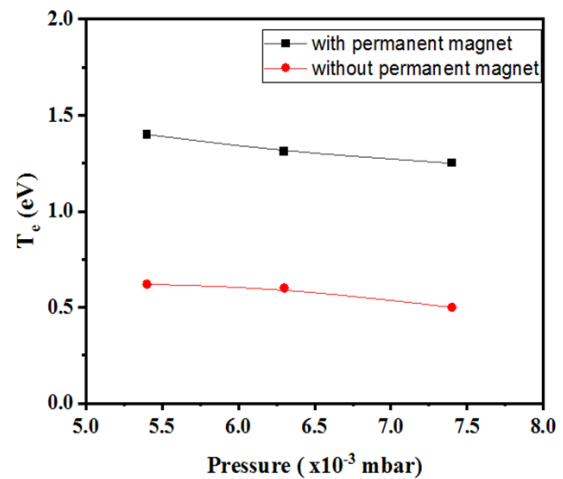
می‌باشند که در آن‌ها Ar_g اتم‌هایی در حالت پایه و Ar_i و Ar_j اتم‌هایی در حالت‌های شبه پایدار یا برانگیخته هستند. قابل ذکر است که گذارهای ناشی از برخورد الکترون، حالت‌های شبه پایدار را نیز درگیر می‌کنند. بنابراین معادله تعادلی نرخ به صورت رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$n_e n_g Q_{app} + n_e n_m Q_{tr,m} = n_e n_{np} Q_{tr} + A_{np} n_{np} \quad (۸)$$

که n_e ، n_g ، n_m و n_{np} به ترتیب چگالی الکترون‌ها، اتم‌های حالت پایه، اتم‌های شبه پایدار و ترازهای برانگیخته هستند، ضریب انیشتین تراز np بوده و Q_{app} ، $Q_{tr,m}$ و Q_{tr} ضرایب نرخ برانگیختگی ناشی از برخورد الکترون از حالت پایه به ترازهای برانگیخته، گذار ناشی از برخورد الکترون از حالت‌های شبه پایدار به ترازهای برانگیخته و گذار بین ترازهای برانگیخته می‌باشند. از طرفی، سطح مقطع‌های گذار مربوط به برخورد الکترونی از حالت‌های شبه پایدار به ترازهایی مانند $Ar(3p1)$ و $Ar(5p5)$ که در آن‌ها، اندازه حرکت زاویه‌ای



شکل ۶. نمودار بولتزمن اصلاح شده خطوط طیفی، حاصل پلاسمای آرگون ۲٫۴۵ GHz در فشار $۵٫۴ \times 10^{-3}$ mbar (الف) بدون حضور میدان مغناطیسی و (ب) با حضور میدان مغناطیسی.



شکل ۷. نمودار تغییرات دمای الکترونی پلاسمای ماکروویو، با و بدون میدان مغناطیسی برحسب تغییرات فشار.

۳.۳ محاسبه چگالی الکترونی و نتایج آن

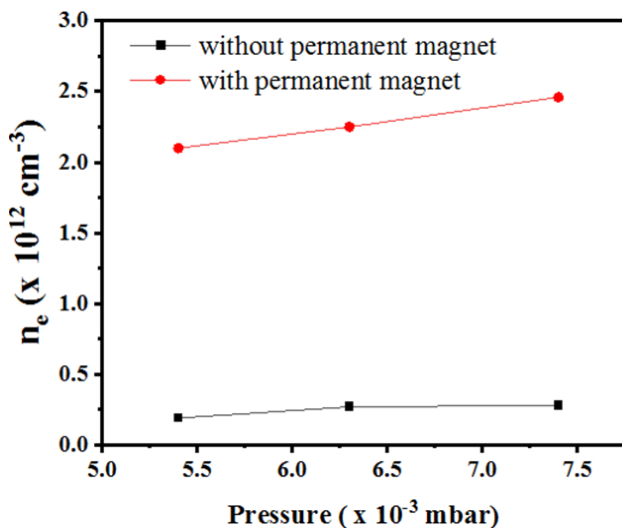
برای محاسبه چگالی الکترون‌ها، در تخلیه‌های حاوی آرگون در محدوده فشاری 10^{-3} - 10^{-1} mbar و محدوده چگالی الکترون 10^9 - 10^{12} cm⁻³، مدل‌های برخوردی تابشی (CR) معمولاً مورد استفاده قرار می‌گیرند که در طیف وسیعی از شرایط نیز معتبر



شده است. مقادیر مرتبط با سطح مقطع‌های ترازهای مختلف از سایت داده‌های اطلاعاتی NIST و کارهای تئوری و تجربی انجام شده در این زمینه در بازه فشار و دمای مورد نظر استخراج شده است [۲۰-۳۰]. با توجه به رابطه (۱۱)، رابطه مرتبط با ۲ تراز را می‌توان به صورت رابطه (۱۲) نوشت.

$$\frac{I_{Ar(3p_1)}}{I_{Ar(5p_5)}} = \frac{Q_{exc}^{Ar(3p_1)}}{Q_{exc}^{Ar(5p_5)}} \cdot \frac{(1+n_e/n_{eC,5p_5})}{(1+n_e/n_{eC,3p_1})} \quad (12)$$

با جای‌گذاری مقادیر به‌دست آمده در رابطه (۱۲)، و به‌دست آوردن چگالی الکترون پلاسمای سیستم، نمودار تغییرات دمای الکترونی پلاسمای میکروموج، در حضور و بدون حضور میدان مغناطیسی برحسب تغییرات فشار در شکل ۸ آورده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، مطابق انتظار با افزایش فشار محفظه، چگالی الکترونی افزایش می‌یابد. در واقع با افزایش فشار، فرکانس برخوردهای الاستیک افزایش یافته و به تبع آن چگالی الکترونی زیاد می‌شود. این نتیجه در توافق با نتایج قبلی در مورد تأثیر پیکربندی مغناطیسی روی افزایش چگالی بوده [۵، ۶] و صحت آزمایش را تأیید می‌کند. از طرفی، به عنوان نتیجه مهم، با اعمال میدان مغناطیسی، چگالی الکترونی از حدود $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ به $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ افزایش پیدا کرده است.



شکل ۸. نمودار تغییرات چگالی الکترونی پلاسمای ماکروویو، با و بدون میدان مغناطیسی برحسب تغییرات فشار.

کوانتومی کل صفر است ($J = 0$)، معمولاً بسیار کوچک می‌باشد [۱۷]. به همین دلیل، برای این نوع گذارها (np_1 و np_5)، جمله دوم $n_e n_m Q_{tr,m}$ در معادله تعادل نرخ (λ) که بستگی به این سطح مقطع گذار دارد، را می‌توان برای آن ترازها، حذف کرد. در این حالت معادله تعادل نرخ (λ) به صورت رابطه (۹) نوشته می‌شود [۱۸].

$$n_e n_g Q_{app} = n_e n_{np} Q_{tr} + A_{np} n_{np} \quad (9)$$

با استفاده از چگالی مشخصه گذار ناشی از برخورد الکترون، کمیت n_{eC} به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود [۱۶]:

$$n_{eC} \equiv \frac{A_{np}}{Q_{tr}} \quad (10)$$

با جای‌گذاری رابطه (۱۰) در (۹)، نسبت خطوط انرژی به صورت زیر به‌دست می‌آید.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{Q_{app,1}}{Q_{app,2}} \cdot \frac{(1+n_e/n_{eC,2})}{(1+n_e/n_{eC,1})} \quad (11)$$

در این جا زیر نویس‌های ۱ و ۲ برای دو تراز برانگیخته متفاوت در حالت‌های np هستند. از طرفی نیز Q_{app} به شدت به حالت‌های پرنرژی وابسته است، این در حالی است که جمله حاوی n_e در داخل پرانتز معادله (۱۱) از فرایندهای گذار ناشی از برخورد الکترونی ناشی می‌شود که عمدتاً توسط الکترون‌های بالک ایجاد می‌شوند و وابستگی انرژی الکترونی بسیار ضعیفی دارند [۱۶]. برای تعیین چگالی الکترونی با نسبت خط از رابطه (۱۱)، باید دو تراز را انتخاب کرد که شرایط زیر را برآورده کند:

۱) نسبت $Q_{app,1}/Q_{app,2}$ از آن دو تراز باید مستقل از دمای الکترونی باشد و ۲) دو مقدار n_{eC} با یکدیگر متفاوت باشند. در سال ۲۰۰۷، زو و همکارانش [۱۹] با استفاده از روش رگرسیون خطی، حدود چگالی مشخصه الکترون را تحت شرایط فشار پایین برای ترازهای برانگیخته ($3p$ ، $5p$ ، $4p$) به‌دست آوردند و چگالی مشخصه الکترون برای ترازهای مختلف را از مرتبه 10^{11} – 10^{12} cm^{-3} محاسبه نمودند. با توجه به موارد گفته شده در بالا، در این کار نیز، برای محاسبه چگالی الکترون، از شدت‌های به دست آمده از داده‌های طیف‌سنجی نشر نوری مرتبط با ۲ تراز برانگیخته $Ar(5p_5)$ و $Ar(3p_1)$ استفاده



۴. نتیجه‌گیری

در این کار، اثر حضور میدان مغناطیسی ناشی از آهن‌ربای دائمی روی مشخصات پلاسمای آرگون حاصل از منبع میکروموج با فرکانس ۲٫۴۵ گیگا هرتز در فشار پایین بررسی شد. با استفاده از نتایج شبیه‌سازی کد کامسول، بهترین چیدمان برای آهن‌رباها طوری که در فضای بیش‌تری میدان مغناطیسی ۸/۸۷۴ گوس را تولید کنند به‌دست آمد. برای شناسایی مشخصات پلاسمای تشکیل شده، مانند دما و چگالی الکترون، با شرایط در حضور و بدون حضور میدان مغناطیسی از بیناب‌نمایی نشر نوری استفاده شد. نتایج حاصل از بیناب‌نمایی، به کمک مدل‌های فیزیکی تفسیر و دما و چگالی الکترون‌ها در پلاسما محاسبه گردید. نتایج نشان‌دهنده افزایش محسوس و ۲۰۰ درصد چگالی الکترون‌ها و ۱۲۵ درصد دمای آن‌ها در حضور میدان مغناطیسی می‌باشد. در واقع با استفاده از پیکربندی بسیار ساده و استفاده از آهن‌رباهای بلوکی دائمی، افزایش قابل توجه در مشخصات پلاسما به‌دست آمد. هم‌چنین مطابق انتظار با افزایش فشار، چگالی الکترون‌ها افزایش یافته و دمای آن‌ها کاهش پیدا کرد. در واقع، با افزایش فشار، فرکانس برخورد‌های الاستیک افزایش یافته که به تبع آن چگالی الکترونی زیاد و دما کم‌تر می‌شود. همین مسأله صحت آزمایش ما و نتایج به‌دست آمده را تأیید می‌کند.

مراجع

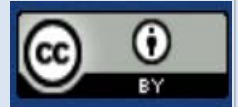
- Yang Juan, et al, *Effect of applied magnetic field on a microwave plasma thruster*, *Physics of Plasmas*, **15(2)**, 023503 (2008).
- G. Neumann, K-H. Kretschmer, *Characterization of a new electron cyclotron resonance source working with permanent magnets*, *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, **9(2)**, 334-338 (1991).
- Wang Lin, et al, *Transient analysis of light brightness emitted from high power microwave nitrogen breakdown under external dc magnetic field*, *Physics of Plasmas*, **27(12)**, 123510 (2020).
- Morishita Takato, et al, *Effect of nozzle magnetic field on microwave discharge cathode performance*, *Acta Astronautica*, **165**, 25-31 (2019).
- N. Bibinov, H. Halfmann, P. Awakowicz, *Determination of the electron energy distribution function via optical emission spectroscopy and a Langmuir probe in an ICP*, *Plasma Sources Science Technology*, **17(3)**, 035004. 15, (2008).
- R. McWhirter, *Plasma Diagnostic Techniques*, *Academic Press*, 7256. 046.
- A. Qayyum, et al, *Optical actinometry of the N-atom density in nitrogen plasma*, *Plasma Devices and Operations*, **15(2)**, 87-93 (2007).
- Fujimoto Takashi, *Kinetics of ionization-recombination of a plasma and population density of excited ions. II. Ionizing plasma*, *Journal of the Physical Society of Japan*, **47(1)**, 273-281 (1979).
- Niu Tian-Ye, et al, *A comparison among optical emission spectroscopic methods of determining electron temperature in low pressure argon plasmas*, *Chinese Physics*, **16(9)**, 2757 (2007).
- J. Vlček, *A collisional-radiative model applicable to argon discharges over a wide range of conditions: I. Formulation and basic data*, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **22**, 623 (1989).
- J.B. Boffard, C.C. Lin, C.A. DeJoseph, *Application of excitation cross sections to optical plasma diagnostics*, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **37**, R143-61 (2004).
- Xi-Ming Zhu, and Yi-Kang Pu, *Optical emission spectroscopy in low-temperature plasmas containing argon and nitrogen: determination of the electron temperature and density by the line-ratio method*, *Journal of Physics D: Applied Physics*, **43(40)**, 403001 (2010).
- Xi-Ming Zhu, et al, *Electron density and ion energy dependence on driving frequency in capacitively coupled argon plasmas*, *Journal of Physics D: Applied Physics*, **40(22)**, 7019 (2007).
- M. Nikolić, et al, *Measurements of population densities of metastable and resonant levels of argon using laser induced fluorescence*, *Journal of Applied Physics*, **117(2)**, 023304 (2015).
- Xi-Ming Zhu, et al, *Determination of state-to-state electron-impact rate coefficients between Ar excited states: a review of combined diagnostic experiments in afterglow plasmas*, *Plasma Sources Science and Technology*, **25(4)**, 043003 (2016).
- Lieberman, Michael A., and Alan J. Lichtenberg, *Principles of plasma discharges and materials processing*, *John Wiley & Sons*, (2005).
- Moisan, Michel, and Jacques Pelletier, eds., *Microwave excited plasmas*, *Elsevier*, (1992).
- Yang, Juan, Yingqiao Xu, Zhiqiang Meng, and Tielian Yang, *Effect of applied magnetic field on a microwave plasma thruster*, *Physics of Plasmas*, **15(2)**, 023503 (2008).
- R.L. Stenzel, et al, *Magnetic dipole discharges. II. Cathode and anode spot discharges and probe diagnostics*, *Physics of Plasmas*, **20(8)**, 083504 (2013).
- T.D. Mantei, S. Dhole, *Characterization of a permanent magnet electron cyclotron resonance plasma source*, *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, **9(1)**, 26-28 (1991).
- Chen, Longwei, et al, *On the generation of magnetic field enhanced microwave plasma line*, *Physics of Plasmas*, **23(12)**, 123509 (2016).



22. K. Katsonis, et al, *Argon 4s and 4p excited states atomic data applied in ARC-JET modeling*, *International Journal of Aerospace Engineering*, 2011 (2011).
23. John B. Boffard, et al, *Electron-impact excitation of argon: Optical emission cross sections in the range of 300–2500 nm*, *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, **93(6)**, 831-863 (2007).
24. S. Wu, et al, *Effect of Pulse Rising Time of Pulse dc Voltage on Atmospheric Pressure Non-Equilibrium Plasma*, *Plasma Processes and Polymers*, **10(2)**, 136-140 (2013).
25. D.L. Adams, W. Whaling, *Argon branching ratios for spectral-intensity calibration*, *JOSA*, **71(8)**, 1036-1038 (1981).
26. Danzmann Karsten, and Manfred Kock, *Argon branching ratios for spectral intensity calibration: a reply*, *JOSA*, **72(11)**, 1556-1557 (1982).
27. C.H. Corliss, J.B. Shumaker Jr., *Transition probabilities in argon I*, *Journal of Research of the National Bureau of Standards. Section A, Physics and Chemistry*, **71(6)**, 575 (1967).
28. J. Ethan Chilton, et al, *Measurement of electron-impact excitation into the 3 p 5 4 p levels of argon using Fourier-transform spectroscopy*, *Physical Review A*, **57(1)**, 267 (1998).
29. John B. Boffard, et al, *Measurement of electron-impact excitation cross sections out of metastable levels of argon and comparison with ground-state excitation*, *Physical Review A*, **59(4)**, 2749 (1999).
30. Tobin Weber, John B. Boffard, Chun C. Lin, *Electron-impact excitation cross sections of the higher argon 3 p 5 np (n= 5, 6, 7) levels*, *Physical Review A*, **68(3)**, 032719 (2003).

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

زهرة دهقانی، الناز خلیلزاده، نرگس رضوی‌نیا، امیر چخماچی (۱۴۰۲)، مشخصه‌یابی پلاسمای حاصل از منبع میکروموج در حضور میدان مغناطیسی ناشی از آهنرباهای دائمی،

۱۲۹-۱۲۰، ۱۰۵

DOI: 10.24200/nst.2022.1141.1751

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1487.html