

طراحی، شبیه سازی و ساخت منبع پلاسمایی ECR

INC29-1280

الناز خلیل زاده، زهره دهقانی*، نرگس رضوی نیا، امیر چخماچی

پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، تهران- ایران

چکیده:

در این کار، یک منبع پلاسمایی تشدید سیکلوترونی (ECR) با فرکانس ۲/۴۵ گیگا هرتز طراحی و ساخته شده است. برای ایجاد مکانیزم تشدید سیکلوترونی الکترون از دو آهنربای دائمی بلوکی که میدان مغناطیسی G 875 را تولید می کنند، استفاده شده است. جهت مشخصه یابی برخی از پارامترهای پلاسمای تشکیل شده از بیناب نمایی نشر نوری در حضور و بدون حضور میدان مغناطیسی کمک گرفته شده است. در ادامه با استفاده از مدل های فیزیکی مربوطه، دما و چگالی الکترونی پلاسما محاسبه شده است. نتایج بدست آمده نشان می دهد میدان مغناطیسی اثر قابل توجه بر روی مشخصات پلاسما داشته است به طوری که با حضور میدان مغناطیسی، دمای الکترون ها از ۰,۶ الکترون ولت به ۱,۴ الکترون ولت و چگالی الکترونی از حدود $0.2-3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ به $2.2-3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ افزایش پیدا کرده است. علاوه بر آن این نتایج با نتایج شبیه سازی بدست آمده از نرم افزار کامسول همخوانی دارد.

کلیدواژه ها: منبع پلاسمایی، مکانیزم تشدید سیکلوترونی الکترون، بیناب نمایی نشر نوری، چگالی و دمای پلاسما

Design, simulation and construction of ECR plasma source

Elnaz Khalilzadeh, Zohreh Dehghani*, Narges Razavinia, Amir Chakhmachi

The Plasma Physics and Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran

Abstract:

In this work, an ECR plasma source with a frequency of 2.45 GHz is designed and built. Two block permanent magnets have been used to create the electron cyclotron resonance mechanism. In order to characterize the formed plasma, the optical emission spectrometer has been used in the presence and absence of a magnetic field. In the following, using the relevant physical models, the temperature and density of electrons has been calculated. The obtained results show that the magnetic field had a significant effect on the characteristics of the plasma, so that with the presence of the magnetic field, the temperature of electrons from 0.6 eV to 1.4 eV and the electron density from $0.2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ to $2.2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ has increased. In the following, it is shown that these results are consistent with the results obtained from the COMSOL software.

Keywords: plasma source, electron cyclotron resonance mechanism, optical emission spectrometer, plasma temperature and density

۱. مقدمه

پلاسمای سرد یا غیر حرارتی (NTP) با اعمال میدان الکتریکی یا الکترومغناطیسی به گاز تولید می‌شود. انرژی میدان باعث می‌شود که الکترون‌های آزاد شتاب گرفته و اتم‌ها و مولکول‌ها گاز را یونیزه کنند، که در نتیجه الکترون‌های آزاد بیشتری تولید می‌شوند که به نوبه خود باعث یونیزاسیون جدید می‌شوند. علاوه بر این، الکترون‌های برانگیخته می‌توانند اتم‌ها و مولکول‌ها را به سطوح انرژی بالاتر برانگیزند. در واقع NTP یک فناوری پیشرفته است که در دهه اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده و به طور گسترده در زمینه‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. امروزه تیمار پلاسما در نیمه هادی‌ها، منسوجات، کشاورزی و زیست پزشکی دارای کاربرد می‌باشد [۱-۳]. روش‌های مختلفی برای تولید پلاسماهای سرد وجود دارد که می‌توان به تخلیه تابشی، پلاسما جفت شده خازنی، پلاسما جفت شده القایی تولید شده در فشار کم و همچنین تخلیه تاج، تخلیه سد دی‌الکترونیک، تخلیه فرکانس رادیویی و تخلیه میکروموج اشاره داشت.

تخلیه‌های میکروموج، تخلیه‌های الکتریکی تولید شده توسط امواج الکترومغناطیسی با فرکانس‌های بیش از ۳۰۰ مگاهرتز هستند. 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 پلاسمای بالاتری در مقایسه با منابع دیگر بدست آید. با این حال، عملکرد پلاسما میکروموج را می‌توان به روش دیگری مانند اعمال میدان مغناطیسی بهبود بخشید. 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]. با اعمال صحیح میدان مغناطیسی ایستا می‌توان چگالی گونه‌های باردار و چگالی‌های شار و دما را در محفظه پردازش کنترل کرد [۵-۸]. میدان‌های مغناطیسی ایستا خارجی اعمال شده را می‌توان از طریق آهن‌رباهای دائمی یا سیم‌پیچ‌های الکترومغناطیسی که خارج هر ساختار قرار می‌گیرند اعمال کرد. 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 سیم-پیچ‌ها، منابع تغذیه، توان مصرفی و خنک کردن کویل‌ها است [۵].

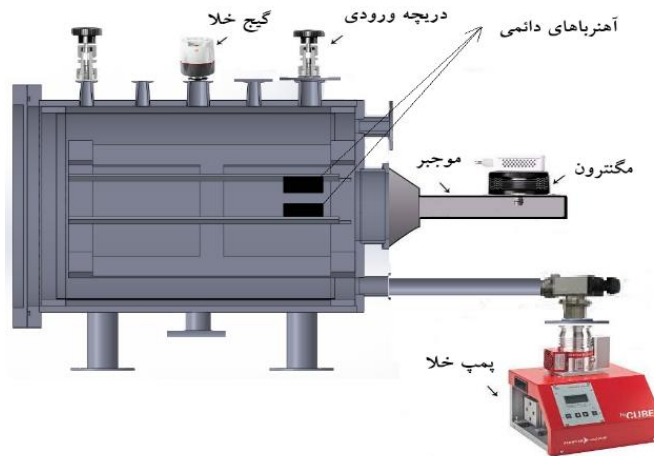
در این مقاله منبع پلاسمایی ECR با استفاده از میدان مغناطیسی ناشی از دو آهن‌ربای بلوکی طرحی و ساخته شده است. جهت مشخصه‌یابی پلاسمای تولیدی و تخمین دما و چگالی از یک اسپکترومتر نوری به مدل V-990 استفاده شده است. جهت مشخص شدن تاثیر میدان مغناطیسی، طیف سنجی در حضور و بدون حضور آهن‌رباهای دائمی انجام شد و مشخصات پلاسماهای تولیدی با هم مقایسه گردیده. در ادامه با استفاده از نرم افزار کامسول نیز نتایج بدست آمده راستی آزمایی شد. نتایج بدست آمده، نشان می‌دهد که میدان مغناطیسی ناشی از آهن‌رباهای دائمی تاثیر بسزایی در افزایش دما و چگالی الکترون‌ها دارد.

۲. چیدمان آزمایشگاهی

یک نمودار شماتیک از راکتور پلاسما میکروویو ECR در شکل ۱ نشان داده شده است. منبع انرژی برای تولید پلاسما یک مگنترون با توان خروجی ۱ کیلو وات است که می‌تواند امواج میکروویو با فرکانس ۲,۴۵ GHz تولید کند. مد TE₁₀ از این امواج تولید شده از طریق یک موجبر مستطیلی استاندارد WR-340 به محفظه راکتور استوانه‌ای از جنس استیل (۳۰ سانتی‌متر قطر، ۴۰ سانتی‌متر طول و ۲,۵ میلی‌متر ضخامت) منتقل می‌شود. گاز آرگون با گرید ۵ از شیر ورودی

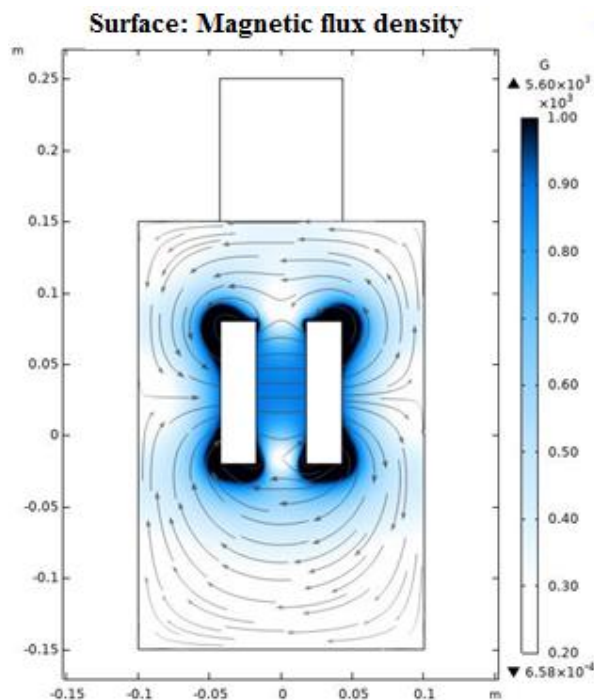
¹ Electron Cyclotron Resonance

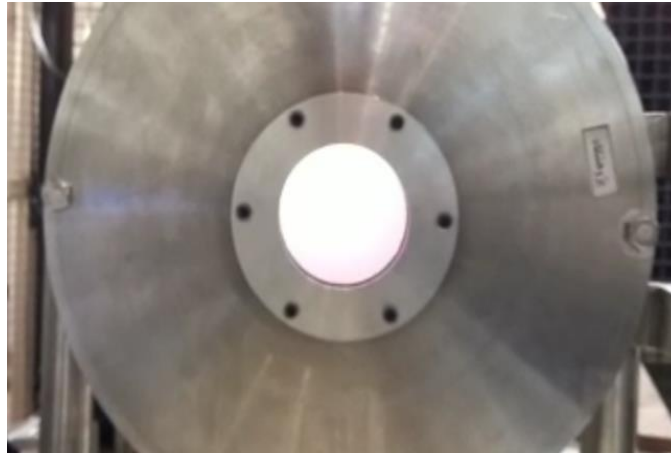
وارد محفظه می‌شود. سیستم خلاء از پمپ توربو تشکیل شده است که به کمک یک پمپ چرخشی مکانیکی فشار را در حدود یک هزارم میلی بار نگه می‌دارد.



شکل ۱: شماتیکی از راکتور پلاسمایی

مشخص است که برای دستیابی به مکانیزم تشدید سیکلوترونی الکترونی فرکانس $2/45$ GHz، نیاز به میدان مغناطیسی 875 G می‌باشد. این میدان مغناطیسی توسط ساختار آهنربای دائمی که از دو بلوک آهنربایی (به ابعاد 15 cm در 10 در 7.5) تشکیل شده است، تامین می‌شود. با انتخاب فاصله مناسب بین دو آهنربا می‌توان به میدان دلخواه دست یافت. بنابراین برای رسیدن به بهترین چیدمان آهن‌رباها، از نرم افزار کامسول جهت شبیه‌سازی مساله 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 $3/3$ cm از یکدیگر بدست آمد که در این حالت چگالی شار مغناطیسی بر حسب گاوس در شکل ۲ رسم شده است. جهت بهره‌گیری بیشتر از سطوح تشدید ECR و قرارگیری الکترون‌های بیشتر روی این سطوح، آهنرباها در نزدیکی محل تزریق گاز قرار داده می‌شوند، در ادامه پس از رسیدن به فشار مورد نظر، منبع میکروموج روشن شده و پلازما طبق





شکل ۳: تصویر تشکیل پلاسما

انتظار تشکیل می‌شود که در شکل ۳، کاملاً مشخص است. در ادامه، انرژی انتقال یافته به پلاسما گونه‌های گازی مختلفی را در حالت‌های برانگیخته تولید می‌کند، برخی از این گونه‌ها را می‌توان بر اساس طیف‌های نشر نوری مشخصه پلاسما شناسایی کرد. طیف سنچ مدل V900 (محصول شرکت فناوران فیزیک نوین) با وضوح طیفی ۱ nm، 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 روبروی پنجره در محور ناحیه‌ای که پلاسمای میکروموج تشکیل شده قرار می‌گیرد. طیف بدست آمده از پلاسمای میکروموج شامل گونه‌های آرگون می‌باشد. آرگون اتمی در خطوط طیفی کمتر از ۴۰۰ nm و گستره ۷۰۰-۸۰۰ nm در همه پلاسما مشاهده می‌شود.

۳. شبیه سازی مساله

به منظور مقایسه نتایج تجربی به دست آمده با مدل‌های نظری، شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار کامسول با در نظر گرفتن پیکربندی و داده‌های تجربی مشابه انجام شده است. در این نرم افزار، پلاسمای ECR در دو مرحله اعمال می‌شود: (۱) ابتدا میدان مغناطیسی ساکن تولید شده توسط آهنرباها را با استفاده از ماژول AC/DC (میدان مغناطیسی، بدون جریان) محاسبه می‌شود (شکل ۲).

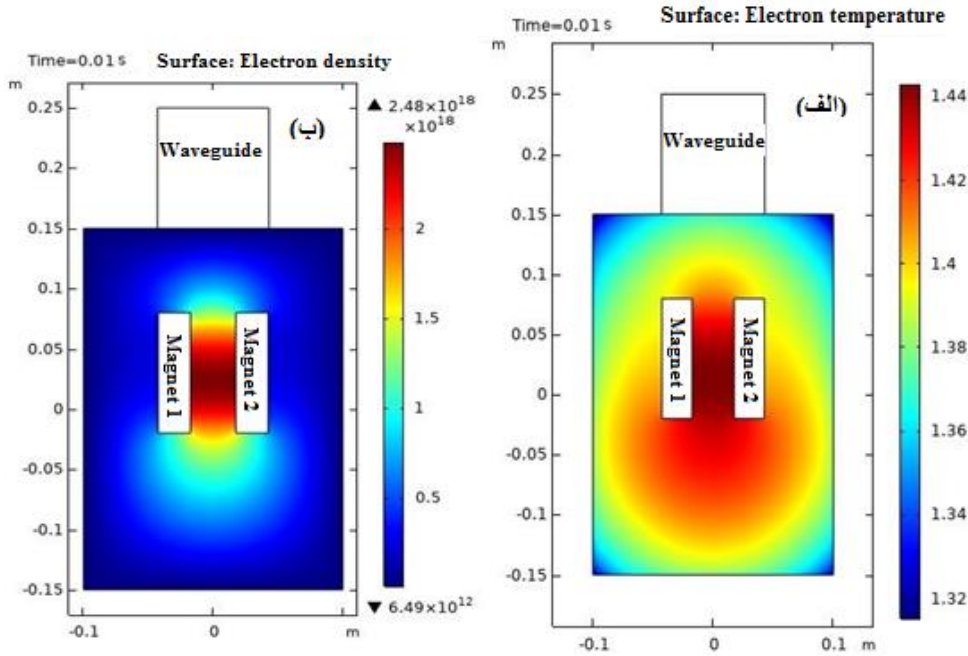
(۲) سپس، از میدان مغناطیسی بدست آمده در مرحله اول، برای حل مساله اصلی و بدست آوردن مشخصات پلاسما استفاده می‌گردد. در این مرحله از دو ماژول RF و ماژول پلاسما به طور همزمان استفاده می‌شود.

در شکل ۴، نتایج شبیه سازی را برای (الف) دما و (ب) چگالی الکترون‌ها در پلاسما در فشار $10^{-4} \times 5/4$ mbar، و در شرایطی که میدان مغناطیسی اعمال شده، نشان می‌دهد. علاوه بر آن واکنش‌های در نظر گرفته شده به همراه سطح مقطع آن‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: واکنش‌های در نظر گرفته شده در شبیه سازی به همراه سطح مقطع آن‌ها

Reaction	Formula	Type	$\epsilon\Delta(eV)$
1	$e+Ar \Rightarrow e+Ar$	Elastic	0
2	$e+Ar \Rightarrow e+Ar_s$	Excitation	11.5
3	$e+Ar_s \Rightarrow e+Ar$	Superelastic	-11.5
4	$e+Ar \Rightarrow 2e+Ar^+$	Ionization	15.8
5	$e+Ar_s \Rightarrow 2e+Ar^+$	Ionization	4.24

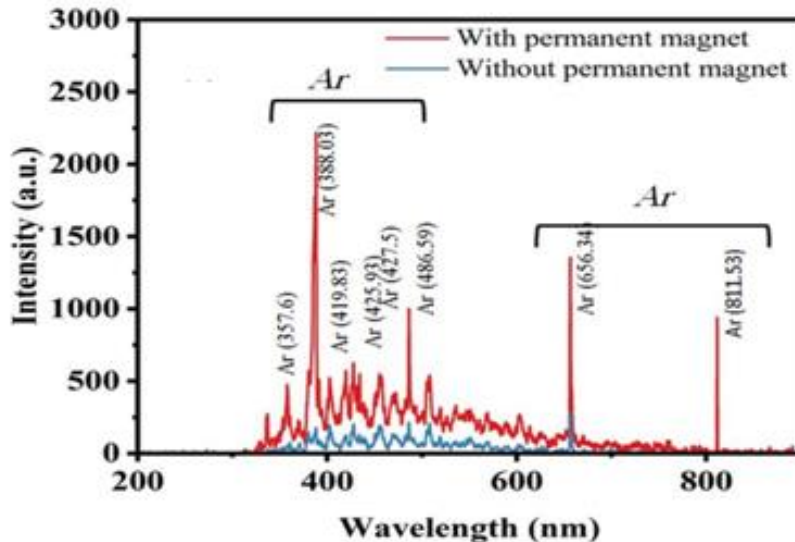
6	$\text{Ars} + \text{Ars} \Rightarrow \text{e} + \text{Ar} + \text{Ar}^+$	Penning ionization	-
7	$\text{Ars} + \text{Ars} \Rightarrow \text{Ar} + \text{Ar}^+$	Metastable quenching	-



شکل ۴: نتایج شبیه سازی برای (الف) دما و (ب) چگالی الکترون‌ها در پلازما در فشار $10^{-3} \times 5/4$ ، در حضور میدان مغناطیسی

۴. نتایج تجربی

طیف نشری پلاسمای آرگون $2/45$ GHz در حضور و بدون حضور میدان مغناطیسی در فشار $10^{-3} \times 5/4$ mbar، در شکل ۵ آورده شده است. خطوط طیفی برجسته در طیف با استفاده از داده‌های NIST شناسایی و برچسب گذاری شده‌اند. همانطور که از طیف‌های بدست آمده از پلازما مشاهده می‌شود، این طیف‌ها شامل گونه‌های آرگون بوده که در بازه طیفی $550 - 350$ nm و $600 - 850$ nm قرار می‌گیرند. همانطور که در شکل ۵ مشخص 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



شکل ۵: طیف نشری پلاسمای آرگون ۲/۴۵ گیگا هرتز در حضور و بدون حضور میدان مغناطیسی در فشار $10^{-10} \times 4/5$ mbar

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 می‌یابد که این پدیده نشان دهنده افزایش انرژی و در نتیجه افزایش دمای گونه‌های پلاسمایی در داخل پلازما است. در ادامه با استفاده از خطوط طیفی منتشر شده سعی می‌شود پلاسمای تولید شده در فشار $10^{-10} \times 4/5$ mbar و برای مقایسه با شبیه سازی انجام شده و تایید نتایج بدست آمده، مشخصه‌یابی شود. در طی فرآیندهای 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 ساطع کننده و همچنین توزیع انرژی الکترون‌ها که انرژی‌شان در اثر فرآیند برخورد الکترونی تغییر می‌کند، فراهم می‌نماید [۹]. در تخمین دمای الکترونی با استفاده از روش طیف سنجی 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^۲ (LTE)، فرض بر این است که توزیع الکترون‌ها منحصراً توسط فرآیندهای 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 [۱۰-۱۲]. در این صورت با استفاده از تئوری‌های فیزیکی موجود، دمای الکترونی پلاسمای ماکروویو در حضور و بدون حضور میدان مغناطیسی و در فشار $10^{-10} \times 4/5$ mbar بدست آورده شد. در این فشار، دمای الکترونی پلازما 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 پلازما با حضور میدان مغناطیسی هستیم که این نتیجه در توفیق با نتایج قبلی می‌باشد [۵ و ۷]. علاوه بر آن نتایج بدست آمده دمای الکترونی، در توفیق کامل با مقادیر بدست آمده در شبیه سازی دستگاه با نرم افزار کامسول است که در بخش قبل آورده شده است. همچنین برای محاسبه چگالی الکترون‌ها، در تخلیه‌های حاوی آرگون در محدوده فشاری $10^{-10} - 10^{-9}$ 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 هستند [۱۳-۱۷]. چگالی الکترونی پلاسمای میکروموج، در حضور و بدون حضور میدان مغناطیسی در همین فشار نیز بدست آورده شد. به عنوان نتیجه مهم، با اعمال میدان مغناطیسی، چگالی الکترونی از حدود $10^{12} \times 0.2$ cm⁻³ به $10^{12} \times 2.1$ cm⁻³ افزایش پیدا کرده است که قابل توجه می‌باشد. این نتیجه در توفیق با نتایج شبیه سازی انجام شده با نرم افزار کامسول و نتایج قبلی در مورد تاثیر پیکربندی مغناطیسی بر روی افزایش چگالی بوده [۵ و ۶] و صحت آزمایش را تایید می‌کند.

۵. نتیجه گیری

در این مقاله، به بررسی، منبع پلاسمایی تشدید سیکلوترونی الکترون با فرکانس $2/45$ GHz پرداخته شده است. برای ساخت این سیستم پلاسمایی از دو آهنربای دائمی بلوکی استفاده شده است. جهت مشخصه‌یابی پلاسمای تشکیل شده از بیناب نمایی نشر نوری در حضور و بدون حضور میدان مغناطیسی استفاده شده است. دما و چگالی بدست آمده با استفاده از مدل‌های فیزیکی مربوطه، نشان می‌دهد که میدان مغناطیسی اثر قابل توجهی روی مشخصات پلازما داشته است به طوری که با حضور میدان مغناطیسی، دمای الکترون‌ها از 0.6 eV به 1.4 eV و چگالی الکترونی را از حدود $10^{12} \times 0.2$ cm⁻³ به $10^{12} \times 2.2$ cm⁻³ افزایش می‌دهد. علاوه بر آن، این نتایج در توفیق کامل با نتایج بدست آمده از نرم افزار کامسول است.

² Local Thermodynamic Equilibrium

مراجع:

- [1] Lieberman, Michael A., and Alan J. Lichtenberg. Principles of plasma discharges and materials processing. John Wiley & Sons, 2005.
- [2] Moisan, Michel, and Jacques Pelletier, eds. Microwave excited plasmas. Elsevier, 1992.
- [3] Yang, Juan, Yingqiao Xu, Zhiqiang Meng, and Tielian Yang. "Effect of applied magnetic field on a microwave plasma thruster." *Physics of Plasmas* 15, no. 2 (2008): 023503.
- [4] Stenzel, R. L., J. M. Urrutia, C. Ionita, and R. Schrittwieser. "Magnetic dipole discharges. II. Cathode and anode spot discharges and probe diagnostics." *Physics of Plasmas* 20, no. 8 (2013): 083504.
- [5] Mantei, T. D., and 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, no. 1 (1991): 26-28.
- [6] Chen, Longwei, Ying Zhao, Kenan Wu, Qi Wang, Yuedong Meng, and Zhaoxing Ren. "On the generation of magnetic field enhanced microwave plasma line." *Physics of Plasmas* 23, no. 12 (2016): 123509.
- [7] Yang, Juan, Yingqiao Xu, Zhiqiang Meng, and Tielian Yang. "Effect of applied magnetic field on a microwave plasma thruster." *Physics of Plasmas* 15, no. 2 (2008): 023503.
- [8] Neumann, G., and 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, no. 2 (1991): 334-338.
- [9] Bibinov, N., Halfmann, H. and Awakowicz, P.. *PSST*, 17 (3) 035004. 15, (2008).
- [10] R. McWhirter, *Plasma Diagnostic Techniques*. Academic Press, 7256. 046.
- [11] Qayyum, A., Zeb, S., Naveed, M.A., Ghauri S. A. and Zakaullah M.. *Plasma Devices and Operations*, 15 (2) 87-93, (2007)
- [12] 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, no. 1 (1979): 273-281.
- [13] Vl'cek J 1989 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
- [14] Boffard J B, Lin C C and DeJoseph C A 2004 Application of excitation cross sections to optical plasma diagnostics *J. Phys. D: Appl. Phys.* 37 R143-61
- [15] Zhu, Xi-Ming, 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, no. 40 (2010): 403001.
- [16] Zhu, Xi-Ming, Wen-Cong Chen, Shu Zhang, Zhi-Gang Guo, Da-Wei Hu, and Yi-Kang Pu. "Electron density and ion energy dependence on driving frequency in capacitively coupled argon plasmas." *Journal of Physics D: Applied Physics* 40, no. 22 (2007): 7019.
- [17] Nikolić, M., J. Newton, C. I. Sukenik, L. Vušković, and S. Popović. "Measurements of population densities of metastable and resonant levels of argon using laser induced fluorescence." *Journal of Applied Physics* 117, no. 2 (2015): 023304.