

تولید و بررسی گوی پلاسمایی و تبدیل آن به جت پلاسمای فشار اتمسفری موج میکرو

فرشاد صحبت زاده، زهرا امیدی و نوشین کاشی

گروه فیزیک اتمی و مولکولی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه مازندران، بابلسر

(دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۸/۰۷؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۵/۰۸/۰۲)

چکیده

در این مقاله به تولید و بررسی گوی پلاسمای موج میکرو و تبدیل آن به جت پلاسمای موج میکرو با عبور یک گاز از نازل در فشار اتمسفری می پردازیم. اثر نوع گاز در ویژگی های حرارتی گوی پلاسمای و جت ناشی از آن بررسی می شود. برای تولید گوی پلاسمای از روش جذب تشدید امواج الکترومغناطیس توسط آنتن فلزی در داخل محفظه و به تبع آن یونش گاز اطراف آنتن استفاده کردیم. در این تحقیق از یک مگنترون تجاری در بسامد ۲/۴۵ گیگاهرتز برای تولید گوی پلاسمای از طریق هدایت موج الکترومغناطیسی به داخل یک محفظه استفاده شد. از گازهای آرگون، نیتروژن، هوا و ترکیب آرگون/ نیتروژن برای تولید جت پلاسمای استفاده شد. برای تحلیل و شناسایی گونه های پلاسمایی موجود در جت پلاسمای، بیناب نمایی گسیل نوری (OES) انجام گرفت. در بیناب سنجی گسیل نوری وجود گونه های اتمی، یونی، مولکولی خنثی و برانگیخته از عناصر تشکیل دهنده آنتن و گاز مورد استفاده مانند آرگون، نیتروژن و اکسیژن تشخیص داده شد. جنس آنتن بر روی طول جت تأثیر چشمگیری داشت، به طوری که در آنتن آلیاژ (نیکل - آهن) بیشترین طول جت را مشاهده کردیم. نتایج آزمایش ها نشان داد که تغییر قابل ملاحظه ای در طول جت پلاسمای در شار گازی متفاوت و همچنین در توان های اعمالی مختلف وجود ندارد و بیشتر به جنس آنتن و نوع گاز بستگی دارد.

واژه های کلیدی: جت پلاسمای موج میکرو فشار اتمسفری، گوی پلاسمای موج میکرو، بیناب گسیل نوری

۱. مقدمه

مولکولی) استفاده می شود. یکی از انواع تخلیه های الکتریکی در فشار اتمسفر، جت پلاسمای فشار اتمسفری است. تولید جت پلاسمای با استفاده از امواج موج میکرو در فشار اتمسفر و در بسامد ۲/۴۵ گیگاهرتز باعث افزایش هر چه بیشتر چگالی پلاسمای می شود. این دستگاه چون می تواند بدون تجهیزات خلأ تولید شود از نظر هزینه و مصرف انرژی سودمند است و از نظر صنعتی کاربردهای فراوانی دارد. در سال ۱۹۹۴ مویسان و همکاران جت پلاسمای موج میکرو بر پایه امواج سطحی را

پلاسمای امروزه در بسیاری از صنایع و همچنین تحقیقات صنعتی و آزمایشگاهی به طور گسترده ای کاربرد دارند. یک گونه از این پلاسمای، پلاسمای موج میکرو است که به عنوان منبعی برای الکترون ها و یون های پرانرژی، گونه های فعال اتمی و مولکولی، رادیکال های آزاد و اتم های برانگیخته می باشد. توان منبع موج میکرو می تواند در محدوده چند وات تا چند صد کیلووات باشد و برای تولید آن از گازهای مختلف (بی اثر یا

کرد [۹]. در این کار نشان داده شد که این گوی‌های پلاسمایی به گوی‌های نورانی طبیعی که از طریق صاعقه در سطح زمین تولید می‌شوند، شبیه هستند. همچنین پایوا و همکاران در سال ۲۰۰۷ با ایجاد قوس الکتریکی در سطح سیلیکون با جریان متناوب در بسامد ۶۰ هرتز آزمایشی را انجام دادند که منجر به تبخیر سطحی سیلیکون خالص و تولید گوی نورانی پلاسمایی شد [۱۰].

ما در این مقاله ابتدا به تولید و بررسی گوی پلاسمای موج میکرو می‌پردازیم و سپس آن را با شارش گازهای مختلف به جت پلاسمای موج میکرو در فشار اتمسفری تبدیل می‌کنیم. در این آزمایش، موج میکرو توسط مگنترون تجاری با قابلیت تغییر توان، تولید و از طریق موجبر به محفظه پلاسمای منتقل می‌شود. برای تولید پلاسمای از آنتن‌های فلزی با قطری کمتر از ۲ میلی‌متر استفاده شد. انرژی موج الکترومغناطیسی توسط الکترون‌های آزاد آنتن جذب شده و باعث گرمایش نوک آنتن می‌شود. از طرفی در نوک آنتن به دلیل تیز بودن، میدان الکتریکی بسیار قوی ایجاد شده که باعث کنده شدن الکترون از سطح نوک آن می‌شود. همچنین وجود میدان الکتریکی قوی باعث یونش مولکول‌های گاز اطراف آنتن می‌شود که منجر به تولید پلاسمای می‌شود. پلاسمای تولید شده را از نظر ویژگی بینایی، طول جت، وابستگی به جنس آنتن‌ها و دمای الکترونی آن بررسی می‌کنیم. این پلاسمای در تولید نانو ذرات و ساخت سوزن‌های تیز میکرومتری قابلیت کاربرد دارد.

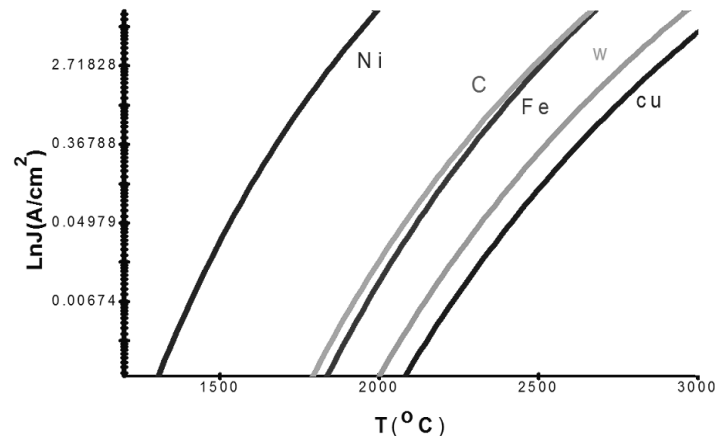
۲. بررسی کیفی تولید پلاسمای با آنتن در داخل کاواک

در این مقاله به منظور تولید پلاسمای موج میکرو از فرایند جذب تشدید یک آنتن فلزی استفاده شد. در واقع آنتن مورد نظر در اثر قرار گرفتن در معرض انرژی الکترومغناطیسی و پدیده جذب، گرم می‌شود و با غلبه انرژی گرمایی بر تابع کار فلز، پدیده گسیل الکترونی رخ می‌دهد. گسیل الکترونی از سطح

بررسی کردند [۱]. در بسیاری از ساختارهای جت پلاسمای موج میکرو در فشار اتمسفر، به کاربردهای صنعتی نظیر برش فلزات، زباله سوزهای صنعتی، پردازش مواد سرامیکی، نفت و پتروشیمی توجه عمده‌ای صورت گرفته شده است [۲]. خانی و همکاران در سال ۲۰۱۴ با استفاده از شعله پلاسمای موج میکرو کراکینگ نفت خام را انجام دادند [۳] و در سال ۲۰۱۲ یغمایی و همکاران [۴] تولید گازهای سنتز^۱ را از پلاسمای متان/اکسیژن/آرگون بررسی کردند. رزاک و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۰ اثر نوع گاز مصرفی و آهنگ شارش آن را بر روی جت پلاسمای اتمسفری موج میکرو بررسی کردند. ایو و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۱ اثر شارش گاز آرگون را بر ویژگی‌های جت پلاسمای موج میکرو آرگون بررسی کردند.

مشاهده گوی نورانی به دنبال صاعقه در هوا و یا محل برخورد آن با سطح زمین سابقه‌ای طولانی دارد. امروزه ثابت شده است که منشأ گوی نورانی یک محیط پلاسمایی است که از طریق یونش مولکول‌های هوا و یا یونش و اکسیداسیون بخار سیلیس در سطح زمین روی می‌دهد. این فرایند بسیار به فرایند تخلیه الکتریکی شباهت دارد طوری که بیناب تابشی آن ناشی از گذارهای اتمی، مولکولی، تابش ترمزی، و باز ترکیب الکترون و یون می‌باشد. در آزمایشگاه می‌توان گوی پلاسمای را توسط موج میکرو، تخلیه الکتریکی خازن ولتاژ بالا در آب و همچنین با استفاده از قوس الکتریکی الکتروود سیلیکونی توسط جریان الکتریسیته و تبخیر آن تولید کرد. اتسوکی و افروتون در سال ۱۹۹۱ با استفاده از تداخل موج میکرو در داخل کاواک استوانه‌ای حاوی هوا، گوی پلاسمای را در توان ۵ کیلووات و در بسامد ۲/۴۵ گیگاهرتز تولید کردند [۷]. در سال ۲۰۰۶ ساکاو و همکاران با استفاده از تخلیه الکتریکی یک خازن ولتاژ بالا به داخل آب، گوی نورانی پلاسمایی در سطح آن ایجاد کردند [۸]. دیختیار در سال ۲۰۰۶ توسط موج میکرو و یک الکتروود از جنس سیلیکون، ژرمانیوم، شیشه، سرامیک و بازالت در بسامد ۲/۴۵ گیگاهرتز و توان ۶۰۰ وات، گوی پلاسمای را در داخل یک موجبر مستطیلی تولید

۱. Synthetic gas



شکل ۱. چگالی جریان اشباع بر حسب دما برای تعدادی از آنتن‌ها.

اتمی مربوط می‌شود.

بنابراین در این حالت یک جریان اشباعی به وجود می‌آید که وابستگی دمایی جریان اشباعی به دما، از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۱]:

$$j_T = AT^2 \exp\left(-\frac{e\phi}{kT}\right) \quad (1)$$

در رابطه بالا j_T چگالی جریان اشباع، T دمای فلز، A ثابت گسیل، ϕ تابع کار و k ثابت بولتزمن می‌باشد.

در شکل ۱ چگالی جریان اشباع بر حسب دما برای تعدادی از فلزات که به عنوان آنتن در این تحقیق استفاده کردیم، رسم شده است. دیده می‌شود که میزان گسیل گرما-یونی الکترون از فلزهای نیکل و آهن بسیار قابل توجه می‌باشد و از مس و تنگستن بیشتر می‌باشد.

۴. مواد و روش‌ها

در اینجا ابتدا چیدمان‌هایی را که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته‌اند، ذکر می‌کنیم. ابتدا چیدمان تولید گوی پلاسمای را در نظر می‌گیریم و سپس چیدمان جت پلاسمای موج میکرو را مطالعه می‌کنیم.

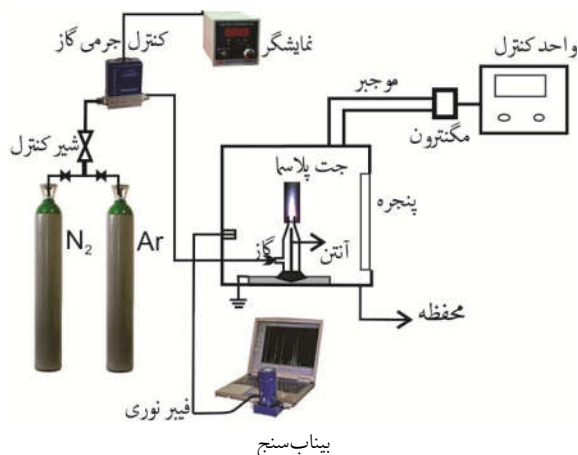
۴.۱. چیدمان گوی پلاسمای

نمای کلی مربوط به هندسه پلاسمای موج میکرو در شکل ۲

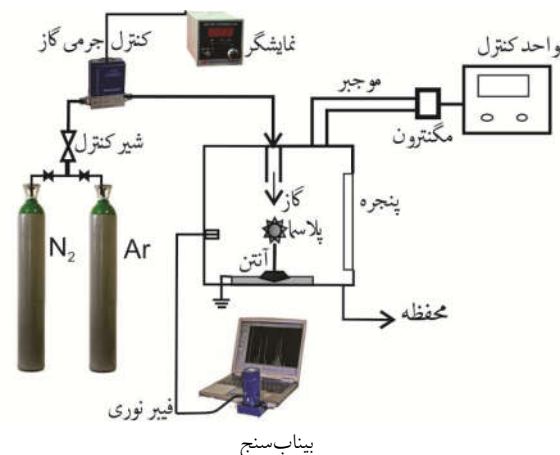
فلز تحت ۴ فرایند اصلی گسیل گرمایونی، گسیل میدانی، گسیل گرمایونی-میدانی و گسیل ثانویه انجام می‌گیرد. از طرف دیگر در این فرایند، گاز اطراف آنتن یونیده می‌شود، الکترون‌های اطراف آنتن به وسیله میدان الکتریکی شتاب پیدا می‌کنند، سرعت الکترون آزاد، به شدت میدان الکتریکی بستگی دارد. میدان الکتریکی در اطراف آنتن نوک تیز بیشینه است، بنابراین الکترون می‌تواند در این میدان، سرعت کافی به دست آورد و شکست الکتریکی گاز اطراف آنتن روی دهد. این فرایند همراه با گسیل نور می‌باشد و دوام آن نیز از مرتبه ثانیه است. شکل هندسی تخلیه الکتریکی و رنگ آن در این آزمایش به جنس گاز اطراف آنتن و خود آنتن بستگی دارد.

۳. بررسی گسیل گرما یونی و گسیل میدان

انتشار الکترون از فلزات ملتهب، گسیل گرما یونی نام دارد. یعنی وقتی فلزات گرم شوند، الکترون‌های جسم انرژی گرفته و با غلبه بر سد پتانسیل، از سطح فلز خارج می‌شوند. معادله اساسی برای میزان نشر الکترون حرارتی، از یک جامد گرم توسط معادله ریچارد-دشمن بیان می‌شود که این انتشار الکترونی به تابع کار فلزات بستگی شدید دارد. دومین عامل که میزان انتشار الکترون را کنترل می‌کند، دمای جسم منتشر کننده است. بستگی دمایی در مورد فلزات بیشتر و به خواص فیزیکی مثل اثر انبساط حجمی و اثرات الکترواستاتیک داخلی ارتعاشات



شکل ۳. چیدمان آزمایش جت پلاسمای موج میکرو در فشار اتمسفری.



شکل ۲. چیدمان آزمایش گوی پلاسمای موج میکرو در فشار اتمسفری.

مس) برقرار است. مجموعه آنتن و نازل شیشه‌ای در یک محفظه بسته‌ای از جنس استیل قرار گرفته و امواج میکرو توسط یک مگنترون با مدل ۲۴۶ M از طریق یک موجبر مستطیلی با ابعاد $mm^2 (۸۶/۴ \times ۲۳/۲)$ وارد محفظه، با پوشش داخلی استیل می‌شود. و با جذب تشدید می‌شود توسط آنتن تک قطبی، پلاسما تولید می‌شود. توان خروجی مگنترون از ۲۰۰ تا ۹۰۰ وات قابل کنترل است. در این آزمایش از آنتن‌های تک قطبی مختلفی نظیر تنگستن، گرافیت، مس، آلیاژ (نیکل - کروم و نیکل - آهن) با طول ۳۲ میلی‌متر استفاده شده است. در این مرحله پلاسمای موج میکرو در مجاورت هوا و گاز آرگون با شارش ۳ لیتر بر دقیقه تولید شد. برای بررسی گستردگی پلاسما از عکس برداری دیجیتال با ۳۰ فریم در ثانیه و ویژگی طیفی آن، از بیناب نمای گسیل نوری در گستره فرابنفش تا فرو قرمز استفاده کردیم.

در این آزمایش از آنتن‌های مختلفی نظیر تنگستن، گرافیت، مس، آلیاژ (نیکل - کروم و نیکل - آهن) استفاده شده است. جدول ۱ پلاسمای موج میکرو در مجاورت هوا و گاز آرگون با شارش ۳ لیتر در دقیقه را نشان می‌دهد.

تولید جت با ۲ نوع گاز مختلف انجام شد. در آزمایش اول تزریق گاز آرگون با شارش ۵ لیتر بر دقیقه و در آزمایش دوم ترکیب گاز آرگون/ نیتروژن با آهنگ شارش آرگون و نیتروژن به ترتیب ۵ و ۳ لیتر بر دقیقه می‌باشد. جدول ۲ جت پلاسمای تشکیل شده توسط گاز آرگون و آرگون/ نیتروژن را نشان می‌دهد. اثر تولید پلاسما بر روی شکل ظاهری نوک آنتن‌ها در گوی پلاسما با هوا و آرگون با یکدیگر متفاوت بود. در تولید گوی پلاسما در معرض هوا، به دلیل دمای بالای پلاسما، ذوب شدگی بر روی نوک آنتن‌های فلزی به جز تنگستن قابل

نشان داده شده است، و امواج موج میکرو توسط یک مگنترون با مدل ۲۴۶ M از طریق یک موجبر مستطیلی با ابعاد $mm^2 (۸۶/۴ \times ۲۳/۲)$ وارد محفظه، با پوشش داخلی استیل می‌شود. و با جذب تشدید می‌شود توسط آنتن تک قطبی، پلاسما تولید می‌شود. توان خروجی مگنترون از ۲۰۰ تا ۹۰۰ وات قابل کنترل است. در این آزمایش از آنتن‌های تک قطبی مختلفی نظیر تنگستن، گرافیت، مس، آلیاژ (نیکل - کروم و نیکل - آهن) با طول ۳۲ میلی‌متر استفاده شده است. در این مرحله پلاسمای موج میکرو در مجاورت هوا و گاز آرگون با شارش ۳ لیتر بر دقیقه تولید شد. برای بررسی گستردگی پلاسما از عکس برداری دیجیتال با ۳۰ فریم در ثانیه و ویژگی طیفی آن، از بیناب نمای گسیل نوری در گستره فرابنفش تا فرو قرمز استفاده کردیم.

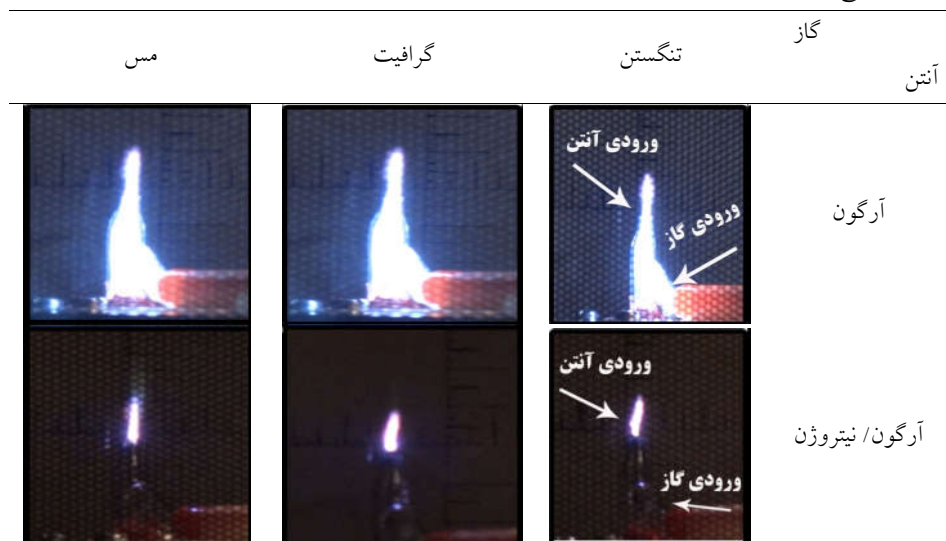
۲.۴. چیدمان جت پلاسما

برای تولید جت پلاسمای موج میکرو در فشار اتمسفری از ساختاری استفاده کردیم که در شکل ۳ نمایش داده شده است. این ساختار شامل یک آنتن تک قطبی $\frac{1}{4}$ به طول ۳۲ میلی‌متر، در ضخامت‌های مختلف می‌باشد. در این ساختار از نازل یا لوله‌ای از جنس شیشه پیرکس استفاده شده است، این نازل باعث هدایت گاز و در نتیجه پلاسما می‌شود و اتصال به زمین آن توسط یک صفحه فلزی با ضریب رسانایی بالا (آلومینیم یا

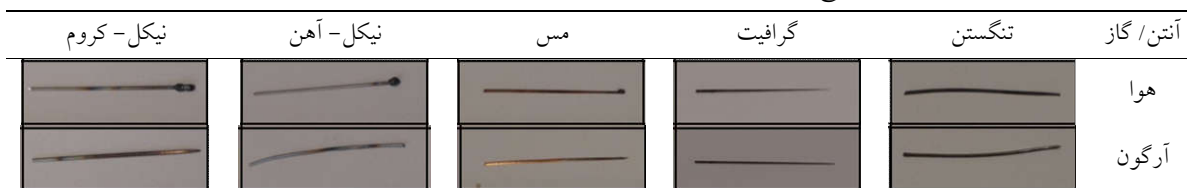
جدول ۱. گوی پلاسمای موج میکرو تولید شده در مجاورت هوا و گاز آرگون.



جدول ۲. جت پلاسمای موج میکرو تولید شده در مجاورت گاز آرگون و آرگون/ نیتروژن.

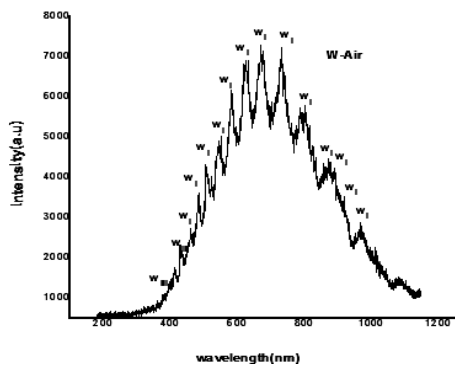


جدول ۳. تصویر آنتن‌های گوی پلاسمای موج میکرو در مجاورت هوا و گاز آرگون بعد از تولید پلاسما.

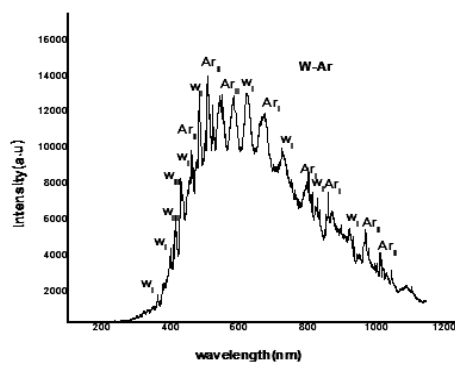


نوک آنها مشاهده نشد. در جدول ۳ تصویر آنتن‌ها از جنس تنگستن، گرافیت، مس، نیکل - آهن و نیکل - کروم بعد از استفاده در تولید گوی پلاسمایی با هوا و آرگون نشان داده شده است.

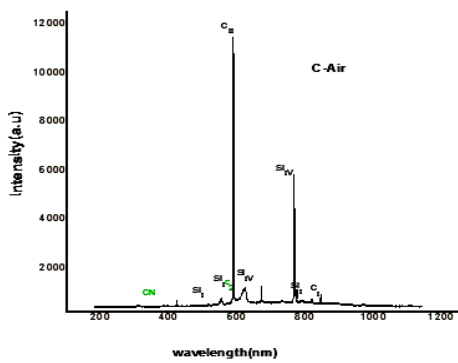
مشاهده بود، در حالی که برای گرافیت این عمل باعث تیز شدگی و پراکنش نوک آن شد. در حالت استفاده از گاز آرگون، در تولید گوی پلاسما تغییر رنگ در نوک آنتن‌ها مشاهده شد و ذوب شدگی در



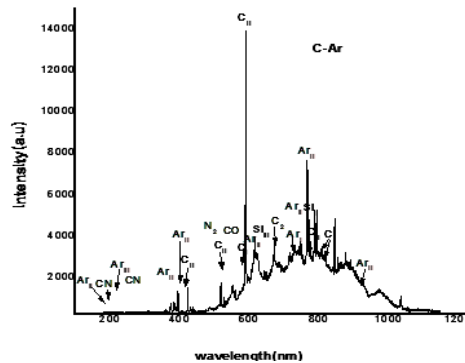
(B)



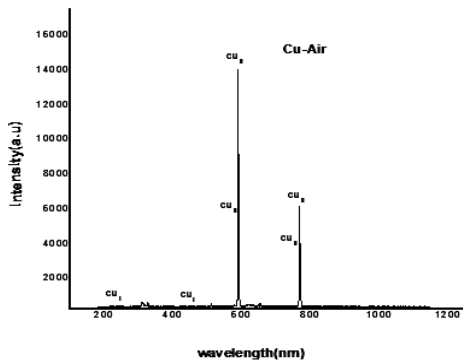
(A)



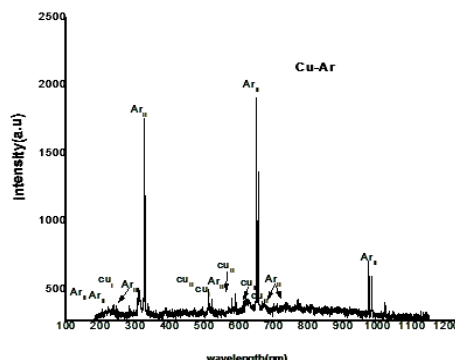
(D)



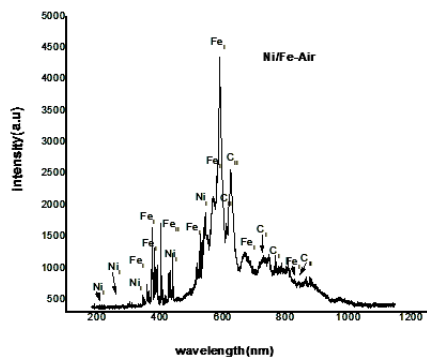
(C)



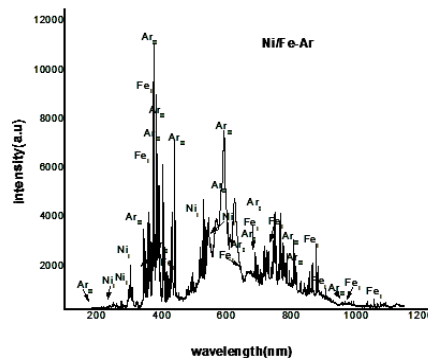
(F)



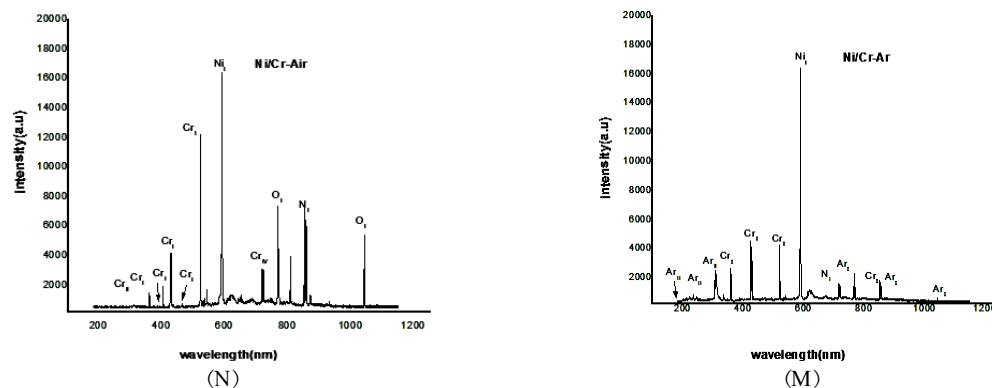
(E)



(H)



(G)



شکل ۴. بیناب گوی پلاسمای تولید شده برای آنتن‌های مختلف در مجاورت هوا و گاز آرگون.

نشده، بلکه فقط سطح آنتن‌ها تغییر رنگ داده است. در نتیجه می‌توان گفت پلاسمای تشکیل شده با آرگون به دلیل ولتاژ شکست پایین سردتر است [۱۱]. همان طور که در شکل‌های قبل دیده شد، نوع جت تولید شده با گازهای مختلف متفاوت می‌باشد. جت پلاسمای حاصل از گاز آرگون، حجم بیشتری دارد، به طوری که کل نازل شیشه‌ای را پر کرده و پرنورتر است، در حالی که جت حاصل از گاز ترکیبی آرگون/ نیتروژن ضعیف و پهن است و فقط در نوک نازل، جت پلاسمای تشکیل می‌شود. جنس آنتن در طول جت تولید شده تأثیر بسزایی دارد، به طوری که در یک توان و شار مشخص طول‌های متفاوتی از جت مشاهده می‌شود. اثر جنس آنتن‌های مختلف بر روی طول جت در شکل ۴ نشان داده شده است.

همان طور که در شکل ۵ دیده می‌شود، جت پلاسمای موج میکرو با آنتنی از جنس آلیاژ نیکل- آهن بیشترین طول جت را نسبت به آنتن‌های تنگستن، مس، گرافیت، نیکل- کروم و آلومینیم دارد. دلیل این امر را می‌توان در میزان گسیل الکترون به روش گرمایی در شکل ۱ جستجو کرد. در این شکل مشاهده شد که فلزات آهن و نیکل بیشترین گسیل گرما-یونی الکترون را در یک دما دارند.

۶. اندازه‌گیری پارامترهای پلاسمای

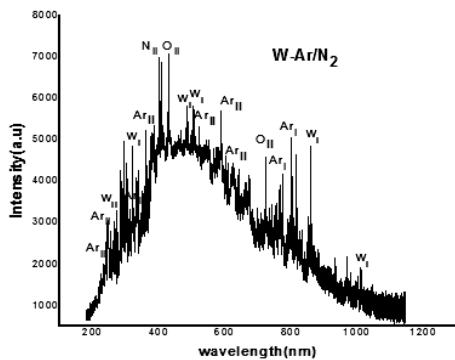
۶.۱. بیناب‌نمایی گسیل نوری

برای شناسایی گونه‌های مختلف در جت پلاسمای موج میکرو

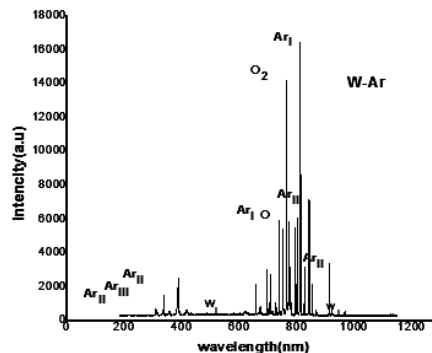
برای تحلیل نور گسیلی از جت و تعیین ترکیبات پلاسمای، اندازه‌گیری بیناب‌نمایی انجام گرفت. فیبر نوری در فاصله ۲۰ cm از شعله پلاسمای تعبیه شد و با استفاده از نور لیزر هلیوم- نئون هم خط سازی صورت گرفت. فیبر نوری مورد نظر از جنس کوارتز است که قابلیت انتقال نور از فرابنفش تا فرو قرمز را دارد. دستگاه بیناب‌سنج مدل S100 کارخانه (Solar Laser System) می‌باشد که به کامپیوتر برای نمایش طیف‌ها متصل می‌شود. قدرت تفکیک بیناب‌سنج ۱ نانومتر می‌باشد و طول موج‌های فرابنفش، مرئی و فرو قرمز در گستره ۱۱۰۰-۲۰۰ نانومتر را پوشش می‌دهد. بیناب پلاسمای با استفاده از فیبر نوری به بیناب‌سنج منتقل و با استفاده از نرم‌افزار مربوط به خود، بر روی نمایشگر کامپیوتر شدت طیفی را نمایش می‌دهد.

۵. اثر نوع گاز و آنتن

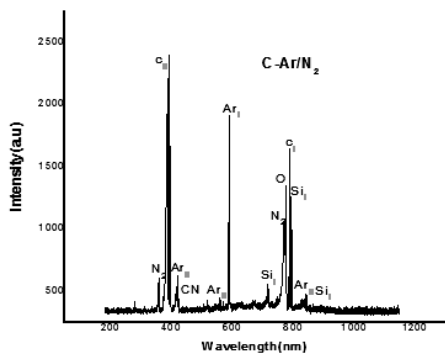
نتایج آزمایش‌های تولید پلاسمای موج میکرو نشان می‌دهد که، کاهش توان منبع روی حجم پلاسمای تولید شده تأثیر می‌گذارد، اما روی درخشندگی پلاسمای تأثیر چندانی نمی‌گذارد. هنگام تولید گوی پلاسمای در توان‌های بالاتر اثر کندوپاش بر روی آنتن‌ها قابل مشاهده بود، که بیانگر وجود میدان الکتریکی قوی در نوک آنتن و همچنین برخورد یون‌های پرنرژی پلاسمای با فلز آنتن بود. در مقایسه بین اثر گاز آرگون و هوا روی آنتن‌های مختلف تعدادی از آنتن‌ها نظیر آلیاژ (نیکل- کروم و نیکل- آهن) و مس در مجاورت هوا ذوب شدند، اما در مجاورت آرگون ذوب



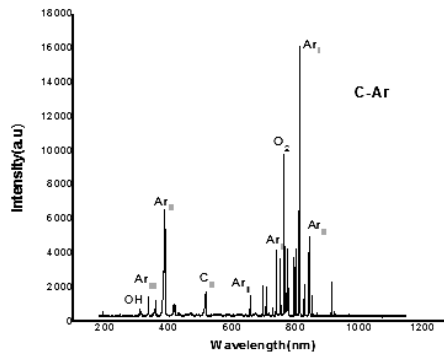
(B)



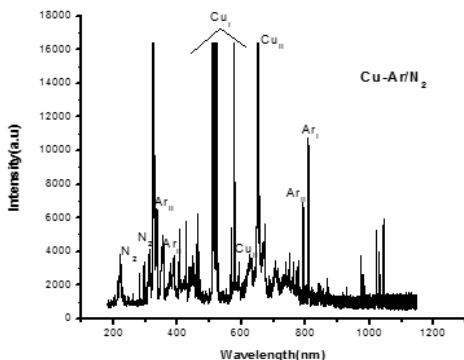
(A)



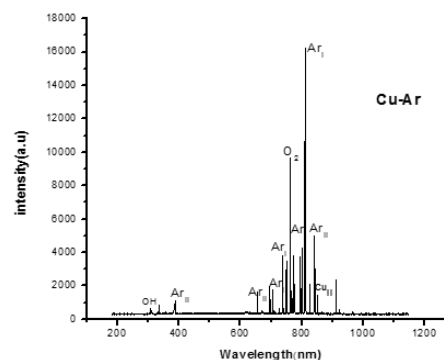
(D)



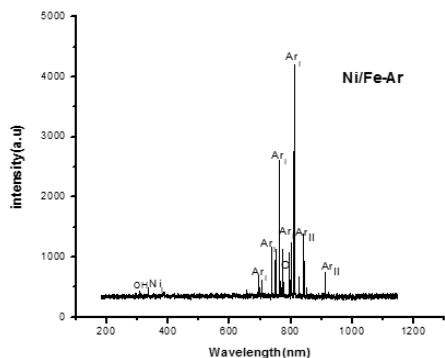
(C)



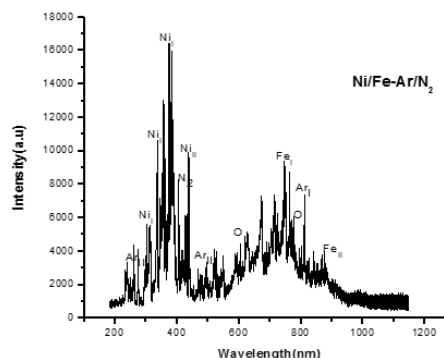
(F)



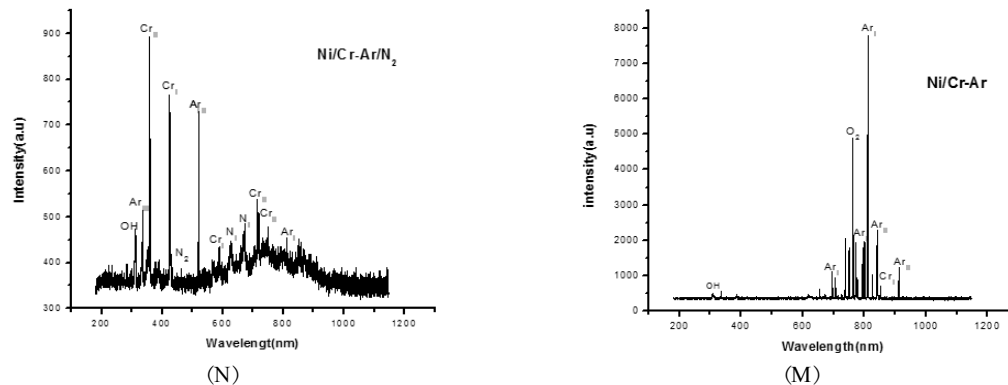
(E)



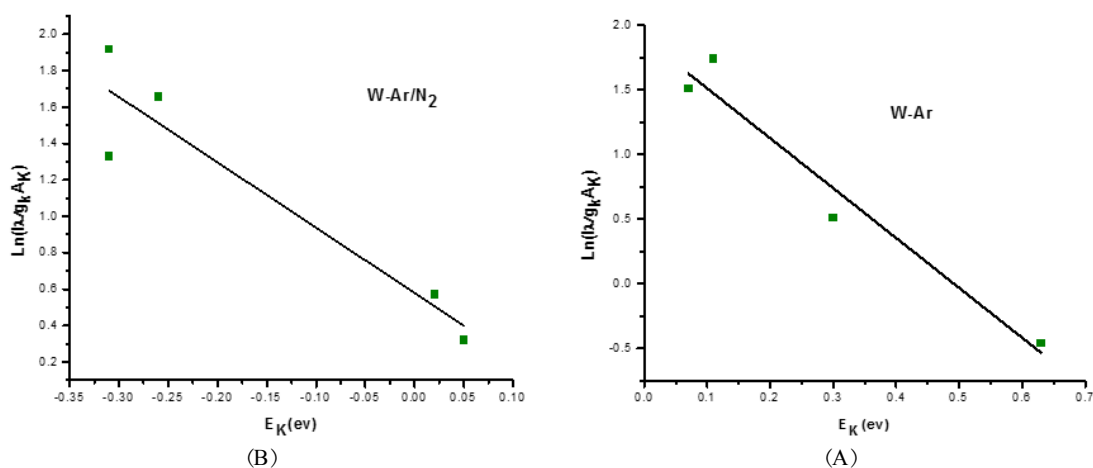
(H)



(G)



شکل ۵. بیناب جت پلاسمای تولید شده برای آنتن‌های مختلف در مجاورت گاز آرگون و آرگون/ نیتروژن.



شکل ۶. رسم بولتزمن آنتن تنگستن با استفاده از گاز آرگون و آرگون/ نیتروژن.

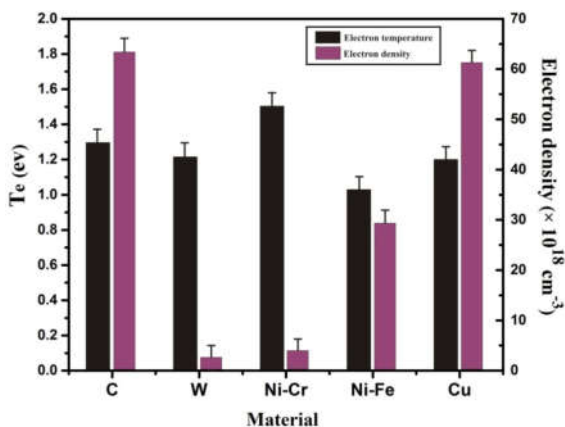
و آنتن تنگستن پراکنش کمتری داریم و بیشترین خطوط طیفی مربوط به گذارهای اتمی گاز آرگون می‌باشد، در حالی که در گاز ترکیبی آرگون/ نیتروژن یک طیف پیوسته ناشی از تابش ترمزی و باز ترکیب الکترون- یون دیده شده و پراکنش بیشتر از حالت قبل است. در این حالت منشاء اصلی پیوستگی طیف، گذار آزاد- مقید^۲ بین الکترون آزاد و یون می‌باشد.

۶.۲. اندازه‌گیری دما و چگالی

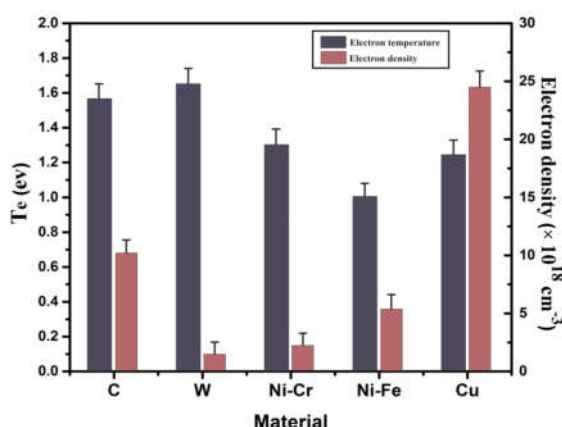
در تخمین دمای الکترونی و چگالی پلاسما با استفاده از روش بیناب نمایی گسیل نوری و بدون استفاده از پهن شدگی‌ها، لازم است که پلاسمای مورد نظر در تعادل ترمودینامیکی موضعی و یا شبه

از بیناب‌نمایی گسیل نوری (OES) استفاده کردیم. نتایج حاصل از بیناب‌نمایی پلاسمای موج میکرو هوا و جت پلاسمای گاز آرگون و آرگون/ نیتروژن مربوط به آنتن تنگستن به ترتیب در شکل‌های ۶، ۷، ۸ و ۹ نمایش داده شده است. آرگون اتمی در خطوط طیفی کمتر از ۴۰۰ nm و گستره (۷۰۰-۸۰۰) nm، اکسیژن اتمی در ۷۷۷، ۷۶۲ nm در طیف آرگون و خط طیفی ۳۸۰ nm مربوط به N_۲ در طیف آرگون/ نیتروژن در همه آنتن‌ها مشاهده می‌شود. از طرفی در اندازه‌گیری خطوط طیفی جت پلاسما حاصل از آنتن تنگستن، اتم و یون‌های اتمی یک بار یونیده W_{II}، W_I تشخیص داده شده که بیانگر پراکنش تنگستن از بدنه آنتن می‌باشد. توجه به جدول‌ها و شکل‌ها دیده می‌شود که در تولید جت پلاسمای موج میکرو با استفاده از گاز آرگون

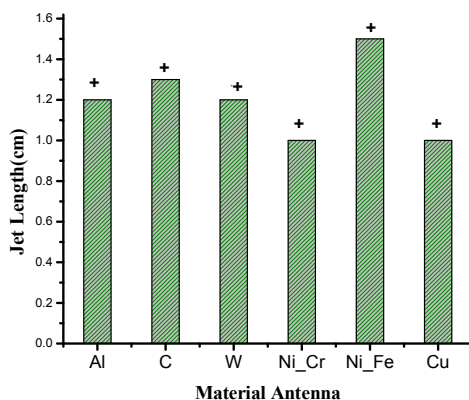
۱. Free-bond Transition



شکل ۸. دما و چگالی الکترونی به دست آمده برای آنتن‌های مختلف برای جت پلاسما.



شکل ۷. دما و چگالی الکترونی به دست آمده برای آنتن‌های مختلف برای گوی پلاسمایی.



شکل ۹. اثر جنس آنتن بر روی طول جت.

طوری که هر نقطه از آن با محیط پیرامون خود، در تعادل باشد به آن تعادل ترمودینامیک موضعی (LTE) گویند. در این حالت لازم نیست فوتون‌های گسیلی از سامانه و یا جذب شده توسط آن با اجزای سامانه در تعادل باشد. در سامانه‌ای که تعادل ترمودینامیک موضعی برای آن صادق است، معمولاً ذرات و اجزای سنگین با هم در تعادل هستند و با اجزا و ذرات سبک تر مانند الکترون‌ها در تعادل نیستند. هر کدام از اجزا به طور جداگانه دارای تعادل داخلی هستند. فوتون‌ها نیز با هیچ کدام از اجزا در تعادل قرار ندارند. تبادل انرژی بین این سامانه و محیط بیرون آن به طور آرام و تدریجی اتفاق می‌افتد طوری که گرا دیان دما بسیار کوچک است، و سازوکار غالب در تبادل

تعادل ترمودینامیکی موضعی باشد. برای تصدیق این موضوع لازم است ابتدا شرایط پلاسمای تولید شده در این تحقیق را از نظر تعادل ترمودینامیکی موضعی و یا شبه تعادل ترمودینامیکی موضعی تعیین کنیم و سپس به تخمین آنها بپردازیم.

۳.۶. تعادل ترمودینامیکی موضعی

وقتی یک سامانه در تعادل مکانیکی، شیمیایی و گرمایی باشد در تعادل ترمودینامیکی قرار دارد. در این سامانه، پارامترهایی مانند دما و فشار بدون تغییر در زمان باقی می‌مانند و آنها در کل این سامانه یکنواخت هستند. اگر در یک سامانه پارامترهایی مانند دما و فشار نسبت به مکان و زمان به آرامی تغییر کنند،

$$N_e \geq 7.4 \times 10^{18} \left(\frac{Z^{\gamma}}{n^{\gamma}} \right) \left(\frac{KT}{E_x} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \left(\frac{E_{\gamma}}{E_x} \right)^{\frac{1}{\gamma}}, \quad (3)$$

که در آن Z بار موثر الکترون‌های مقید، n عدد کوانتومی، K ثابت بولتزمن، T دمای الکترونی پلاسما، E_x انرژی یونش و E_{γ} انرژی تراز بالاتر می‌باشد. مقادیر چگالی الکترونی برای آنتن‌های پلاسمایی موج میکرو در شرایط PLTE و LTE با توجه به شرایط گریم در جدول ۴ نشان داده شده است.

همچنین برای اندازه‌گیری چگالی الکترونی از معادله ساها-بولتزمن استفاده کردیم. مقدار چگالی با استفاده از خطوط طیفی یونی و اتمی گسیل شده از پلاسما از طریق رابطه (۵) به دست می‌آید.

$$N_e = \frac{I_z^*}{I_{z+1}^*} 6.7 \times 10^{21} (T)^{\frac{\gamma}{2}} \times \exp \left[\frac{(E_{k,z} - E_{k,\chi_z} - \chi_z)}{K_B T} \right] \text{ cm}^{-3}, \quad (4)$$

که در این معادله $I_z^* = \frac{I_z \lambda_{ki,z}}{g_{k,z} A_{ki,z}}$ و χ_z انرژی یونش گونه‌ها در درجه یونش Z می‌باشد.

مقادیر چگالی به دست آمده با استفاده از معادله ساها-بولتزمن به ازای آنتن‌های مختلف طی دو مرحله در جدول ۵ مشخص شده است.

همان‌طور که در جدول‌های ۵ و ۴ نشان داده شده است، با مقایسه چگالی الکترونی به دست آمده در معادله ساها-بولتزمن نسبت به چگالی به دست آمده در شرایط گریم می‌توان به این نکته مهم دست یافت که پلاسمای تولیدی در بسامد موج میکرو در ساختار به کار رفته کاملاً در شرایط تعادل ترمودینامیکی موضعی (LTE) قرار داشته و در نتیجه تخمین چگالی الکترونی به دست آمده به روش معادله ساها مجاز و صحیح می‌باشد.

۵.۶. تعیین دمای برانگیختگی الکترونی پلاسما

برای تخمین دمای برانگیختگی الکترونی پلاسما توسط بیناب، از روش رسم بولتزمن استفاده کردیم. این روش بر پایه آنالیز بیناب‌های تابش نوری منتشر شده توسط یون‌ها، مولکول‌ها یا

انرژی بین ذرات، برخورد الکترونی است. این شرایط تعادلی در یک پلاسما، تعادل ترمودینامیکی موضعی نامیده می‌شود. در این صورت برای هر نقطه می‌توان یک دما در نظر گرفت که در توزیع ماکسول-بولتزمن و ساها صدق می‌کند. بنابراین برای برقراری شرط LTE لازم است که برخوردهای الکترونی با یون‌ها و اتم‌ها به صورت عمده در پلاسما اتفاق بیفتد [۱۲-۱۳] تا از این طریق امکان انتقال کامل انرژی جنبشی الکترون‌ها فراهم آید.

گریم و همکاران دریافتند [۱۳] که حداقل چگالی الکترونی مورد نیاز برای حاکم بودن شرایط LTE باید از معادله (۳) تبعیت کند. هرگاه چگالی الکترونی به دست آمده از معادله ساها قابل مقایسه و یا بزرگ‌تر از مقدار چگالی الکترونی به دست آمده در شرایط گریم باشد، آنگاه پلاسما در تعادل ترمودینامیکی موضعی قرار داشته و مجاز به استفاده از معادله ساها برای تخمین چگالی الکترونی می‌باشیم:

$$N_e \geq 9.2 \times 10^{17} z^{\gamma} \left(\frac{KT}{E_x} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \left(\frac{E_{\gamma}}{E_x} \right)^{\frac{1}{\gamma}}, \quad (2)$$

که در آن Z بار موثر الکترون‌های مقید، K ثابت بولتزمن، T دمای الکترونی پلاسما، E_x انرژی یونش و E_{γ} انرژی تراز بالاتر می‌باشد [۱۳-۱۶].

۴.۶. تعادل ترمودینامیکی موضعی جزئی

هنگامی که یک تعادل گرمایی جزئی در هر قسمت کوچک از گاز برقرار می‌شود، شرایط تعادل در چنین پلاسمایی تعادل ترمودینامیکی موضعی جزئی (LPLTE) نامیده می‌شود. معادله (۴) بیانگر شرط PLTE برای پلاسماهای تولیدی در بسامدهای مختلف می‌باشد. این معادله نشان می‌دهد حداقل چگالی مورد نیاز برای تعادل ترمودینامیکی موضعی جزئی و صدق کردن تابع توزیع ماکسول-بولتزمن چه میزان می‌باشد. همچنین گریم و همکاران نشان دادند که هرگاه چگالی الکترونی محاسبه شده از چگالی الکترونی به دست آمده در معادله (۴) بیشتر باشد، آنگاه شرط PLTE برقرار بوده و استفاده از معادله ساها-بولتزمن برای تخمین چگالی الکترونی پلاسما مجاز می‌باشد.

جدول ۴. چگالی الکترونی برای آنتن‌های پلاسمایی موج میکرو در شرایط LTE و PLTE در شرایط گریم.

آنتن	چگالی الکترون گوی (cm ⁻³)				چگالی الکترون جت (cm ⁻³)			
	هو		آرگون		آرگون		آرگون و نیتروژن	
	LTE	PLTE	LTE	PLTE	LTE	PLTE	LTE	PLTE
تنگستن	۷/۴۶×۱۰ ^{۱۴}	۱/۶۹×۱۰ ^{۱۱}	۴/۹۹×۱۰ ^{۱۴}	۲/۲۵×۱۰ ^{۱۱}	۶/۶۲×۱۰ ^{۱۴}	۲/۰۸×۱۰ ^{۱۱}	۶/۲۴×۱۰ ^{۱۴}	۲/۵۴×۱۰ ^{۱۱}
گرافیت	۲/۵×۱۰ ^{۱۵}	۱/۷۴×۱۰ ^{۱۱}	۲/۲۴×۱۰ ^{۱۵}	۱/۹۵×۱۰ ^{۱۱}	۲/۵۲×۱۰ ^{۱۵}	۱/۶۱×۱۰ ^{۱۱}	۲/۲×۱۰ ^{۱۵}	۲/۰۱×۱۰ ^{۱۱}
مس	۱/۷۸×۱۰ ^{۱۵}	۱/۸۷×۱۰ ^{۱۱}	۱/۵۵×۱۰ ^{۱۵}	۲/۲۱×۱۰ ^{۱۱}	۱/۸۷×۱۰ ^{۱۵}	۲/۳۲×۱۰ ^{۱۱}	۱/۹۳×۱۰ ^{۱۵}	۲/۱۴×۱۰ ^{۱۱}
نیکل - آهن	۱/۶۷×۱۰ ^{۱۵}	۱/۳۴×۱۰ ^{۱۱}	۱/۱۹×۱۰ ^{۱۵}	۱/۹۵×۱۰ ^{۱۱}	۱/۷۳×۱۰ ^{۱۵}	۱/۹۸×۱۰ ^{۱۱}	۱/۷۶×۱۰ ^{۱۵}	۱/۸۸×۱۰ ^{۱۱}
نیکل - کرم	۴/۳۲×۱۰ ^{۱۴}	۱/۷۷×۱۰ ^{۱۱}	۳/۴×۱۰ ^{۱۴}	۱/۹۵×۱۰ ^{۱۱}	۳/۷۳×۱۰ ^{۱۴}	۲/۲×۱۰ ^{۱۱}	۴/۲۲×۱۰ ^{۱۴}	۲/۲۵×۱۰ ^{۱۱}

جدول ۵. چگالی الکترونی برای آنتن‌های پلاسمای موج میکرو طی دو مرحله با استفاده از معادله ساها- بولتزمن.

آنتن	چگالی الکترون (cm ⁻³)			
	هو	آرگون	آرگون	آرگون و نیتروژن
تنگستن	۱/۰۳×۱۰ ^{۱۹}	۱/۷×۱۰ ^{۱۴}	۱/۷×۱۰ ^{۱۴}	۶/۶×۱۰ ^{۱۹}
گرافیت	۱/۰۳×۱۰ ^{۱۸}	۱/۳×۱۰ ^{۱۵}	۱/۰۵×۱۰ ^{۱۴}	۱/۵۵×۱۰ ^{۱۸}
مس	۱/۹×۱۰ ^{۱۸}	۴/۵×۱۰ ^{۱۵}	۱/۸×۱۰ ^{۱۶}	۳/۴×۱۰ ^{۱۸}
نیکل - آهن	۵/۱×۱۰ ^{۱۸}	۳/۹×۱۰ ^{۱۵}	۲/۶×۱۰ ^{۱۶}	۲/۸×۱۰ ^{۱۹}
نیکل - کرم	۲/۴۴×۱۰ ^{۱۹}	۱/۶۱×۱۰ ^{۱۴}	۱/۸×۱۰ ^{۱۶}	۶/۳۴×۱۰ ^{۱۹}

جدول ۶. دمای تحریک الکترونی برای آنتن‌ها.

آنتن	دمای گوی (eV)				دمای جت (eV)	
	هو	آرگون	آرگون	آرگون	نیتروژن/آرگون	نیتروژن/آرگون
تنگستن	۱/۵۸	۰/۸۳	۱/۴۹	۱/۳	۱/۳	
گرافیت	۱/۶۶	۱/۲۵	۱/۵۸	۱/۲۱	۱/۲۱	
مس	۱/۳	۰/۹۹	۴۳/۱	۱/۵۳	۱/۵۳	
نیکل - آهن	۱/۰۳	۰/۵۲	۱/۱	۱۴/۱	۱۴/۱	
نیکل - کرم	۱/۲۶	۰/۷۸	۰/۹۴	۱/۲	۱/۲	

احتمال گذار و تبهگنی می‌باشند. ما دمای تحریک الکترونی را به ازای گاز آرگون و گاز ترکیبی آرگون/ نیتروژن با استفاده از آنتن‌های مختلف اندازه گرفتیم. نتایج حاصل از آن در جدول ۶ فهرست شده است.

با محاسبه شیب خط نمودار در طول موج های ذکر شده در بالا، برای آنتن تنگستن در مجاورت گاز آرگون مقدار $k_{\beta}T$ برابر با ۱/۴۹eV و در نتیجه مقدار دما ۱۷۳۰۵ کلوین و برای

اتم‌های برانگیخته می‌باشد. بر طبق رسم بولتزمن، دمای تحریک پلاسمای می‌تواند به وسیله شیب نمودار بین $\log(I_{ki}\lambda_{ki}/g_k A_k)$ و E_k به دست می‌آید [۱۲-۱۷]:

$$\frac{I_1}{I_2} = \left(\frac{\lambda_{nm,z}}{\lambda_{ki,z}} \right) \left(\frac{A_{ki,z}}{A_{nm,z}} \right) \left(\frac{g_{k,z}}{g_{n,z}} \right) \exp \left(- \frac{E_{k,z} - E_{n,z}}{k_B T} \right) \quad (5)$$

به طوری که، I_1 شدت خطی در نتیجه گذار از تراز k به i و I_2 در نتیجه گذار از تراز n به m می‌باشد. A و g به ترتیب معرف

یون‌های آنتن مورد نظر قابل مشاهده است. به دلیل اینکه ولتاژ شکست الکتریکی گاز آرگون و تشکیل کرونا در میدان الکتریکی موضعی پایین تری روی می‌دهد، بیناب تابشی عمدتاً ناشی از خطوط طیفی گاز آرگون می‌باشد: در صورتی که گاز نیتروژن دارای ولتاژ شکست الکتریکی بالاتر و در نتیجه پلاسمای ناشی از آن دمای بیشتری دارد. در این آزمایش هم‌زمان می‌توان چند گوی آتشین تولید کرد. همچنین حجم پلاسمای تشکیل شده با آرگون نسبت به هوا کوچک‌تر است. جت حاصل از گاز آرگون بسیار روشن و پر شدت و تیز است، و تمام محیط نازل شیشه‌ای توسط پلاسمای پوشیده می‌شود. ولی جت حاصل از گاز نیتروژن و ترکیب آرگون/ نیتروژن ضعیف و پهن است و فقط در نوک نازل، جت پلاسمای تشکیل می‌شود. می‌توان به این نتیجه رسید که جت‌های حاصل از گازهای با ولتاژ شکست پایین، پرنورتر و تیزتر می‌باشند. بررسی انجام شده نشان می‌دهد که جنس آنتن بر روی پلاسمای تولید شده تأثیر بسزایی دارد، به طوری که پلاسمای موج میکرو حاصل از تنگستن بیشترین درخشندگی و جت تولید شده با آنتن آلیاژ (نیکل - آهن) دارای بیشترین طول بود. تفاوت طول جت پلاسمای موج میکرو با آنتن آلیاژ نیکل - آهن به دلیل گسیل زیاد الکترون از نوک آنتن در فرایند گرما-یونی می‌باشد. از این دستگاه می‌توان در تولید نانوذرات فلزات استفاده کرد. همچنین نتایج کار با آنتن گرافیت نشان داد علیرغم عدم چکش خوارگی گرافیت، می‌توان از این روش برای ساخت میله‌های گرافیتی بسیار تیز استفاده کرد. همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شد آنتن گرافیتی در محل تشکیل گوی پلاسمای بسیار تیز می‌شود. این فرایند به دلیل کند و پاش روی می‌دهد.

آنتن تنگستن در مجاورت گاز آرگون/ نیتروژن مقدار $k_B T$ برابر با $1/3 \text{ eV}$ و در نتیجه مقدار دما 15098 کلوین به دست آمد.

مقایسه دما و چگالی الکترونی به دست آمده برای آنتن‌های مختلف برای پلاسمای گوی در شکل‌های ۸ و ۷ نشان داده شده است.

مقایسه دما و چگالی الکترونی به دست آمده برای آنتن‌های مختلف برای جت پلاسمای در شکل زیر نشان داده شده است. چگالی الکترون‌های جت پلاسمای موج میکرو در این تحقیق از مرتبه 10^{19} cm^{-3} تخمین زده شد.

۷. نتیجه‌گیری

پلاسمای موج میکرو و جت پلاسمای موج میکرو در فشار اتمسفری، توسط جذب تشدید یک آنتن تک قطبی مورد بررسی و تولید قرار گرفت. بررسی انجام شده نشان می‌دهد، به دلیل میدان الکتریکی موضعی بسیار قوی، کرونا و شکست در اطراف نوک آنتن رخ می‌دهد. بیناب ثبت شده جت پلاسمای ناشی از گاز آرگون شامل طیف تابشی گسسته (اتمی و یونی) می‌باشد و در صورت حضور مقداری گاز نیتروژن به همراه گاز آرگون یک طیف پیوسته ناشی از گذار حالت آزاد الکترون به حالت مقید آن (گذار آزاد- مقید) و تابش ترمزی داریم. از آنجایی که الکترون‌های پلاسمای دارای توزیع انرژی هستند، لذا مازاد انرژی گذار آزاد- مقید به صورت فوتون‌هایی با طیف انرژی پیوسته ساطع می‌شود. با ایجاد جریان گاز نیتروژن در اطراف آنتن، دمای جت پلاسمای تشکیل شده افزایش پیدا می‌کند، در نتیجه شدت تابشی بیناب پیوسته ناشی نیز کاهش محسوسی دارد، اگرچه خطوط بینابی گسسته تابش اتم‌ها و

مراجع

- Sarani, *Plasma Processes and Polymers*, **6S1** (2009) S631.
- M A Razzak, S Takamura, S Saito and M R Talukder, *Plasma Phys* **50** (2010) 871.
- S Iio, K Yanagisawa, C Uchiyama, K Teshima, N Ezumi, and T Ikeda, *Surface and Coatings Technology*, **206** (2011) 1449.
- Y H Ohtsuki, H Ofuruton, *Nature* **350** (1991) 139.
- M Moisan, G Sauve, J Hubert and Z Zakrewski, *plasma source sci. Tech* **3** (1994) 584.
- A I Al-Shamma, S R Wylie, J Lucas and R A Stuart, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **121** (2002) 143.
- M R Khani, E Dejban Guy, M Gharibi, S S Shahabi, A Khosravi, A A Norouzi, and B Shokri, *Chemical Engineering Journal*, **237** (2014) 169.
- M Yaghmaee, B Shokri, N H Khiabani, and A

- Phys.*, **29** (1966) 35.
13. H Griem, *Phys. Rev.*, **131** (1963)1170.
14. L I U Liying and W Dezheng, *Experimental method*, **11** (2009).
15. S Z Li, D Z Wang, W C Zhu, and Y K Pu, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **45** (2006) 9213.
16. X M Zhu, Y K Pu, N Balcon, and R Boswell, *J. Phys. D. Appl. Phys.*, **42** (2009) 142003.
17. S Forster, C Mohr, and W Viol, *Surf. Coatings Technol.*, **200** (2005) 827.
8. Y Sakawa, K Sugiyama, T Tanabe and R More, *Plasma and Fusion Research: Rapid Communications.*, **1** (2006) 039.
9. V Dikhtyar and E Jerby, *Physical Review Letters*, **96** (2006) 045002.
10. G S Paiva, A C Pavao, E A de Vasconcelos, Jr O Mendes and Jr E F da Silva, *Physical review letters*, **98** (2007) 048501.
11. Y P Raizer, “*Gas Discharge Physics*”, Springer, Berlin, 1997.
12. J Cooper, “*Plasma spectroscopy*”, *Reports Prog.*