



طراحی، شبیه سازی و ساخت منبع پلاسمای میکروویو فوق چگال برای استخراج باریکه یون

حسین صادقی^۱، سمانه فاضل پور^{۲*}، رضا امراللهی^۱، امیر چخماچی^۲

۱. گروه مهندسی هسته ای، دانشکده فیزیک و انرژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، صندوق پستی، تهران- ایران
۲. پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، صندوق پستی، تهران - ایران

چکیده :

در این مقاله برای اولین بار به طراحی، شبیه سازی و ساخت یک چشمه ی پلاسمای نقطه ای میکروویو با هدف استخراج و ایجاد باریکه ی یون پرداخته شده است. چشمه پلاسمای ارائه شده نسبت به چشمه های موج میکروویو رایج که برای استخراج یون و ایجاد باریکه یونی استفاده می شوند بازدهی بالاتری دارد. چگالی پلاسما در منبع میکروویو پیشنهادی (برای استخراج یون) دقیقاً زیر حفره استخراج کننده ۶۰ برابر چگالی پلاسما در منبع پلاسمای رایج در توان موج یکسان ۱۰۰۰ وات بدست آمده است. که این چگالی بالا قابلیت استخراج یون را از این پلاسما به طور چشم گیری افزایش خواهد داد. در منابع میکروویو رایج چگالی پلاسما از مرتبه 10^{16} بر متر مکعب و دما ۴ تا ۵ الکترون ولت است، اما در منبع پلاسمای پیشنهادی چگالی پلاسما از مرتبه 10^{17} بر متر مکعب و دما ۱ الکترون ولت بدست آمده است. محاسبات نشان داد در توان موج یکسان چگالی جریان یون برای منبع پلاسمای پیشنهادی ۲ برابر منبع های پلاسمای میکروویو رایج می باشد.

کلیدواژه‌ها : منبع یون، سیستم پلاسمای میکروویو، سیستم استخراج کننده، جریان باریکه

Design, Simulation and Construction of Ultra-Dense Microwave Plasma Source for Ion Beam Extraction

Hossien Sadeghi¹, Samaneh Fazelpour^{2*}, Reza Amrollahi¹, Amir Chakhmachi²

1. Energy Engineering and Physics department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
2. Plasma Physics and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran

Abstract:

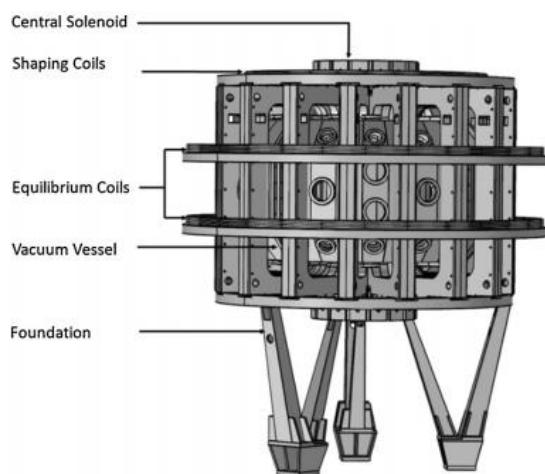
In this paper, for first time, design, simulation and construction of a microwave plasma source with the aim of extracting and creating ion beams are discussed. The proposed plasma source is more efficient than conventional microwave wave sources used for ion extraction and ion beam generation. Plasma density at the proposed microwave source (for ion absorption) is just below the extractor cavity 60 times the plasma density at the conventional plasma source at the same 1000 watt wave power. In common microwave sources, the plasma density is $10^{16} m^{-3}$ and the temperature is 4 to 5 eV, but in the source of the proposed program, the plasma density is $10^{17} m^{-3}$ and the temperature is 1eV. Calculations showed that at the same wavelength, the ion current density for the proposed plasma source was twice that of the common microwave plasma source.

Keywords: Ion Source, Microwave Plasma System, Beam Current

۱. مقدمه

در حال حاضر، تولید باریکه یون با چگالی جریان بالا جزء مهمترین اهداف در توسعه منابع یونی با استفاده از پلاسما بشمار می رود. نیاز به استخراج باریکه یون با جریان بالا منجر به ایجاد گریدهای چند حفره ای و بدنبال آن حجیم شدن سیستم خواهد شد. بنابراین بکارگیری یک سیستم تولید یون با اندازه کوچک و در عین حال دارای چگالی بالا و پایدار می تواند در کاربردهایی همچون تکنولوژی باریکه یون متمرکز (FIB) (که در ساختارهای نانو، لایه نشانی، تحقیقات مواد و غیره کاربرد دارد)، بررسی مواد بکاررفته برای دیواره اول راکتورهای گداخت، سیستم گرمایشی باریکه خنثی و سیستم های رانشگر یونی حائز اهمیت باشد [۴-۱۱]. بهترین راه حل برای بهینه کردن چگالی جریان باریکه، افزایش چگالی پلاسما و کاهش تلفات باریکه در هنگام عبور از سیستم استخراجگر می باشد. در این راستا محققین بسیاری به بررسی تاثیر افزایش چگالی پلاسما بر افزایش چگالی جریان باریکه یون پرداخته اند، با این حال اغلب تلاش ها به افزایش یکنواخت چگالی محفظه پلاسما منتهی می شود [۸-۵].

تحقیقات مختلف نشان داد چگالی پلاسما در نزدیکی حفره ی استخراج کننده یون از اهمیت بالاتری نسبت به چگالی متوسط در کل محفظه پلاسما برخوردار است [۸-۶]. بنابراین تولید پلاسمایی با چگالی بالا در نزدیک حفره استخراج کننده می تواند جریان باریکه یون را بطور موثری افزایش دهد. پارک و همکارانش جهت دستیابی به رویکردی برای افزایش جریان باریکه یون از یک سیستم پلاسمای گلیو آندی جهت ایجاد پلاسمای نقطه ای با چگالی بالا در نزدیکترین فاصله به الکتروود استخراج کننده استفاده کردند، آنها موفق شدند چگالی در محدوده ی حفره ی الکتروود پلاسما را به ۱۰۰ برابر پلاسمای dc در حالت معمول برسانند [۹]. در ادامه، پارک و همکارانش، در راستای افزایش جریان باریکه، یک منبع یون رادیوفرکانسی جدید ارائه دادند که در مقایسه با طرح قبلی، عملکرد بسیار پایدارتری با اعمال ولتاژ شتابدهنده کمتر به منظور جلوگیری از پراکندگی و آسیب حرارتی بر روی الکتروودها را در پی دارد [۱۰]. یکی از چالش های اساسی در راکتور های گداخت آینده و توکامک های حال حاضر در سطح جهان افزایش دمای پلاسما جهت رسیدن به دمای خود اشتعال پلاسما می باشد. در حال حاضر یکی از سیستم هایی که در توکامک ها و راکتورهای گداخت سرتاسر جهان مورد توجه قرار گرفته است، طراحی و ساخت منابع تولید یون به منظور دستیابی به سامانه های گرمایشی تزریق باریکه خنثی، ابزارهای تشخیصی و جدیداً در سال ۲۰۲۰ بعنوان بررسی مواد دیواره اول با روش برهمکنش یون با مواد دیواره توسط گروه تحقیقاتی ایتر می باشد [۱۴-۱۱]. در کشورمان ایران، تحقیقات در زمینه گداخت هسته ای با پنج توکامک با نام های توکامک دماوند و الوند واقع در سازمان انرژی اتمی، توکامک البرز و تابان واقع در دانشگاه صنعتی امیرکبیر و توکامک IRT1 واقع در دانشگاه علوم تحقیقات در حال انجام می باشد. در شکل (۱) نمای از توکامک های البرز و دماوند نشان داده شده است.





شکل ۱. نمایی از توکامک های البرز (الف) و دماوند (ب).

به منظور ارتقای این توکامک ها، روز به روز نیاز وافر به طراحی و ساخت یک منبع یون کارآمد جهت بررسی مواد دیواره اول، ابزار تشخیصی و همچنین سامانه گرمایشی در میان گزارشات علمی برای همگان آشکار می شود [۱۷-۱۵]. یک منبع تولید یون با جریان بالا تنها با بکارگیری یک سیستم تولید پلاسمای چگال و کارآمد امکان پذیر خواهد بود. بنابراین، با افزایش کاربردهای پلاσμα، طراحی و بهینه سازی یک منبع پلاσμα کارآمد همواره مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. در این مقاله، ابتدا به توضیح روش کار اعم از توضیحات مربوط به منبع پلاσμα، شبیه سازی و ساخت و تست های انجام شده پرداخته شده است. در مرحله بعد به تجزیه و تحلیل داده های بدست آمده پرداخته می شود و نهایتاً به ارائه نتایج مدنظر در این مقاله پرداخته خواهد شد.

۲. تئوری و شبیه سازی

یک منبع تولید یون با جریان بالا تنها با بکارگیری یک سیستم تولید پلاسمای چگال و کارآمد امکان پذیر خواهد بود. بنابراین، با توجه به اهمیت منبع پلاσμα در استخراج یون و ایجاد باریکه یونی، طراحی و بهینه سازی یک منبع پلاσμα کارآمد همواره مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. یکی از پارامترهای کلیدی در میزان استخراج یون از یک منبع پلاσμα، چگالی پلاσμα می باشد به عبارت دیگر با افزایش چگالی پلاσμα می توان میزان استخراج یون از آن را افزایش داد. تاکنون محققین بسیاری با افزایش چگالی پلاσμα (با افزایش توان مصرفی) به دنبال افزایش استخراج یون از پلاσμα بوده اند. به تازگی ثابت شده است چگالی پلاσμα دقیقاً زیر حفره ی استخراج کننده (که معمولاً ابعاد آن در حدود چند میلیمتر است) از اهمیت ویژه ای برخوردار است به عبارت دیگر اگر بتوان بجای افزایش چگالی به طور یکنواخت در کل محفظه پلاσμα و توزیع توان در کل محفظه توان و انرژی را در نقطه ای نزدیک و زیر حفره استخراج کننده متمرکز کرد می توان در این نقطه چگالی را به طور قابل ملاحظه ای افزایش داد که نتیجه ی آن افزایش قابل توجه جریان باریکه یون می باشد. در این راستا در این مقاله برای اولین بار از یک منبع پلاسمای نقطه ای میکروویو که قابلیت تمرکز توان موج در نقطه ای زیر حفره استخراج کننده را دارد استفاده شده است. در طراحی منبع پلاσμα از یک کاواک مد TM_{011} استفاده شده است، در این نوع کاواک پیک شدت میدان الکتریکی در دو نقطه بالا و پایین کاواک می باشد.

همچنین در این مقاله با در نظر گرفتن تمامی برهمکنش های پلاσμα و استفاده از ماژول های Electromagnetic Waves، Plasma و Laminar Flow و حل وابسته به زمان و هم زمان این فیزیک ها در نرم افزار کامسول چگالی نقطه ای پلاσμα را بدست



آورده ایم. در ادامه مختصری از معادلات حاکم بر شبیه سازی انجام شده آورده شده است. رفتار پلاسما در حضور امواج الکترومغناطیس به خصوص پلاسماهای مایکروویو با استفاده از معادلات ماکسول بیان می شود.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad \mathbf{E} = -\nabla V \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_p + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (2)$$

\mathbf{E} میدان الکتریکی، \mathbf{B} چگالی میدان مغناطیسی، \mathbf{H} میدان مغناطیسی، \mathbf{J}_p چگالی جریان پلاسما و \mathbf{D} جابجایی الکتریکی می باشد. چگالی جریان پلاسما را می توان از رابطه ۳ بدست آورد.

$$\mathbf{J}_p = -qn_e \mathbf{v}_e \quad \text{or} \quad \mathbf{J}_p = \sigma \mathbf{E} \quad (3)$$

q بار الکتریکی، n_e چگالی الکترون ها، \mathbf{v}_e سرعت متوسط الکترون ها و σ رسانندگی پلاسما می باشد. با استفاده از تابع توزیع ماکسول و معادلات بولتزمن می توان معادله حرکت الکترون را به شکل معادله ۴ نوشت:

$$\frac{\partial \mathbf{v}_e}{\partial t} = -\frac{q}{m_e} \mathbf{E} + \nu_m \mathbf{v}_e \quad (4)$$

m_e جرم الکترون و ν_m فرکانس برخورد الکترون می باشد. با استفاده از تبدیل فوریه معادله ۴ به شکل معادله ۵ بازنویسی خواهد شد.

$$j\omega \mathbf{v}_e + \nu_m \mathbf{v}_e = \frac{q}{m_e} \mathbf{E} \quad (5)$$

معادله ۵ را می توان به شکل معادله ۶ بازنویسی کرد:

$$-qn_e \mathbf{v}_e = \frac{n_e q^2}{m_e(j\omega + \nu_m)} \mathbf{E} \quad (6)$$

از معادلات ۳ و ۶ داریم:

$$\sigma = \frac{n_e q^2}{m_e(j\omega + \nu_m)} \quad (7)$$

با استفاده از معادلات ۱ و ۲ می توان معادله ی حاکم بر موج الکترومغناطیس در پلاسما را به صورت معادله ۸ بازنویسی کرد:

$$\nabla \times \mu^{-1} \nabla \times \mathbf{E} = (\omega^2 \epsilon_0 \epsilon_r - j\omega \sigma) \mathbf{E} \quad (8)$$

با حل معادله ۸ و استفاده از شرایط مرزی مناسب می توان میزان انتقال توان از موج به الکترون را با استفاده از معادله ۹ بیان کرد.

$$Q_{rh} = \frac{1}{2} \text{real}(J \cdot E) \quad (9)$$

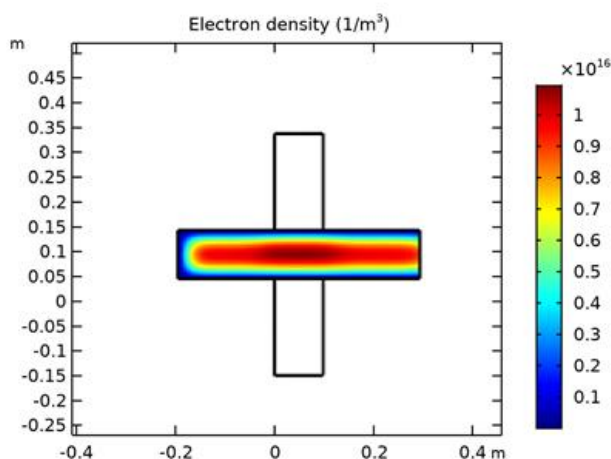
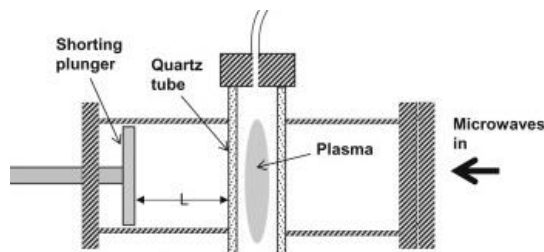
J مجموع چگالی جریان پلاسما و چگالی جریان جابجایی می باشد. در طراحی سیستم های استخراج کننده مسائل اپتیک باریکه تعیین کننده کمیت و کیفیت باریکه یون خواهد بود و این مسائل اعم از روشنایی، امیتانس، دیورژانس، بار فضایی و ... توسط طراحی هندسه و ابعاد الکترودها تعیین خواهند شد. چگالی جریان باریکه یون حفره استخراج کننده از معادله ۱۰ بدست می آید:

$$j_s \left[\frac{A}{m^2} \right] = n_i q \sqrt{\frac{T_e}{M_i}} \quad (10)$$

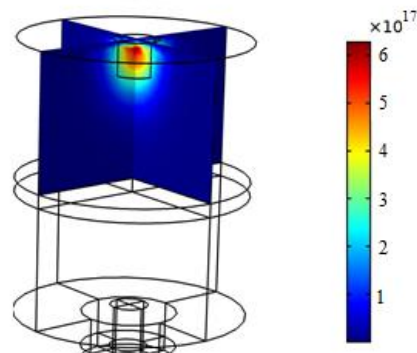
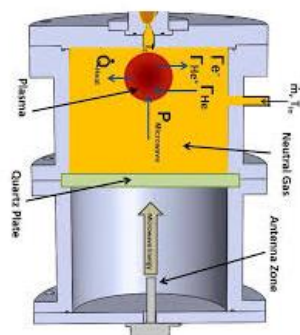
که در این رابطه n_i چگالی پلاسما، T_e دمای الکترون، M_i جرم یون و q بار یون می باشد، مسئله توانایی تولید باریکه یون توسط پلاسما موردنظر بررسی خواهد شد. همچنین میزان چگالی جریان باریکه یون را می توان توسط قانون چایلد لانگمویر محاسبه نمود:

$$j_c [A/m^2] = \frac{4\epsilon_0}{9} \sqrt{\frac{2q}{m}} \frac{V_{\text{extraction}}^{3/2}}{d^2} \quad (11)$$

در اینجا $V_{\text{extraction}}$ ، $\epsilon_0 \cdot d$ و m به ترتیب برابر با پتانسیل استخراج کننده، فاصله بین دو الکتروده استخراج کننده، ضریب نفوذپذیری خلاء و جرم یون می باشد. شکل (۲) و (۳) چگالی پلاسما در یک منبع پلاسما میکروویو معمولی و منبع پیشنهادی در این مقاله را نشان می دهد.



شکل ۳. منبع پلاسما رایج میکروویو



شکل ۲. شبیه سازی منبع پلاسما میکروویو پیشنهادی

مطابق شکل ۲، چگالی پلاسما در منبع میکروویو پیشنهادی (برای استخراج یون) دقیقاً زیر حفره استخراج کننده ۶۰ برابر چگالی پلاسما در منبع پلاسمای رایج در توان موج یکسان (1000W) می باشد که این چگالی بالا قابلیت استخراج یون را از این پلاسما به طور چشم گیری افزایش خواهد داد.

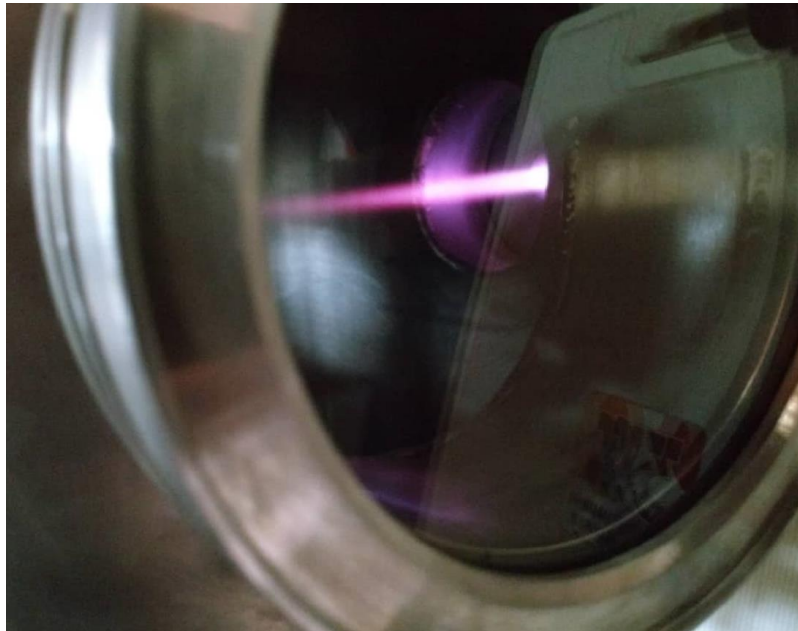
۳. آزمایش های تجربی

ساخت چشمه پلاسما بعد فاز های طراحی و شبیه سازی پلاسما و بدست آوردن ابعاد بهینه کاواک انجام شد. شکل (۴)، نمایی از چشمه پلاسما و تجهیزات مورد نیاز برای تست چشمه را نشان می دهد.



شکل ۴. چیدمان آزمایشگاهی تست چشمه پلاسما.

در شکل ۵، نمایی از پلاسمای تولید شده توسط محفظه پلاسمای پیشنهادی برای استخراج یون نشان داده شده است. همچنین از یک مگنترون با توان ۱۰۰۰ وات به عنوان مولد موج استفاده است.

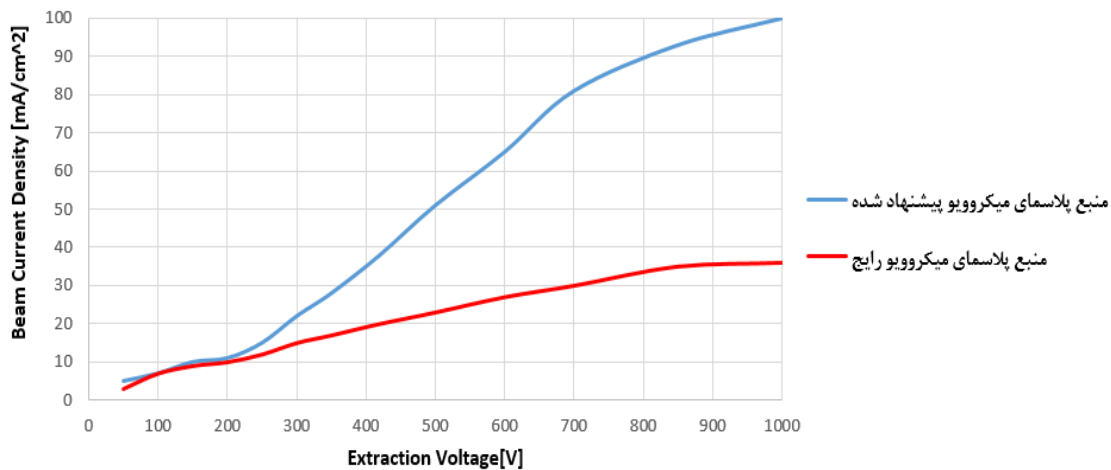


شکل ۵. نمایی از پلاسمای تولید شده توسط چشمه پلاسمای پیشنهادی.

با استفاده از پروب لانگمیر چگالی و دمای پلاسمای به صورت تجربی اندازه گیری شده است، دمای و چگالی پلاسمای به ترتیب 1.1eV و $10^{17}/\text{m}^3$ بدست آمد.

۴. بحث و نتیجه

در منابع میکروویو رایج چگالی پلاسمای از مرتبه 10^{16} بر متر مکعب و دما ۴ تا ۵ الکترون ولت است، اما در منبع پلاسمای پیشنهادی چگالی پلاسمای از مرتبه 10^{17} بر متر مکعب و دما ۱ الکترون ولت بدست آمده است. بنابراین با توجه به معادلات ۱۰ و ۱۱ منحنی تغییرات جریان استخراج شده از دو منبع پلاسمای در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۶. منحنی تغییرات چگالی جریان استخراج شده از دو منبع پلاسمای رایج و پیشنهادی.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله برای اولین بار از یک منبع پلاسمای نقطه‌ای میکروویو که قابلیت تمرکز توان موج در نقطه‌ای زیر حفره استخراج کننده و افزایش قابل توجه چگالی پلازما در این ناحیه را دارد به عنوان منبعی برای استخراج یون استفاده شده است. همچنین با استفاده از نرم افزار *Comsol* به شبیه سازی منبع پلازما و بدست آوردن ابعاد بهینه کاواک پرداخته شده است. در نهایت به نتایج زیر دست یافته ایم:

۱- چگالی پلازما در منبع میکروویو پیشنهادی (برای استخراج یون) دقیقاً زیر حفره استخراج کننده ۶۰ برابر چگالی پلازما در منبع پلاسمای رایج در توان موج یکسان (1000W) می باشد که این چگالی بالا قابلیت استخراج یون را از این پلازما به طور چشم گیری افزایش خواهد داد.

۲- در منابع میکروویو رایج چگالی پلازما از مرتبه 10^{16} بر متر مکعب و دما ۴ تا ۵ الکترون ولت است، اما در منبع پلاسمای پیشنهادی چگالی پلازما از مرتبه 10^{17} بر متر مکعب و دما ۱ الکترون ولت بدست آمده است.

۳- با توجه به چگالی و دمای پلازما می توان انتظار داشت چگالی جریان یون استخراج شده با بکار گیری منبع پلازما پیشنهادی در مقایسه با منابع رایج میکروویو بیش از ۲ برابر افزایش پیدا کند.

مراجع

1. Reyntjens, Steve, and Robert Puers. "A review of focused ion beam applications in microsystem technology." *Journal of micromechanics and microengineering* 11.4 (2001): 287.
2. Reyntjens, Steve, and Robert Puers. "Focused ion beam induced deposition: fabrication of three-dimensional microstructures and Young's modulus of the deposited material." *Journal of Micromechanics and Microengineering* 10.2 (2000): 181.
3. Tseng, Ampere A. "Recent developments in micromilling using focused ion beam technology." *Journal of micromechanics and microengineering* 14.4 (2004): R15.
4. Scipioni, L., et al. "Performance of multicusp plasma ion source for focused ion beam applications." *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena* 18.6 (2000): 3194-3197.
5. Miljević, Vujo I. "Some characteristics of the hollow anode glow." *Journal of applied physics* 60.12 (1986): 4109-4112.
6. Anders, André, and Simone Anders. "The working principle of the hollow-anode plasma source." *Plasma Sources Science and Technology* 4.4 (1995): 571.
7. Anders, André, and Michael Kühn. "Characterization of a low-energy constricted-plasma source." *Review of scientific instruments* 69.3 (1998): 1340-1343.
8. Anders, Andre, and George Yu Yushkov. "Low-energy linear oxygen plasma source." *Review of Scientific Instruments* 78.4 (2007): 043304.
9. Park, Yeong-Shin, and Y. S. Hwang. "Enhancement in ion beam current with layered-glow in a constricted dc plasma ion source." *Review of Scientific Instruments* 81.2 (2010): 02B309.
10. Park, Yeong-Shin, et al. "Characterization of plasma ion source utilizing anode spot with positively biased electrode for stable and high-current ion beam extraction." *Review of Scientific Instruments* 82.12 (2011): 123303.
11. Yuan, Yue, et al. "Influence of neon seeding on the deuterium retention and surface modification of ITER-like forged tungsten." *Nuclear Fusion* 61.1 (2020): 016007.
12. Urban, J., et al. "NBI system for reinstalled COMPASS-D tokamak." *Czechoslovak Journal of Physics* 56.2 (2006): B176-B181.
13. Chundong, H. U., et al. "Overview of development status for EAST-NBI system." *Plasma Science and Technology* 17.10 (2015): 817.
14. Gao, Xiang. "Sustained high β_N plasmas on EAST tokamak." *Physics Letters A* 382.18 (2018): 1242-1246.
15. Karpushov, Alexander N., et al. "Upgrade of the diagnostic neutral beam injector for the TCV tokamak." *Fusion engineering and design* 66 (2003): 899-904.
16. Kazemi, M., and R. Amrollahi. "Simulation, Design, Construction of Duoplasmatron and Diagnostic Neutral Beam System for Alborz Tokamak." *Journal of Fusion Energy* 37.1 (2018): 21-29.
17. Bandyopadhyay, M., et al. "Overview of ion source characterization diagnostics in INTF." *Review of Scientific Instruments* 87.2 (2016): 02B906.