بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

طراحی و شبیه سازی آهنربا چشمه یونی پنینگ کاتد سرد

عاطفه فتحی، سید امیر حسین فقهی، سید مصطفی ساداتی

دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه کاربرد پرتوها

چکیده – در این مقاله ساختار میدان مغناطیسی برای یک چشمه یونی پنینگ با استفاده از آهنربای دائم بهینه سازی شده است. این چشمه یونی برای شتاب دهنده الکترواستاتیکی ۲۰۰*keV* طراحی شده است. با شبیه سازی رفتار ذرات درون چشمه یونی، با استفاده از برنامه شبیه سازی *CST* ، مناسب‌ترین آرایش آهنربا برای این چشمه یونی انتخاب شده است. هدف از این طراحی، بالا بردن کارایی چشمه با افزایش چگالی پلاسما درون چشمه است که بر ویژگی‌های باریکه اثر خواهد گذاشت. سیستم مغناطیسی طراحی شده شامل دو آهنربای حلقه‌ای با فاصله یکسان از یکدیگر در اطراف آند است. این آرایش میدان مغناطیسی، مانند آینه مغناطیسی عمل خواهد کرد و باعث شده ذرات بیشتری درون چشمه به دام انداخته شود، بنابراین چگالی ذرات قبل از تشکیل پلاسما افزایش یافته و منجر به تشکیل پلاسمای چگالتری خواهد شد.

کلید واژه- برنامه شبیه سازی CST، پلاسما، چشمه یونی پنینگ، طراحی آهنربا.

Design and simulation of magnet cold penning ion source

Atefeh Fathi, Seyed Amir Hossein Feghhi, Seyed Mostafa Sadati

Nuclear engineering Department of University of Shahid Beheshti

Abstract-In this paper, we optimized the magnetic-field configuration for a penning ion source by using permanent magnets. This ion source is designed for a ۲۰۰keV electrostatic accelerator. By simulating particle behavior in the ion source with CST particle studio, the appropriate magnets design parameters has been optained.The purpose of this design is to increase the effieciency of the ion source by producing a dense plasma that affect the beam characteristict. The designed magnetic system consist of two ring magnets around the anode at the same distance from each other.the arrangement of the magnetic field behaves like a magnetic mirror that causes to trap more particle inside the source. So the particle density increase before plasma formation that causes to organization of more dense plasma.

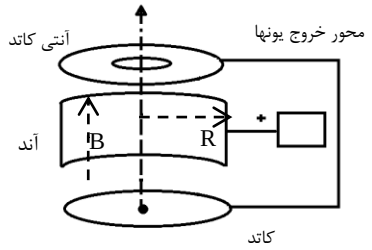
Keywords: CST simulation program, plasma, penning ion source, design magnet.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-29]

۱- مقدمه

نام چشمه یونی پنینگ از F . M .Penning گرفته شده است که مخترع دستگاه خلا فیلیپس یا پنینگ بوده است. چشمه یونی پنینگ کاربردهای فراوانی از جمله در شتاب‌دهنده ذرات[۱]، کاشت یون[۲]، کندوپاش[۳,۴]، تبخیر سطح و کاربردهای گداخت[۵] دارد. ازویژگی های این چشمه تخلیهarc می‌باشد، که الکترون بین یک دو کاتد سرد، میان یک آند تو خالی در میدان مغناطیسی نوسان می‌کند. کاتد و آنتی کاتد نسبت به آند دارای پتانسیل منفی می‌باشد. سیستم پنینگ سیستمی است که با گیر اندازی الکترون در مرکز باعث می‌گردد که الکترون‌ها در مرکز رفت و آمد کنند و در نتیجه با ذرات خنثی برخورد کرده و در اثر این برخورد آنها را یونیزه کنند. یک طرحواره از یک سیستم پنینگ در شکل ۱ نشان داده شده است.



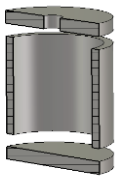
شکل ۱: طرح واره چشمه پنینگ

از آنجایی که در حضور میدان مغناطیسی الکترون با فرکانس لامور در مدار مارپیچی حرکت می‌کند بنابراین تعداد برخوردها افزایش یافته و ذرات یونیزه نیز افزایش می‌یابد. بنابراین در حضور میدان مغناطیسی، تخلیه می‌تواند در فشار پایین تر از عدم حضور آن نگهداری شود. اگر میدان مغناطیسی محوری بزرگتر باشد در نتیجه شعاع حرکت مارپیچی ذرات کوچکتر شده و انتظار می‌رود الکترون کمتری به آند برخورد کند، بنابراین انتظار می‌رود چگالی پلاسما افزایش یابد. در این مقاله هدف طراحی آرایشی از آهنربا برای چشمه یونی پنینگ بوده که منجر به افزایش زمان محصور سازی ذرات درون چشمه خواهد شد که نهایتا باعث شده پلاسمای تولید شده درون چشمه چگالتر شود. بنابراین تمام شبیه سازی ها با استفاده از برنامه CST برای رفتار الکترون قبل از تخلیه و تشکیل پلاسما می‌باشد. در حضور پلاسما و میدان الکتریکی و مغناطیسی موضعی بوده در نتیجه مسیر حرکت ذرات خیلی پیچیده می‌شود.

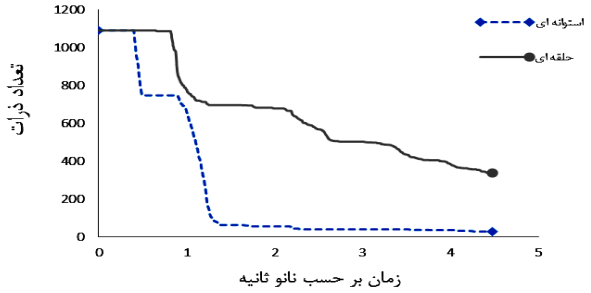
۲- بررسی مدل‌های آهنربا موجود

به صورت کلی درچشمه یونی پنینگ، آهنربا به دو صورت استوانه‌ای در زیر کاتد[۶,۷,۸] و یا به صورت آهنربا حلقه-ای در اطراف آند استفاده می‌گردد.[۷]

با استفاده از برنامه CST، چشمه یونی پنینگ با آندی به قطر داخلی ۱۲,۷mm و قطر خارجی ۱۵mmو ارتفاع ۳۰mm و همچنین دو کاتد به ضخامت ۴mm و قطر ۱۵mm مطابق با آنچه در شکل ۲ نشان داده شده است، شبیه سازی شده است. در چشمه یونی شبیه سازی شده، تعداد ذرات محصور شده داخل چشمه بر حسب زمان برای آهنربا استوانه‌ای و حلقه‌ای به دست آورده شده است. در شکل ۳ تغییرات زمانی تعداد ذرات گیراندازی شده داخل چشمه برای مدل‌های حلقه‌ای و استوانه‌ای آهنربا محاسبه و نشان داده شده است. مطابق نتایج نشان داده شده در شکل ۳، استفاده از آهنربا حلقه‌ای نسبت به آهنربا استوانه‌ای در گیر اندازی ذرات درون چشمه بهتر عمل می‌کند یعنی در مدت زمان بیشتر تعداد ذرات بیشتری درون چشمه باقی خواهند ماند. از آنجایی که اساس تخلیه پنینگ، گیر اندازی ذرات می‌باشد پس استفاده از آهنربا حلقه‌ای، نسبت به آهنربا استوانه‌ای مناسبتر می‌باشد.



شکل ۲: مدل چشمه یونی پنینگ طراحی شده در برنامه CST

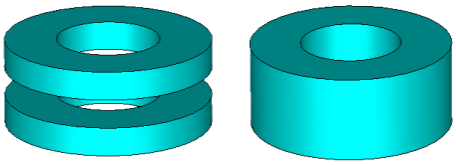


شکل ۳: تغییرات زمانی تعداد ذرات گیراندازی شده داخل چشمه بر حسب نانو ثانیه برای مدل‌های حلقه‌ای و استوانه‌ای آهنربا

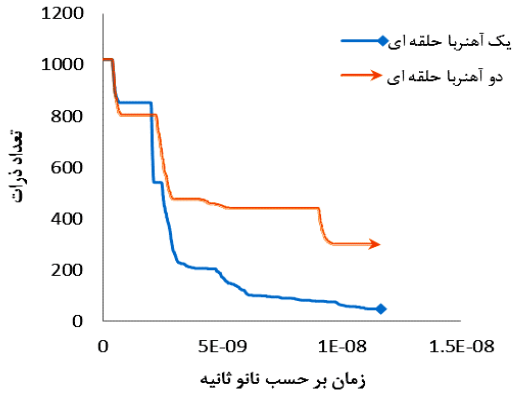
[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-29]

۳- طراحی و شبیه سازی آهنربا

آرایشی که در اینجا برای استفاده در چشمه یونی پنینگ مطرح می‌گردد به صورت شکل ۴ (ب) بوده که به جای استفاده از یک آهنربا حلقه‌ای، که کاملا اطراف آند را بپوشاند، از دو آهنربا حلقه‌ای با ارتفاع کمتر و با فاصله کمی از یکدیگر استفاده می‌شود. بدین صورت که دو آهنربا حلقه‌ای هر کدام به قدرت ۱۰۰۰G ، ارتفاع ۱۰mm و شعاع خارجی و داخلی به ترتیب ۴۰mm و ۲۰mm با فاصله ۱۰ mm از یکدیگر ، شبیه سازی شده است. مانند قبل هر دو حالت برای چشمه یونی جایگزین شده و تعداد ذرات بر حسب زمان برای این دو حالت به دست آمده است. طبق نمودار شکل ۵، به دلیل محصور سازی بهتر ذرات، استفاده از دو آهنربا حلقه‌ای بهتر از تک آهنربا حلقه‌ای است.

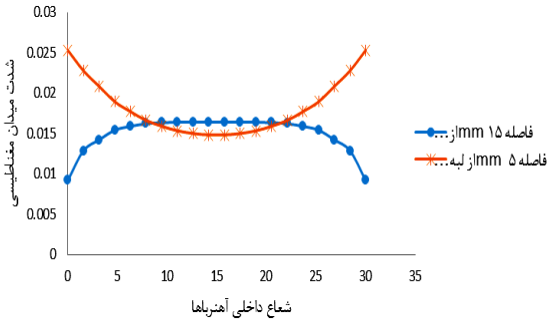


شکل ۴ : الف)حالت اول استفاده از تک آهنربا حلقه‌ای. ب) حالت دوم استفاده از دو آهنربا حلقه‌ای



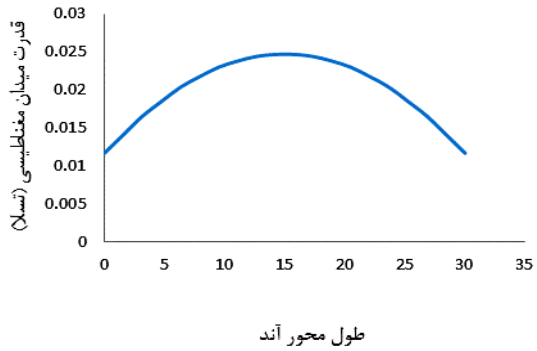
شکل ۵: تعداد ذرات گیراندازی شده داخل چشمه بر حسب نانو ثانیه برای دو حالت تک آهنربا حلقه‌ای و استفاده از دو آهنربا حلقه‌ای

استفاده از آرایش دو آهنربا باعث شده این آرایش مانند آینه مغناطیسی عمل کند. در آینه مغناطیسی زمانی که ذرات از مکانی با شدت میدان مغناطیسی کمتر به مکانی با شدت میدان مغناطیسی بیشتر می‌روند، به دلیل صفر شدن سرعت موازیشان، منعکس شده و باز می‌گردند. شکل ۶ ارزیابی میدان مغناطیسی عرضی را در ارتفاع ابتدایی و میانه آند، نشان می‌دهد. نمودار شکل۶ نشان می‌دهد که میدان مغناطیسی در ارتفاع میانه آند کمتر از میدان مغناطیسی در ارتفاع ابتدای آند است.

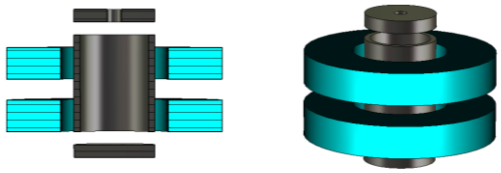


شکل ۶: ارزیابی میدان مغناطیسی شعاعی در ارتفاع ابتدایی و میانه آند

شکل ۷ میدان مغناطیسی محوری را در راستای محور آند نشان می‌دهد. برای استخراج مناسب‌تر یون بهتر است شکل میدان مغناطیسی محوری در راستای محور آند به صورت نامتقارن باشد، به طوری که محصور سازی در قسمت بالای آند نسبت به قسمت پایین آند کمتر رخ دهد تا برخی از ذرات بتوانند از آینه مغناطیسی فرار کرده و استخراج شوند. در صورتی که فاصله بین دو آهنربا کمتر شود و آهنربا بالایی کمی پایین‌تر از لبه‌ی انتهایی آند قرار داده شود، همانند شکل ۸، شکل میدان مغناطیسی محوری به صورت نامتقارن مشابه شکل ۹ خواهد شد.

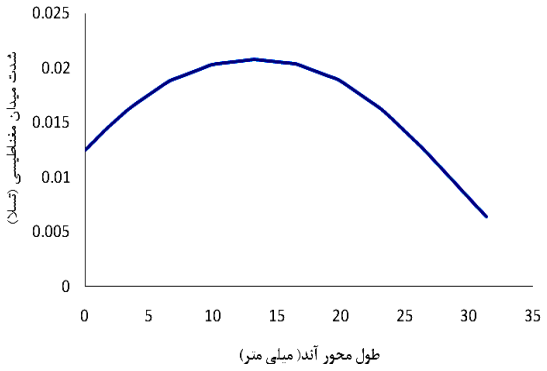


شکل ۷: میدان مغناطیسی محوری برای دو آهنربا حلقه‌ای با فاصله از یکدیگر



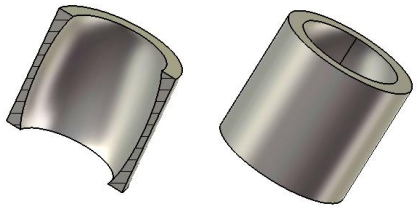
شکل۸: تغییر آرایش دو آهنربا حلقه‌ای برای بهبود کارکرد استخراج یون از چشمه

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-29]

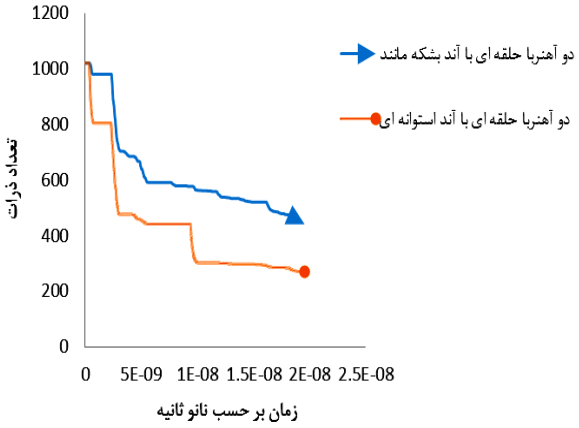


شکل ۹: میدان مغناطیسی محوری برای آرایش دو آهنربا حلقه‌ای با فاصله بهبود یافته

شکل ۶ نشان می‌دهد که در ارتفاع میانه آند، میدان مغناطیسی در نواحی نزدیک به دیواره آند کمتر از میدان مغناطیسی مرکز آند می‌باشد. بنابراین به علت کاهش میدان مغناطیسی نزدیک دیواره در ارتفاع میانه‌ی آند، شعاع لامور ذرات در این ناحیه افزایش یافته و به دیواره آند برخورد خواهند کرد. بنابراین با تغییر شکل آند از حالت استوانه ساده به استوانه بشکه‌ای شکل، شکل آند را بهبود داده و این دو حالت را با قرار دادن در چشمه یونی شبیه سازی شده، با یکدیگر مقایسه کرده که نتایج شکل ۱۱ نشان می‌دهد آند بشکه‌ای شکل بهتر از آند استوانه‌ای برای این نوع آرایش آهنربا عمل خواهد کرد.



شکل ۱۰ : آند بشکه‌ای شکل



شکل ۱۱: تعداد ذرات بر حسب نانو ثانیه برای آند استوانه‌ای و بشکه-ای

نتیجه‌گیری

عملکرد ساده چشمه یونی پنینگ، باعث شده که این نوع چشمه جای گزین مناسبی برای سایر چشمه‌های پیچیده و پر هزینه باشد. اما چشمه یونی پنینگ دارای جریانی نسبتا پایین می‌باشد که با توجه به ساختار ساده آن با تغییراتی که در اجزاء آن می‌توان به وجود آورد، می‌توان این نقص را برطرف نمود. یکی از عواملی که تاثیر بسزایی بر عملکرد این چشمه می‌تواند داشته باشد میدان مغناطیسی ناشی از آهنرباها می‌باشد. که در این پژوهش نشان داده شد که می‌توان با طراحی آرایش دو آهنربا حلقه‌ای در ابتدا و انتهای آند و با فاصله از یکدیگر، به شکل گیری بهتر تخلیه پنینگ درون این چشمه کمک نمود که تخلیه تاثیر بسزایی بر ویژگی‌های پلاسمای تشکیل شده درون چشمه و نهایتا باریکه استخراج شده از چشمه را خواهد داشت.

مراجع

[۱] Hellborg. R, Electrostatic Accelerators Fundamentals and Applications, Springer, Netherlands, ۲۰۰۵.

[۲] . Nastasi. M and Mayer J.W, ion implantation and synthesis of materials, Springer Berlin Heiderlberg, New York, ۲۰۰۶.

[۳] Behrisch R and Eckstein, Sputtering by particle bombardment: experiment and computer calculations from threshold to MeV energies, Springer, Berlin, ۲۰۰۷.

[٤] Baragiola R.A, Sputtering: survey of observations and derived principles, phil. Trans. R. Soc. Lond. A ۳٦۲, ۲۰۰٤.

[٥] Loeb H.W, Plasma-based ion beam sources, plasma phys. Controlled Fusion ٤۷, ۲۰۰٥.

[٦] Rovey. Joshua L, Design parameter investigation of a cold-cathode Penning ion source for general laboratory applications, plasma Sources and technology, ۲۰۰۸.

[۷] Amy. Sy, Advanced Penning-type ion source development and passive beam focusing techniques for an associated particle imaging neutron generator, Electronic Thesis and Dissertations UC Berkeley, Ph.D , Nuclear Engineerig, ۲۰۱۳.

[۸] B.K. Das, A.Shyam, R.Das, A.D.P.Rao, Development of hollow anode penning ion source for laboratory application, Nucl. Instrum. & Methods in Phys. Res. A ٦٦۹, ۱۹_۲۱, ۲۰۱۲.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-29]