

طراحی و ساخت چشمه یونی پنینگ مینیاتوری

سید مصطفی، ساداتی^{۱*}؛ غلامرضا، اطاعتی^۲

۱- دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته ای

۲- دانشگاه صنعتی امیر کبیر، دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک

چکیده

در این کار طراحی و ساخت یک چشمه یونی پنینگ مینیاتوری با ابعاد کوچک (۲۴ میلی‌متر قطر و ۴۷ میلی‌متر طول) مطرح شده است. این چشمه از نوع آند استوانه ای توخالی است. این چشمه از نوع خود استخراج شونده بوده و یون ها در راستای محور چشمه با کمک شکل هندسی الکترودها و اختلاف پتانسیل بین آنها استخراج می شوند. بیشترین جریان یونی اندازه گیری شده با فنجان فارادی در فاصله ۱۰ mm دهانه چشمه، حدود $600 \mu A$ بوده است. برای شبیه سازی چشمه نیز از برنامه CST استفاده شده است. در این مقاله ساختار چشمه یونی، حساسیت جریان دشارژ تولید شده و جریان استخراج شده به فشار گاز تزریقی، اختلاف پتانسیل اعمال شده بین الکترودها گزارش شده است.

کلیدواژه: چشمه یونی، پنینگ، برنامه شبیه سازی CST

مقدمه

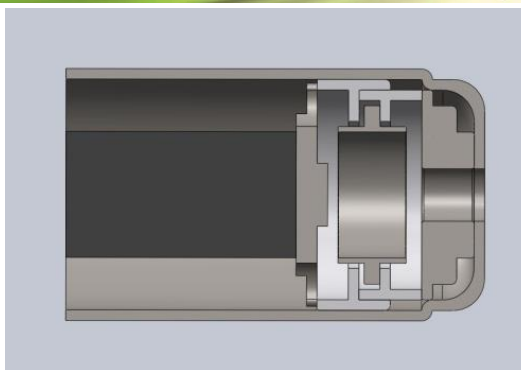
در میان چشمه های یونی [۱]، چشمه یونی پنینگ کاتد سرد از مفیدترین آنها می باشد، چرا که از نظر ابعاد چشمه ای کوچک بوده، فیلامان نداشته و بسته به جنس الکترودها از طول عمر خوبی برخوردار است. این مزایا باعث شده تا این چشمه کاربرد وسیعی نیز پیدا کرده باشد. یکی از انواع چشمه های پنینگ مدل خود استخراجی یون می باشد که دارای ابعاد کوچکی است که در این کار به آن پرداخته شده است. در چشمه پنینگ با اعمال اختلاف پتانسیل بین دو کاتد و آند حلقه ای یا استوانه ای شکل پلاسما تشکیل می شود. در این کار از یک استوانه برای آند استفاده شده است و به همین دلیل به آن آند توخالی^۱ می گویند. میدان مغناطیسی ناشی از آهنربای دائمی نیروی $J \times B$ را در طول محور چشمه در ناحیه پلاسمایی اعمال می کند. حضور این نیرو به افزایش یونیزاسیون گاز به سبب افزایش مسیر چرخشی الکترون ها کمک می کند. در این نوع چشمه نیازی به الکترودها اضافی برای استخراج یون ها نمی باشد. یون ها به کمک شکل هندسی الکترودها و نتیجتاً شکل سطوح هم پتانسیل و همچنین چگالی پلاسما از الکترودها خارج می شوند. اثر شکل هندسی و زاویه الکترودها پلاسمایی بر روی استخراج یون ها گزارش شده است [۲]. سطوح هم پتانسیل ناشی از اختلاف پتانسیل الکترودها بگونه ای است که ذرات باردار در حین عبور از محیط پلاسمایی به سمت دهانه استخراج کننده،

^۱- Hollow Anode

علاوه بر تجربه نیروی رو به جلو، همگرا نیز می شوند. در ادامه به توضیح هندسه و شرایط کاری چشمه پرداخته شده است.

روش کار

هندسه مدل شده و چشمه یونی ساخته شده در شکل ۱ نشان داده شده است. چشمه شامل دو کاتد و یک آند استوانه‌ای می باشد که بخاطر دستیابی به سطح ولتاژ دشارژ پایین از جنس استیل نگیر ساخته شده اند. مشخص شده است که در بین مواد مختلف مورد استفاده برای کاتد، آهن و اورانیوم دارای پایین ترین ولتاژ دشارژ می باشند [۳]. البته طول عمر الکتروود اورانیومی بیشتر از استیل می باشد که به علت محدودیت در تهیه، الکتروودها از جنس استیل انتخاب شدند. کاتد اول به نام کاتد و دیگری که نقش استخراج کننده از بر عهده دارد به نام آنتی کاتد یا الکتروود پلاسمایی شناخته می شوند. قطر داخلی آند ۱۳ میلی متر و طول آن ۶٫۵ میلی متر بوده و در فاصله ۲ میلی متری از کاتد و آنتی کاتد قرار گرفته است. قطر دهانه استخراج کننده که یونها از آن عبور می کنند ۵ میل متر می باشد. در برخی کارها برای استخراج بهینه پلاسما از زاویه 40° برای استخراج کننده استفاده شده است [۴]، اما در اینجا از هیچ زاویه‌ای بر روی آنتی کاتد استفاده نشده است. سطوح الکتروودها تا ۱ میکرومتر به روش الکتروپولیش پرداخت شده اند. آهنربای دائمی استفاده شده در پشت کاتد به شکل استوانه با ابعاد ۱۴ میلی متر قطر و ۲۵ میلی متر ارتفاع و بزرگی میدان آن بر روی کاتد ۸۷۰ گوس می باشد. قرارگیری آهنربا با این چیدمان باعث کاهش شعاع و قطر چشمه یونی می شود. آند با پتانسیل حداکثر ۲٫۵ kV+ تغذیه می شود در حالیکه کاتد و آنتی کاتد به زمین وصل هستند. آند توسط رینگ های شیشه‌ای از بدنه، کاتد و آنتی کاتد عایق شده است. کل چیدمان در یک پوسته فلزی به قطر ۲۴ میلی متر و طول ۴۷ میلی متر قرار گرفته که به کاتد و آنتی کاتد متصل بوده و از آند عایق شده است. کل چشمه درون یک محفظه خلاء شیشه ای T شکل قرار گرفته که از یک طرف خلاء و از یک طرف اتصالات مربوط به چشمه یونی و تزریق گاز و از طرف دیگر اتصالات مربوط به فنجان فارادی که برای اندازه گیری جریان استفاده شده، از طریق فیدتروی الکتریکی به محفظه وصل می شوند. در شکل ۲ تصویر چشمه در حال کردن نشان داده شده است. خروج یونها بدون استفاده از الکتروود اضافی مشخص می باشد. گاز هیدروژن از انتهای چشمه و با کمک دو شیر سوزنی به محفظه تزریق می شود. برای خلاء چشمه از یک پمپ توربومولکولار به همراه روتاری استفاده شده است. فشار پایه‌ای که بدون پخت کردن و گاززدایی به آن رسیده شد از مرتبه 10^{-6} mbar بوده است.



شکل ۱: چشمه یونی پیننگ ساخته شده؛ سمت راست: هندسه مدل شده و سمت چپ: اجزاء چشمه ساخته شده

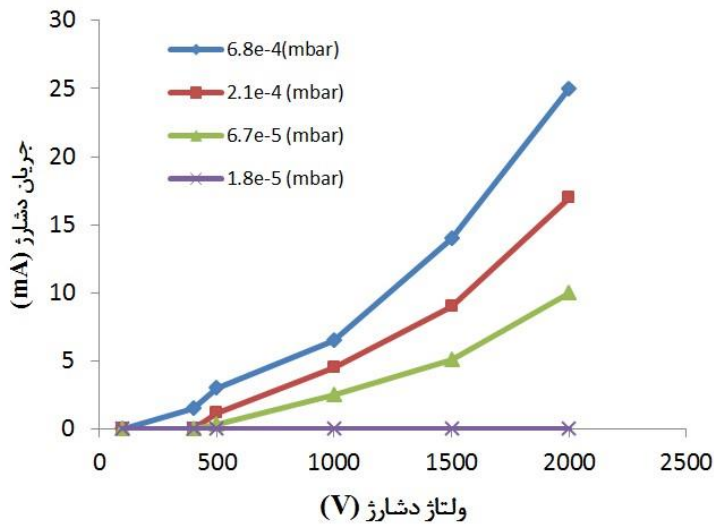


شکل ۲: چشمه یونی در حال کار کردن

نتایج

با تغییر پتانسیل بین الکترودها از ۲-۰ kV و ثابت نگه داشتن فشار گاز تزریق شده هیدروژن در فشارهای 10^{-6} mbar الی 7×10^{-4} mbar، پلاسمای تخلیه تابان^۲ در ناحیه پلاسمای چشمه یونی تولید شده است. در شکل ۳ مقدار جریان دشارژ تولید شده در فشارهای مختلف نسبت به پتانسیل دشارژ نشان داده شده است. در فشار 1.8×10^{-5} mbar جریان دشارژی دیده نشد اما در سه فشار دیگر، جریان دشارژ تولید شده رشد نمایی نشان می دهد که این پدیده را می توان از تئوری بهمن الکترونی متوجه شد [۴]. بیشترین میزان جریان تولید شده در بالاترین فشار یعنی 6.8×10^{-4} mbar و پتانسیل ۲ kV برابر با ۲۵ mA بدست آمده است.

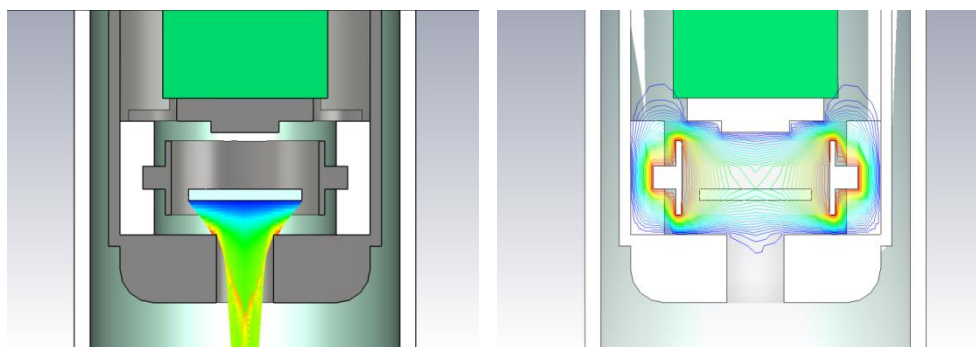
^۲ Glow Discharge



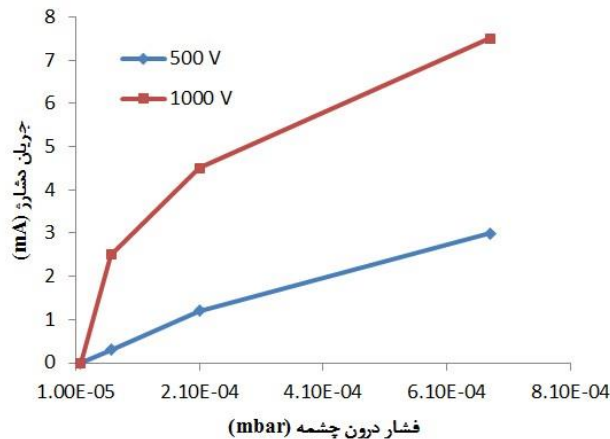
شکل ۳) جریان دشارژ تولید شده در فشار های ثابت نسبت به پتانسیل متغیر دشارژ

کل چشمه با استفاده از برنامه CST شبیه سازی شده است. در شکل ۴ شبیه سازی چشمه نشان داده شده است. در شکل سمت راست خطوط هم پتانسیل مشخص شده اند و کاملاً مشخص می باشد که شکل خطوط هم پتانسیل از دلایل اصلی همگرا شدن یونها و خروج از چشمه می باشند. در شکل سمت چپ نحوه شکل گیری باریکه و خروج از چشمه نشان داده شده است. از طرف دیگر برای حالت خود استخراجی ذرات باردار، جریان یونی خارج شده از چشمه بستگی به چگالی پلاسمای تولید شده و هلال پلازما در دهانه استخراج کننده دارد [۵]. هلال پلاسمایی تشکیل شده با شکل مقعر در دهانه خروجی باعث همگرا شدن باریکه می شود [۶].

در شکل ۵ جریان دشارژ تولید شده در پتانسیل های ثابت ۵۰۰ و ۱۰۰۰ ولت و فشار های متغیر نشان داده شده است. آنچه از شکل برمی آید اینست که با زیاد شدن فشار گاز رشد جریان دشارژ تولید شده کاهش می یابد. این مسئله می تواند به زیاد شدن باز ترکیب یونها با افزایش چگالی پلازما برگردد.

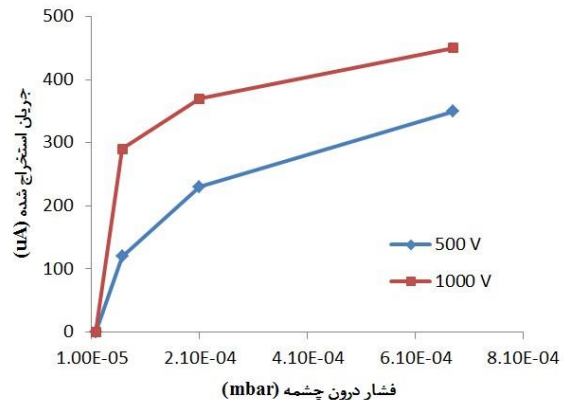
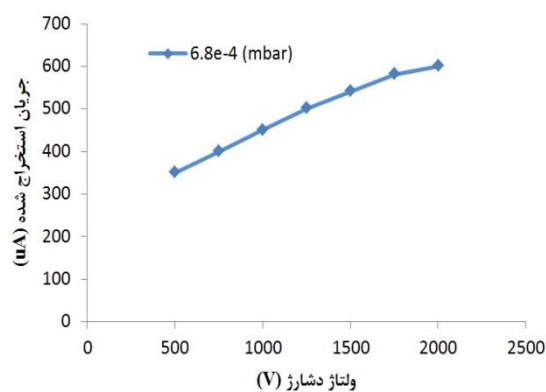


شکل ۴: شبیه سازی چشمه، راست) سطوح هم پتانسیل بین الکترودها؛ چپ) خروج باریکه یونی از چشمه



شکل ۵) جریان دشارژ تولید شده در پتانسیل دشارژ ثابت نسبت به فشارهای متغیر گاز

در شکل ۶ مقدار جریان استخراج شده از چشمه در فشارهای مختلف گاز و پتانسیل‌های مختلف نشان داده شده است. بیشترین میزان جریان استخراج شده در فشار 6.8×10^{-4} mbar و پتانسیل ۲ kV برابر $600 \mu\text{A}$ اندازه گیری شده است. نتیجه نشان می‌دهد که با افزایش پتانسیل در فشار ثابت تقریباً خروج یونها از چشمه بصورت خطی رشد می‌کنند. به عبارت دیگر تاثیر خطوط هم پتانسیل بر روی خروج یونها خطی است اما با افزایش فشار گاز و افزایش چگالی پلاسما، رشد تاثیر هلال پلاسمایی در خروج باریکه رو به کاهش می‌باشد. به عبارتی برای خود استخراجی یونها از چشمه، فشار بهینه‌ای وجود دارد که با توجه به محدودیت های تزریق گاز تا فشار نشان داده شده در شکل قابل اندازه گیری بوده و از فیت نمودار مشخص است که نقطه بهینه فشار در حدود 10^{-3} mbar می‌باشد.



شکل ۶: جریان استخراج شده از چشمه؛ راست) در پتانسیل های ثابت و فشار متغیر؛ چپ) در فشار ثابت و پتانسیل متغیر



نتیجه گیری

این چشمه یونی با توجه به ابعاد کوچک، توانایی تولید چند ده میکروآمپر جریان پروتونی را در فشار مرتبه 10^{-4} mbar دارد و باریکه خود استخراج شده آن نیز چند صد میکرو آمپر می باشد. عدم استفاده از الکتروود اضافی برای استخراج یون از نکات اصلی این چشمه می باشد. طراحی ساده، ابزار و تجهیزات ساده، عمر طولانی، کوچک بودن و عملکرد آسان از مزایای اصلی این چشمه یونی هستند. از این چشمه می توان برای کاربردهای کاشتن یون، اسپاترینگ، اچ کردن سطوح^۳ و غیره استفاده نمود.

سپاسگزاری

از کمک های دوست عزیزم جناب آقای مهندس امیر محمد بیگ زاده تشکر و قدردانی می نمایم.

مراجع

- [۱] Huashun Zhang, *Ion Sources*, Springer, Berlin, ۱۹۹۹.
- [۲] B.K. Das, A. Shyam, "Development of compact size penning ion source for compact neutron generator", Rev. Sci. Instrum. ۷۹, ۱۲۳۳۰۵, ۲۰۰۸.
- [۳] R. Hellborg, *Electrostatic Accelerators Fundamentals and Applications*, Springer, Netherlands, ۲۰۰۵.
- [۴] 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 ۶۶۹, ۱۹-۲۱, ۲۰۱۲.
- [۵] S. Humphries Jr., "Modeling ion extraction from a free-plasma surface with a flexible conformal mesh", Journal of Computational Physics ۲۰۴, ۵۸۷, ۲۰۰۵.
- [۶] I.G. Brown, *The Physics and Technology of Ion Sources*, Wiley, New York, ۲۰۰۴.

^۲ Etching