

# ساخت چشمه پلاسمای کاتد داغ برای لایه‌نشانی به روش اسپاترینگ توسط پرتو یون

مصطفی سلحشور، علی اصغر زواریان، مریم صالحی و سید محمد جمال قطبی

گروه پژوهشی فناوری خلأ، جهاد دانشگاهی واحد صنعتی شریف، تهران

( دریافت مقاله : ۹۰/۰۸/۱۲ - پذیرش مقاله : ۹۰/۰۹/۳۰ )

## چکیده

در این پژوهش یک نمونه چشمه پلاسمای کاتد داغ برای یک چشمه پرتو یون پهن به قطر ۵ سانتیمتر طراحی و ساخته شد. این چشمه یون قابل استفاده در لایه‌نشانی به روش کندوپاش است. وضعیت تشکیل پلازما در خلأ بالا (محدوده ۳-۱۰ تا ۴-۱۰ میلی‌بار) و با اعمال میدان مغناطیسی توسط مجموعه آهنرباهای دائمی مورد مطالعه قرار گرفت. تأثیر پارامترهای کنترلی مختلف مانند فشار کار، پتانسیل تخلیه الکتریکی و جریان چشمه الکترون (رشته تنگستن) بر چگالی پلازما بررسی گردید. با اعمال ولتاژ تخلیه الکتریکی ۵۷ ولت و میدان مغناطیسی حدود ۲۰۰ گاوس و عبور جریان ۱۸ آمپر از رشته کاتد، مقدار بیشینه ۱۳۰ میلی‌آمپر برای جریان پلازما در فشار ۴-۱۰×۱/۲ میلی‌بار اندازه‌گیری شد.

واژه های کلیدی: سی‌اس‌تی، باریکه‌ی پوزیترون‌کند، شبیه‌سازی، سیستم انتقال مغناطیسی خم.

## Construction of a hot cathode plasma source for ion beam sputter deposition

M. Salahshoor, A. A. Zavian, M. Salehi and S. M. J. Ghotbi  
Vacuum Technology Research Group, ACECR-Sharif University Branch, Tehran.  
(Received 3 Nov 2011, accepted 21 Dec 2011)

### Abstract

In this research, a hot cathode plasma source was designed and constructed for a 5-centimeter diameter ion beam source. The ion source can be used in ion beam sputter deposition applications. The plasma formation in high vacuum regime (in a range from 10-3 to 10-4 mbar) was studied by applying magnetic field using permanent magnets assembly. Effect of various control parameters such as working pressure, discharge voltage and external electron source (hot tungsten filament) on plasma density were investigated. Under discharge voltage of 57 volt, magnetic field of about 200 Gauss and filament current of 18 ampere, the maximum discharge current of 130 miliampere was obtained at a pressure of 1.2×10-4 mbar.

**Keywords:** CST (Computer Simulation Technology), Slow positron beam, Curved Magnetic transportation system, Simulation

**E-mail of corresponding author:** salahshoor@jdsharif.ac.ir

## مقدمه

رایج‌ترین روش مورد استفاده جهت تولید و نگهداری پلاسما برای کاربردهای تحقیقاتی و صنعتی، اعمال میدان الکتریکی به یک گاز خنثی است. وقتی الکترون‌ها یا فوتون‌ها با انرژی مناسب به اتم‌ها و مولکول‌های خنثی برخورد می‌کنند یون‌ها و الکترون‌های دیگر را بوجود می‌آورند. الکترون‌های ثانوی به همراه الکترون‌های اولیه، دوباره در میدان الکتریکی شتاب می‌گیرند و خود موجب یونش اتم‌های دیگر می‌شوند. این فرآیند به همین ترتیب ادامه می‌یابد تا اینکه یک بهمن الکترونی بمباران کننده اتم‌های خنثی ایجاد می‌گردد و کسری (کمتر از یک درصد) از اتم‌های گاز، یونیزه می‌شوند و تخلیه الکتریکی اتفاق می‌افتد و پلاسما تشکیل می‌گردد [۱-۳].

با توجه به بسامد میدان الکتریکی اعمالی، نحوه‌ی جفت شدن میدان الکتریکی با پلاسما و سازوکار گرمایش پلاسما، چشمه‌های پلاسمایی به انواع مختلفی تقسیم می‌شوند. هر یک از این چشمه‌ها بسته به نیاز و شرایط، دارای پیکربندی‌های مختلفی هستند. در برخی از این چشمه‌ها الکترودها می‌توانند خارج از محفظه‌ی پلاسما قرار گیرند و در بعضی از آنها از دو روش، به صورت همزمان، برای جفت کردن میدان الکتریکی استفاده می‌شود. در غیاب میدان مغناطیسی، طول پویش آزاد الکترون‌ها ( $\lambda$ ) از مرتبه ابعاد محفظه ( $D$ ) است ( $\lambda \sim D$ ) و در نتیجه احتمال برخورد الکترون‌ها با اتم‌های گاز ناچیز بوده و بازدهی یونش کم است، زیرا طول پویش آزاد رابطه عکس با فشار گاز دارد ( $\lambda \sim P^{-1}$ ). از این رو در فشارهای پایین، در این چشمه‌ها، برای افزایش آهنگ یونش از یک میدان مغناطیسی خارجی استفاده می‌گردد.

فشار کار چشمه‌های پلاسما شامل گستره‌ی وسیعی از فشارهای زیر پاسکال تا فشارهای اتمسفری است. در چشمه‌های متعارف تحت خلأ، پلاسما در فشارهای ۰/۰۱ تا چند میلی‌بار ایجاد می‌شود و اگر فشار محفظه پلاسما به خارج از این محدوده برده شود، پلاسما خاموش می‌شود. اما در موارد خاصی مانند سامانه‌های چشمه پرتو یون پهن نیاز است که پلاسما در خلأ بالا ایجاد شود [۴]. یک چشمه

پلاسمای خلأ بالا چشمه‌ای است که بتواند در فشارهای کمتر از ۰/۰۱ میلی‌بار پلاسمای پایدار ایجاد نماید. امروزه چشمه‌های پرتو یون پهن به طور گسترده در کاربردهای مختلف لایه‌نشانی و لایه‌برداری مورد استفاده قرار می‌گیرند [۵-۹]. لایه‌نشانی به روش اسپاترینگ (کندوپاش) توسط پرتو یون، یکی از این کاربردها است که در آن یون‌ها توسط یک چشمه پلاسما تولید و توسط یک سامانه استخراج به پرتو یون تبدیل شده و به سطح هدف مورد نظر تابانده می‌شوند. مزیت اصلی استفاده از چشمه پرتو یون پهن برای کندوپاش، کنترل مستقل چگالی و انرژی پرتو یون است که به ترتیب با پارامترهای کنترلی چشمه پلاسما و سامانه استخراج تنظیم می‌گردد. هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر پارامترهای کنترلی چشمه پلاسما بر چگالی یون است.

در این مقاله، ابتدا پیکربندی چشمه پلاسمای ساخته شده و چیدمان آزمایش تشریح گردیده است. پس از آن تأثیر پارامترهای کنترلی مانند فشار، جریان اعمالی به چشمه الکترون (رشته تنگستن)، ولتاژ تخلیه الکتریکی و اعمال میدان مغناطیسی بر تشکیل پلاسما بررسی و مورد بحث قرار گرفته است.

## پیکربندی چشمه پلاسما و چیدمان آزمایش

چشمه پلاسمای مورد استفاده در این پژوهش، از نوع کاتد داغ است که طرحواره آن در شکل ۱ نشان داده شده است. این چشمه پلاسما به همراه سامانه استخراج، قادر به تولید پرتو یون با قطر ۵ سانتیمتر است. در چشمه پلاسمای ساخته شده، از یک رشته تنگستن به عنوان کاتد استفاده گردید که روی یک پایه تفلونی نصب شد و روی صفحه کار دستگاه خلأ قرار گرفت (شکل ۲).

دوانتهای این رشته از طریق دو فیدتروی الکتریکی به پایانه‌های یک منبع تغذیه AC متصل گردید. یک استوانه استیل زنگ‌نزن به عنوان آند روی پایه تفلونی قرار داده شد بطوری که رشته کاتد در مرکز فضای استوانه آند مستقر شد. آند از طریق یک فیدتروی ولتاژ بالا به پایانه مثبت یک منبع تغذیه DC متصل گردید. پایانه منفی این منبع تغذیه نیز به یکی از



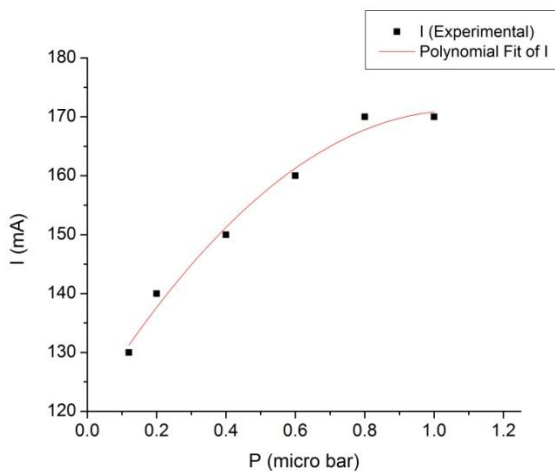
شکل ۳. تصویری از اجزای چشمه پلاسمای مورد آزمایش

### نتایج و بحث

در این پژوهش، ابتدا با اعمال میدان مغناطیسی به یک چشمه پلاسمای کاتد داغ، پلاسمای در خلأ بالا تشکیل شد. سپس با تغییر پارامترهای کنترلی ( شامل جریان رشته  $(I_f)$ ، ولتاژ پلاسمای  $(V)$  و فشار  $(P)$  ) وضعیت تشکیل پلاسمای و جریان تخلیه  $(I)$  به شرح زیر بررسی گردید.

### تأثیر فشار کاری بر چگالی پلاسمای

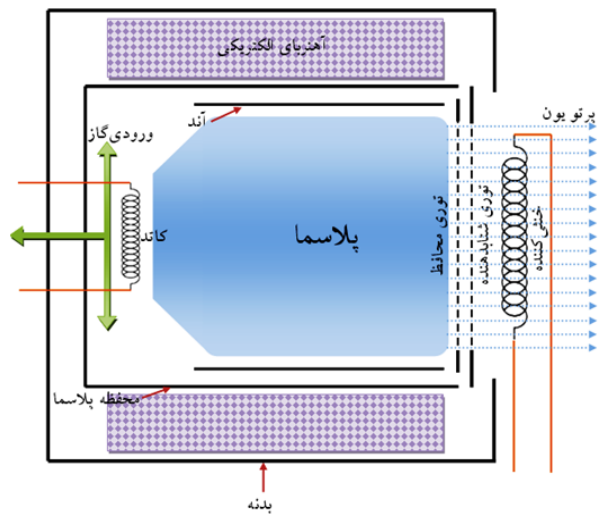
در آزمایش اول برای جریان رشته ۱۸ آمپر و ولتاژ تخلیه ۵۷ ولت، تأثیر افزایش فشار محفظه بر جریان تخلیه الکتریکی بررسی شد و منحنی شکل ۴ بدست آمد.



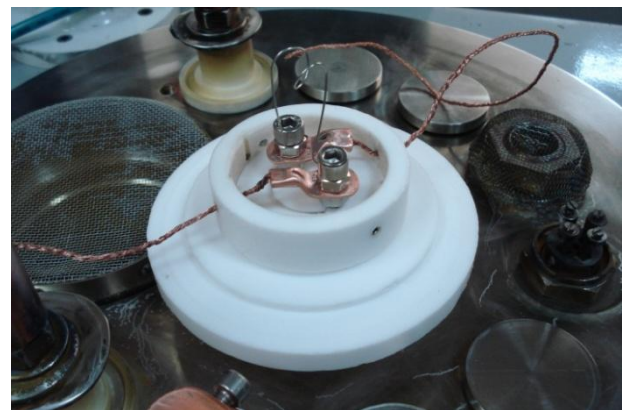
شکل ۴. تغییرات جریان پلاسمای با تغییر فشار

$$(I_f = 18 \text{ A, } V = 57 \text{ volt})$$

پایه‌های کاتد متصل گردید. در اطراف آن، یک مجموعه یکپارچه از آهنرباهای دائمی قرار داده شد. این آهنرباها با ایجاد میدان مغناطیسی درون آن، طول پویش آزاد الکترون‌های گسیلی از کاتد به سمت آنرا کاهش داده و با افزایش احتمال یونش باعث سهولت در تشکیل پلاسمای می‌شوند. شکل ۳ شمای چشمه پلاسمای مورد آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۱: طرحواره چشمه پلاسمای کاتد داغ و سامانه استخراج در یک چشمه پرتو یون پهن بور از لنز

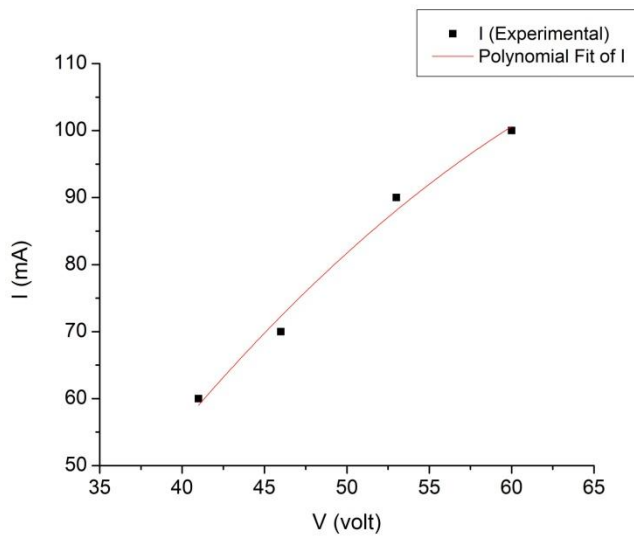


شکل ۲: شمای موقعیت نسبی کاتد و پایه نگهدارنده آن

کاتد، احتمال برخورد آنها با مولکول‌های گاز افزایش یافته و نهایتاً چگالی پلاسما بیشتر می‌شود.

### تأثیر ولتاژ تخلیه بر چگالی پلاسما

در این آزمایش در فشار  $2 \times 10^{-3}$  میلی‌بار و جریان رشته ۱۸ آمپر، تأثیر افزایش پتانسیل تخلیه بر جریان پلاسما بررسی شد. نتایج این آزمایش در منحنی شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶. تغییرات جریان پلاسما با تغییر ولتاژ تخلیه  
( $I_f = 18 \text{ A}$ ،  $P = 2 \times 10^{-3} \text{ mbar}$ )

همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش ولتاژ تخلیه از ۴۳ تا ۶۰ ولت جریان پلاسما از ۶۰ به ۱۰۰ میلی‌آمپر افزایش یافته است. این نتیجه دور از انتظار نیست زیرا هر چه اختلاف پتانسیل اعمالی بین آند و کاتد بیشتر باشد، انرژی بیشتری به ذرات باردار اعمال شده و درجه یونش گاز بیشتر و چگالی پلاسما افزایش می‌یابد.

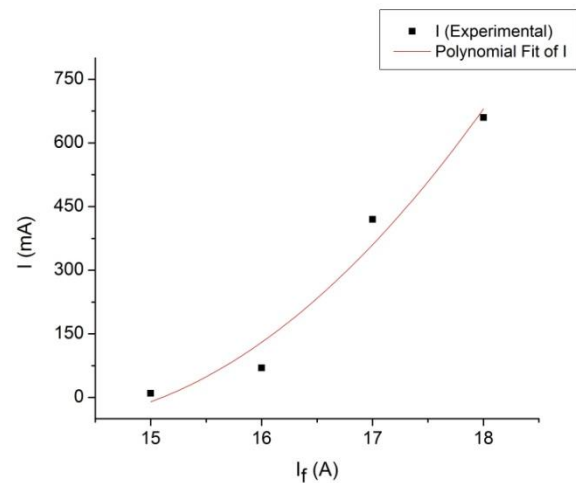
### تأثیر میدان مغناطیسی بر چگالی پلاسما

در این پژوهش، با اعمال جریان ۱۸ آمپر به رشته کاتد و ولتاژ تخلیه ۵۰۰ ولت، بدون اعمال میدان مغناطیسی در فشارهای کمتر از  $2 \times 10^{-3}$  میلی‌بار پلاسما تشکیل نشد. اما با اعمال میدان مغناطیسی تقریبی ۲۰۰ گاوس در مرکز آند، مشاهده گردید که در فشارهای پایین (کمتر از  $1 \times 10^{-3}$  میلی‌بار) نیز

همانطور که مشاهده می‌شود، با کاهش فشار از  $1 \times 10^{-3}$  تا  $10^{-4}$  میلی‌بار، جریان پلاسما از ۱۷۰ به ۱۳۰ میلی‌آمپر کاهش یافته است. زیرا با کاهش فشار محفظه، تعداد مولکول‌های گاز کم می‌شود، در نتیجه احتمال برخورد الکترون‌های گسیلی از کاتد با آنها کاهش می‌یابد. همین مسئله باعث کاهش درجه یونش گاز و در نتیجه کاهش چگالی پلاسما می‌شود. با این حال مشاهده می‌شود که به علت اعمال میدان مغناطیسی حتی در فشارهای پایین ( $1 \times 10^{-4}$  میلی‌بار)، جریان ۱۳۰ میلی‌آمپر از پلاسما عبور می‌کند.

### تأثیر چشمه الکترون بر چگالی پلاسما

در آزمایش دوم در فشار ثابت  $2 \times 10^{-3}$  میلی‌بار و ولتاژ تخلیه ۴۵ ولت، تأثیر افزایش جریان رشته کاتد بر جریان پلاسما بررسی شد. نتایج این آزمایش در منحنی شکل ۵ ارائه شده است.



شکل ۵. تغییرات جریان پلاسما با تغییر جریان رشته  
( $P = 2 \times 10^{-3} \text{ mbar}$ ،  $V = 45 \text{ volt}$ )

همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش جریان رشته از ۱۵ تا ۱۸ آمپر، جریان پلاسما از صفر به ۶۵۰ میلی‌آمپر افزایش یافته است. علت آن است که عبور جریان متناوب از رشته تنگستن باعث گرم شدن آن و تولید الکترون‌های آزاد می‌شود. اعمال اختلاف پتانسیل بین رشته و آند، باعث شارش این الکترون‌ها به سمت آند می‌شود. با افزایش تعداد الکترون‌های گسیلی از

### منابع

۱. م. سلحشور، اصول طراحی و شبیه‌سازی منبع پلاسمای ECR، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه فیزیک، دانشگاه شهید بهشتی، شهریور ۱۳۸۷، صفحه‌های ۱ تا ۱۷.
2. H. Conrads and M. Schmidt, *Plasma generation and plasma sources*, Plasma Sources Science and Technoogy., Vol. 9, (2000) 441–454
3. A. Ganguli and R. D. Tarey, *Understanding plasma sources*, CURRENT SCIENCE, Vol. 83, No. 3, (2002) 279-290
4. J. J. Cuomo, S. M. Rossnagel and H. R. Kaufman, *Handbook of Ion Beam Processing*, NOYES PUBLICATIONS (1989) 1-20.
5. A. Anders, *Plasma and ion sources in large area coating: A review*, Surface and Coatings Technology, Vol. 200, Issues 5–6, (2005) 1893–1906.
6. T. Gallasch, T. Stockhoff, D. Baither and G. Schmitz, *Ion beam sputter deposition of V2O5 thin films*, Journal of Power Sources, Vol. 196, Issue 1, (2011), 428–435.
7. S. Venkatachalam, H. Nanjo, Fathy M. B. Hassan, K. Kawasaki, M. Kanakubo, T. Aizawa, T. Aida and T. Ebina, *Characterization of nanocrystalline indium tin oxide thin films prepared by ion beam sputter deposition method*, Thin Solid Films, Vol. 518, Issue 23, (2010), 6891–6896.
8. T. Stockhoff, T. Gallasch, F. Berkemeier, G. Schmitz, *Ion beam sputter-deposition of LiCoO2 films*, Thin Solid Films, Vol. 520, Issue 9, (2012), 3668–367.
9. D. M. Mattox, *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing (Second Edition)*, William Andrew, (2010) 301–331.

پلاسمای ایجاد می‌شود. در واقع اعمال میدان مغناطیسی، باعث افزایش طول پویش آزاد الکترون‌ها و در نتیجه افزایش احتمال یونش گاز می‌شود.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر پارامترهای کنترلی یک چشمه پلاسمای کاتد داغ بر چگالی پلاسمای بررسی شده است. مشاهده شده است که تشکیل پلاسمای در خلأ بالا بدون اعمال میدان مغناطیسی خارجی امکان‌پذیر نیست. همچنین حضور کاتد داغ برای ایجاد تعداد الکترون‌های کافی برای یونش گاز بسیار مؤثر است. بنابراین، اعمال میدان مغناطیسی و حضور چشمه الکترون خارجی دو شرط اصلی ایجاد پلاسمای در خلأ بالا هستند. به علاوه، براساس نتایج آزمایش‌های گزارش شده، با افزایش هر یک از پارامترهای کنترلی شامل فشار محفظه، جریان رشته تنگستن و ولتاژ تخلیه الکتریکی، جریان تخلیه الکتریکی و در نتیجه چگالی پلاسمای افزایش می‌یابد.