



بررسی عددی تمرکز باریکه الکترونی توسط الکترودها در چشمه کاتد حفره دار

آزاده شریف زاده، سعید میرزانهژاد، امین قادى و فرشاد صحبت زاده

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

در این مقاله معادله پواسون در مختصات استوانه ای حل و خطوط میدان الکترواستاتیک در یک چشمه الکترونی کاتد حفره دار بررسی شده است. با تغییر ساختار الکترودها و پتانسیل آند دینامیک باریکه الکترونی در دهانه خروجی آند بهینه سازی شده است. فاصله نقطه تمرکز از آند، قطر لکه و زاویه ی واگرایی پرتو الکترونی از پارامترهای مورد بررسی در خروجی چشمه الکترونی بوده است.

کلید واژه- باریکه الکترونی، چشمه الکترونی، شتاب دهنده، لنز الکترواستاتیک.

Numerical investigation of electron beam focus by extracting electrodes in hollow cathode source

Azadah Sharifzadeh, Saeed Mirzanejad, Amin Ghadi, Farshad Sohbatazadeh

Department of Atomic and Molecular Physics, Faculty of Basic Science, University of Mazandaran, Babolsar

Abstract- In this paper, resolution Poisson's equation is investigated in cylindrical coordinates of the electrostatic field lines in a hollow cathode electron source. The anode outlet is optimized by changing the structure of the anode electrode and the potential dynamics of the electron beam on. The investigated parameters in the electron source are the focus of the Andes, the divergence angle of the electron beam spot and the diameter of the electron source.

Keywords: electron beam, electron source, electrostatic lens, accelerator.

۱- مقدمه

امروزه تحلیل و محاسبات کامپیوتری در اپتیک باریکه الکترونی با استفاده از نرم افزارهای کامپیوتری توسعه فراوانی یافتند. و برنامه MATLAB یک نرم افزار محاسباتی و تحلیل عددی بسیار قوی برای حل بسیاری از معادلات می-باشد. ما نیز در این پژوهش از نرم افزار متلب برای بررسی عددی کانونی و یا موازی سازی باریکه الکترونی ناشی از کاتد حفره دار استفاده کردیم. الکترودهای استخراج شامل سه الکتروده با ساختار هندسی متعارف که به فاصله های مناسبی از هم قرار گرفته اند، تشکیل شده اند. الکتروده اول به روزنه ی تابش معروف است و شکل آن منجر به کاهش واگرایی باریکه ی الکترونی می شود. الکتروده دوم، الکتروده شتاب دهنده نامیده می شود و در انتها یک لنز متمرکز کننده طراحی شده است. فاصله کانونی و عرض باریکه کانونی بر حسب پارامترها بررسی و بهینه شده اند. ابتدا با حضور سه الکتروده با هندسه مشخص توزیع پتانسیل در فضا تعیین گردید و سپس با توجه به شرایط اولیه ۱۰۰ الکترون، فرایند کانونی و طول کانونی آنها بررسی گردید.

۲- روش شبیه سازی

شبیه سازی کامپیوتری به یک ابزار مهم برای درک اپتیک ذرات باردار، برای تحلیل عملکرد و خواص تصویرسازی آنها و به منظور بهبود طراحی برای سیستم های اپتیکی آینده تبدیل شده است [6]. ما در این مقاله برای هدایت و همگرایی باریکه ذرات باردار با انرژی پایین از لنزهای الکترواستاتیک استفاده می کنیم. با استفاده از نرم افزار MATLAB پیکربندی شتاب دهنده و لنز الکترواستاتیک را شبیه سازی می کنیم و معادله پواسون را برای تمام نقاط فضایی سیستم سه الکترودی حل می کنیم.

$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad (1)$$

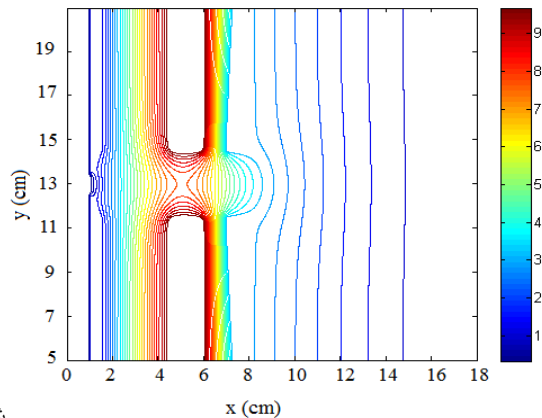
با توجه به معادله (۱) پتانسیل الکترواستاتیک در هر نقطه از فضا تعیین می شود. و با گرفتن گرادیان پتانسیل به توزیع میدان الکتریکی می رسیم.

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} \varphi \quad (2)$$

چشمه های الکترونی در تخلیه الکتریکی به روش های گسیل میدانی، فوتوالکتریک، گسیل ثانویه، گسیل ترمیونیک و کاتد حفره دار الکترون تولید می کنند [1]. به طوری که چشمه های گسیل میدانی بوسیله ی قرار گرفتن فلز یا عایق در میدان الکتریکی بالا عمل می کنند و الکترون ها از سطح توسط نیروهای الکترواستاتیک کنده می شوند. این روش با فاولر و نوردهیم در سال ۱۹۲۸ مورد مطالعه قرار گرفت. روش دوم چشمه های گسیل فوتوالکتریک است که در آن الکترون ها انرژی کافی از فوتون ها دریافت کرده و با برخورد تابش الکترومغناطیسی از مواد جامد جدا می شوند. گسیل الکترون ثانویه از کاتد توسط برخورد یون و یا از برخورد الکترون پر انرژی با یک آند ساطع می شود. و در چشمه های گسیل ترمیونیک یونها و همچنین الکترون ها، می توانند از سطوح فلزی قلیایی داغ ساطع شوند.

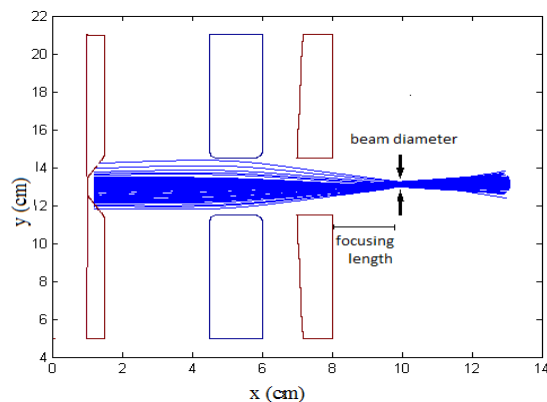
چشمه های کاتد حفره دار از الکترودی دارای روزنه تشکیل شده اند که بوسیله شار گاز در پشت آن تغذیه می شود. این الکترودها به ولتاژ بالا متصل اند که باعث عبور الکترون ها از روزنه می شود. چشمه های کاتد حفره دار از سال ۱۹۶۵ توسعه یافته اند و چون مزیت بیشتری نسبت به دیگر چشمه ها دارند به طور گسترده مورد استفاده قرار می گیرند. باریکه های ذرات باردار گسیل شده از این چشمه ها کاربردهای فراوانی دارند. در اکثر کاربردهای صنعتی به منظور انتقال و استفاده مؤثر از باریکه های ذرات باردار لازم است که باریکه ها منحرف، متمرکز و یا موازی نگه داشته شوند.

لنزهای الکترواستاتیک به طور گسترده برای کنترل و هدایت باریکه ذرات باردار استفاده می شوند. به خوبی می دانیم که یک سیستم دو لنزی نمی تواند باریکه را متمرکز کند در صورتی که انرژی نهایی الکترون نسبت به انرژی اولیه تغییر می کند. به همین دلیل لازم است تا حداقل یک لنز دیگر به سیستم اضافه شود [2]. آقای رید و همکارانش در سال ۱۹۷۱ برای بررسی باریکه های الکترونی انرژی پایین از لنزهای الکترواستاتیک استفاده کردند و خواص این لنزهای هم محور و هم قطر را مورد مطالعه قرار دادند [3,4]. و در سال ۲۰۰۹ آقای سیس و همکارانش خواص اپتیکی سیستم های لنز روزنه الکترواستاتیک را با استفاده از شبیه سازی های کامپیوتری بررسی کردند [5].



شک

ل ۲: سطوح هم پتانسیل در مجموعه شتاب دهنده و لنز الکترواستاتیک، که در آن پتانسیل الکتروود شتاب دهنده 10V و لنز متمرکز کننده 5V است.

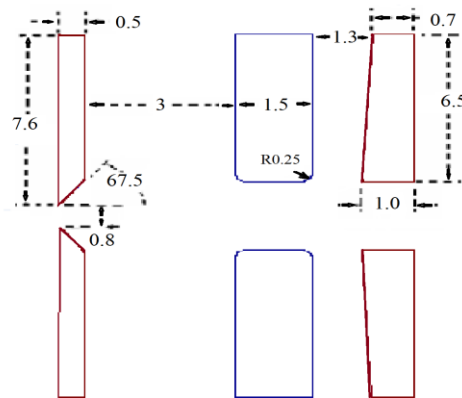


شکل ۴: باریکه الکترونی شتاب گرفته در مجموعه شتاب دهنده و لنز الکترواستاتیک

برای حل معادله حرکت از روش رانگ-کوتا مرتبه چهار استفاده کردیم که در آن دینامیک حرکت را برای صد ذره در فاصله ۰.۸ سانتی متر با سرعت اولیه کاتوره‌ای تابع توزیع ماکسول-بولتزمن مورد بررسی قرار دادیم.

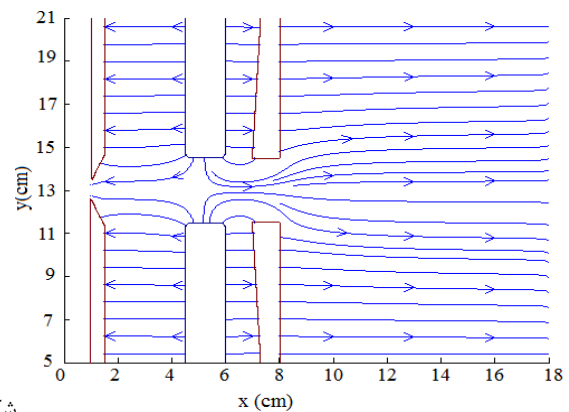
$$f(p) = p^2 \exp\left(-\frac{p^2}{2m_e kT}\right) \quad (4)$$

معادله فوق را نرمالیزه کرده و kT را برابر ۱ الکترون ولت قرار می‌دهیم. شکل (۱) نمایی از ابعاد الکتروودها و فواصل آن‌ها را نشان می‌دهد. در این شکل ساختار هندسی اولیه کاتد و آند با توجه به کارهای تحلیلی و تجربی قبلی پیشنهاد شده است ولی در یک روند بهینه سازی مقادیر نهایی برای بهبود کیفیت پرتو الکترونی خروجی اصلاح شده اند. شکل (۲) سطوح هم پتانسیل در مجموعه شتاب‌دهنده و لنز الکترواستاتیک را نشان می‌دهد که در آن حفره گسیل الکترونی را در پتانسیل یک



شک

ل ۱: پیکربندی الکتروودها، الکتروود اول از سمت چپ روزنه تابش الکتروود میانی الکتروود شتاب دهنده و الکتروود پایانی لنز متمرکز کننده و ابعاد بر حسب سانتی متر می باشد.



شک

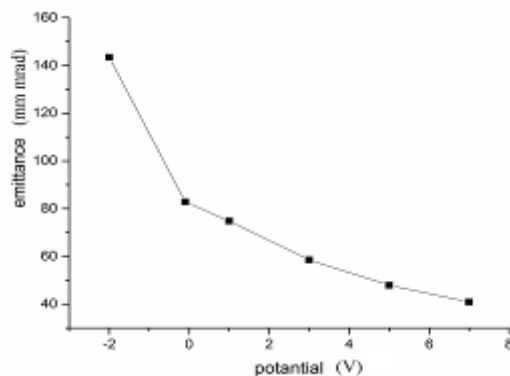
ل ۳: خطوط میدان الکتریکی درون مجموعه شتاب دهنده و لنز الکترواستاتیک با مشخصات ذکر شده در شکل ۲.

بعد از طراحی و شبیه سازی سیستم و ایجاد پتانسیل در آنها، دینامیک حرکت ذرات باردار را در میدان‌های الکتریکی بررسی می‌کنیم. حرکت الکترون در حضور میدان الکترومغناطیسی با معادله لورنتز نسبیتی توصیف می‌شود.

$$\frac{dp}{dt} = -e \left(\vec{E} + \frac{1}{c} \vec{v} \times \vec{B} \right) \quad (3)$$

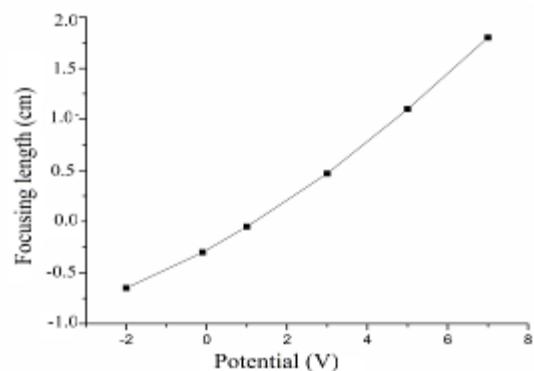
که $\vec{p} = \gamma m_e \vec{v}$ و $\gamma = \sqrt{1 + \frac{p^2}{m_e^2 c^2}}$ فاکتور نسبیتی است. e و m_e بار و جرم الکترون هستند و c سرعت نور در خلاء است. کمیت‌های معادله (۳) را نسبت به بسامد سیکلوترونی ω_c و سرعت نور c در خلاء بی بعد می‌کنیم.

$$\tilde{t} = \omega_c t, \quad \tilde{x} = \frac{\omega_c}{c} x, \quad \tilde{v} = \frac{v}{c}, \quad \tilde{p} = \frac{p}{m_e c}$$



شک

ل ۷: گسیلندگی بر حسب پتانسیل الکتروود نهایی



ش

کل ۵: فاصله کانونی بر حسب پتانسیل الکتروود نهایی

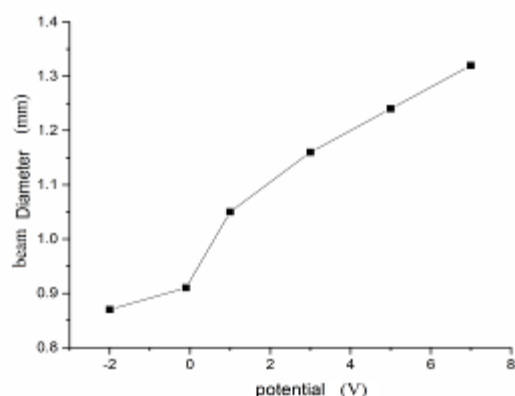
قطر لکه نیز افزایش می‌یابد تا جایی که در ۷ ولت به ۱,۳ میلیمتر می‌رسد. شکل (۷) نمودار گسیلندگی بر حسب پتانسیل است که در آن با افزایش پتانسیل شاهد کاهش گسیلندگی پرتو الکترونی هستیم.

۴- نتیجه‌گیری

با شبیه‌سازی دینامیک حرکت الکترون در طول شتاب دهنده و لنز الکترواستاتیک این نتیجه حاصل شد که با تغییر پتانسیل لنز الکترواستاتیک فاصله کانونی باریکه افزایش می‌یابد و هر چه پتانسیل لنز به پتانسیل الکتروود شتاب‌دهنده نزدیکتر می‌شود باریکه‌ی بهینه‌تری را خواهیم داشت. در ادامه و با تغییر پارامترهای هندسی دیگر می‌توان پرتوی الکترونی با مشخصات دلخواه در خروجی چشمه الکترونی ایجاد کرد.

مراجع

- [1] Roth, J. R. (2001). *Industrial Plasma Engineering: Volume 2- Applications to Nonthermal Plasma Processing* (Vol. 2). CRC Press. M. Lundstrom, *Fundamentals of Carrier Transport*, p. 44, Cambridge University Press, 2000.
- [2] Sise, O., Ulu, M., & Dogan, M. (2005). Multi-element cylindrical electrostatic lens systems for focusing and controlling charged particles. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 554(1), 114-131.
- [3] Read, F. H., Adams, A., & Soto-Montiel, J. R. (1971). Electrostatic cylinder lenses. I. Two element lenses. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 4(9), 625.
- [4] Adams, A., & Read, F. H. (1972). Electrostatic cylinder lenses II: Three element einzel lenses. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 5(2), 150.
- [5] Sise, O., Okumus, N., Ulu, M., & Dogan, M. (2009). Computer simulation of electrostatic aperture lens systems for electron spectroscopy. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 175(1), 76-86.
- [6] Drummond, I. W. (1984). The ion optics of low-energy ion beams. *Vacuum*, 34(1-2), 51-61.



شک

ل ۶: قطر باریکه در تمرکز بر حسب پتانسیل الکتروود نهایی

ولت و زاویه‌ی شیب الکتروود ۶۷,۵ درجه قرار دارد. در فاصله‌ی ۳ سانتی متری از کاتد، الکتروود شتاب دهنده را در پتانسیل ۱۰ ولت، و در انتها پتانسیل لنز الکترواستاتیک را بین ۲- تا ۷ ولت متغییر قرار دادیم. شکل (۳) خطوط میدان الکتریکی در فضای اطراف الکتروودها و شکل (۴) یک نمونه از دینامیک باریکه الکترونی شتاب گرفته در اثر این میدان الکتریکی را نمایش می‌دهد. در بخش نتایج عددی تغییرات ایجاد شده روی مشخصات پرتو الکترونی با تغییر پتانسیل الکتروود انتهایی سیستم را بررسی خواهیم کرد.

۳- نتایج عددی

در شکل‌های (۵) الی (۷) تغییر مشخصات پرتو الکترونی با تغییر پتانسیل الکتروود انتهایی ترسیم شده‌اند. در شکل (۵) با افزایش پتانسیل، فاصله کانونی نیز افزایش می‌یابد و زمانی که پتانسیل لنز را به ۷ ولت می‌رسانیم فاصله کانونی برابر با ۱,۸ سانتی متر می‌شود. شکل (۶) قطر لکه در مرکز همگرایی را نشان می‌دهد که با افزایش پتانسیل