بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

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

آزاده شریف زاده، سعید میرزانژاد، امین قادی 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 Mirzanejhad, Amin Ghadi, Farshad Sohbatzadeh

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.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

۱- مقدمه

چشمه‌های الکترونی در تخلیه الکتریکی به روش‌های گسیل میدانی، فوتوالکتریک، گسیل ثانویه، گسیل ترمویونیک و کاتد حفره‌دار الکترون تولید می‌کنند[1]. به طوری که چشمه‌های گسیل میدانی بوسیله‌ی قرار گرفتن فلز یا عایق در میدان الکتریکی بالا عمل می‌کنند و الکترون‌ها از سطح توسط نیروهای الکترواستاتیک کنده می‌شوند. این روش با فاولر و نوردهیم در سال ۱۹۲۸ مورد مطالعه قرار گرفت. روش دوم چشمه‌های گسیل فوتوالکتریک است که در آن الکترون‌ها انرژی کافی از فوتون‌ها دریافت کرده و با برخورد تابش الکترومغناطیسی از مواد جامد جدا می‌شوند. گسیل الکترون ثانویه از کاتد توسط برخورد یون و یا از برخورد الکترون پر انرژی با یک آند ساطع می‌شود. و در چشمه‌های گسیل ترمویونیک یونها و همچنین الکترون‌ها، می‌توانند از سطوح فلزی قلیایی داغ ساطع شوند.

چشمه‌های کاتد حفره‌دار از الکترودی دارای روزنه تشکیل شده‌اند که بوسیله شار گاز در پشت آن تغذیه می‌شود. این الکترودها به ولتاژ بالا متصل‌اند که باعث عبور الکترون‌ها از روزنه می‌شود. چشمه‌های کاتد حفره‌دار از سال ۱۹۶۵ توسعه یافته‌اند و چون مزیت بیشتری نسبت به دیگر چشمه-ها دارند به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. باریکه-های ذرات باردار گسیل شده از این چشمه‌ها کاربردهای فراوانی دارند. در اکثر کاربردهای صنعتی به منظور انتقال و استفاده مؤثر از باریکه‌های ذرات باردار لازم است که باریکه‌ها منحرف، متمرکز و یا موازی نگه داشته شوند.

لنزهای الکترواستاتیک به طورگسترده برای کنترل و هدایت باریکه ذرات باردار استفاده می‌شوند. به خوبی می‌دانیم که یک سیستم دو لنزی نمی‌تواند باریکه را متمرکز کند در صورتی که انرژی نهایی الکترون نسبت به انرژی اولیه تغییر می‌کند. به همین دلیل لازم است تا حداقل یک لنز دیگر به سیستم اضافه شود[2]. آقای رید و همکارانش در سال ۱۹۷۱ برای بررسی باریکه‌های 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 سیستم‌های لنز روزنه الکترواستاتیک را با استفاده از شبیه سازی‌های کامپیوتری برسی کردند[5].

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 موازی‌سازی باریکه الکترونی ناشی از کاتد حفره دار استفاده کردیم. الکترودهای استخراج شامل سه الکترود با ساختار هندسی متعارف که به فاصله‌های مناسبی از هم قرار گرفته‌اند، تشکیل شده اند. الکترود اول به روزنه‌ی تابش معروف است و شکل آن منجر به کاهش واگرایی باریکه‌ی الکترونی می‌شود. الکترود دوم، الکترود شتاب دهنده نامیده می‌شود و در انتها یک لنز متمرکز کننده طراحی شده است. فاصله کانونی و عرض باریکه کانونی بر حسب پارامترها بررسی و بهینه شده‌اند. ابتدا با حضور سه الکترود 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 می‌کنیم. با استفاده از نرم افزار MATLAB پیکربندی شتاب‌دهنده و لنز الکترواستاتیک را شبیه سازی می‌کنیم و معادله پواسون را برای تمام نقاط فضایی سیستم سه الکترودی حل می‌کنیم.

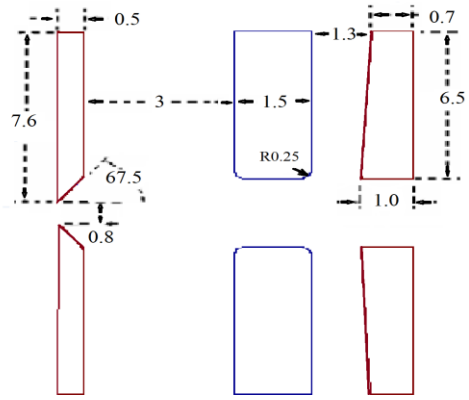
$$\nabla^2 \varphi = 0 \qquad (۱)$$

با توجه به معادله (۱) پتانسیل الکتروستاتیک در هر نقطه از فضا تعیین می‌شود. و با گرفتن گرادیان پتانسیل به توزیع میدان الکتریکی می‌رسیم.

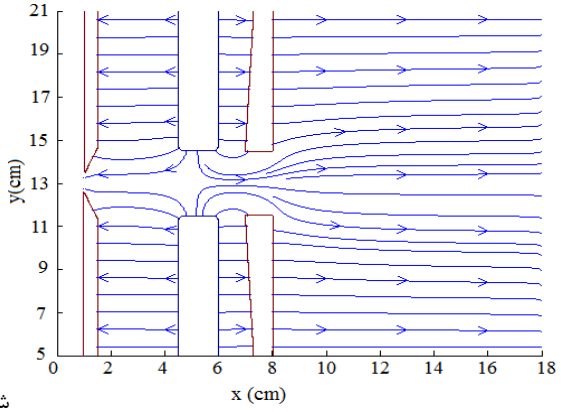
$$\vec{E} = -\vec{\nabla}\varphi \qquad (۲)$$

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]



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



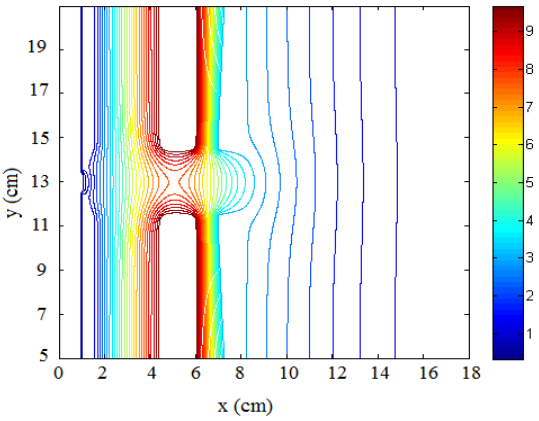
شکل ۳: خطوط میدان الکتریکی درون مجموعه شتاب دهنده و لنز الکترواستاتیک با مشخصات ذکر شده در شکل ۲.

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.

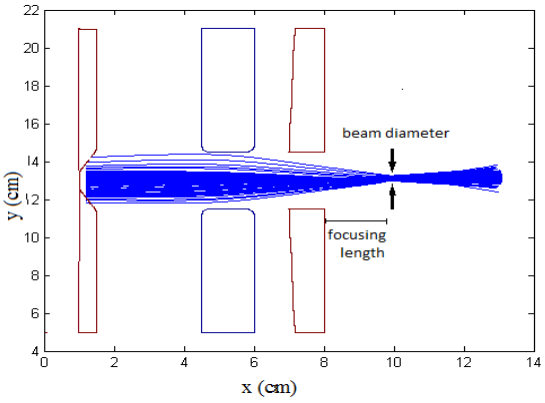
$$\frac{dp}{dt} = -e\left(\vec{E} + \frac{1}{c}\vec{v} \times \vec{B}\right) \qquad (۳)$$

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.

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



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



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

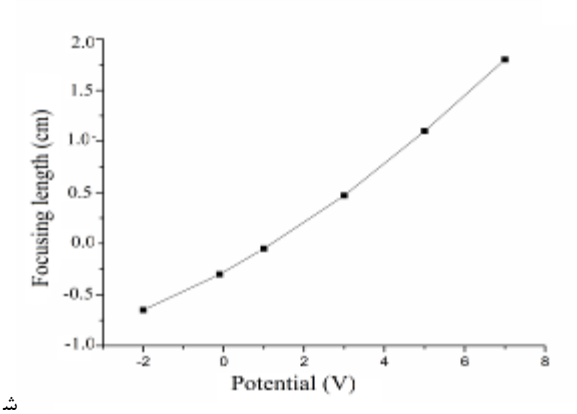
برای حل معادله حرکت از روش رانگ-کوتا مرتبه چهار استفاده کردیم که در آن دینامیک حرکت را برای صد ذره در فاصله ۰٫۸ سانتی متر با سرعت اولیه کاتوره‌ای تابع توزیع ماکسول-بولتزمن مورد بررسی قرار دادیم.

$$f(p) = p^2 \exp(-\frac{p^2}{2m_e kT}) \qquad (۴)$$

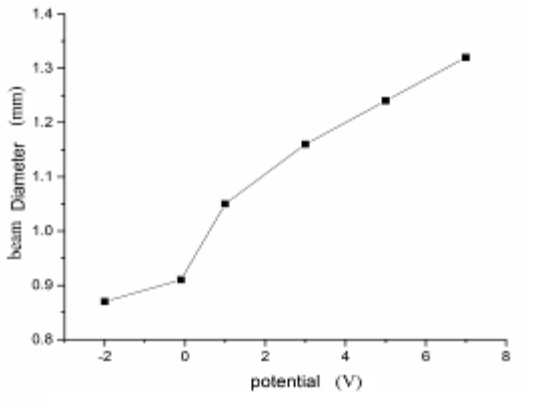
معادله فوق را نرمالیزه کرده و kT را برابر ۱ الکترون ولت قرار می‌دهیم. شکل (۱) نمایی از ابعاد الکترودها و فواصل آن ها را نشان می‌دهد. در این شکل ساختار هندسی اولیه کاتد و آند با توجه به کارهای تحلیلی و تجربی قبلی پیشنهاد شده است ولی در یک روند بهینه سازی مقادیر نهایی برای بهبود کیفیت پرتو الکترونی خروجی 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

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]



شکل ۵: فاصله کانونی بر حسب پتانسیل الکترود نهایی

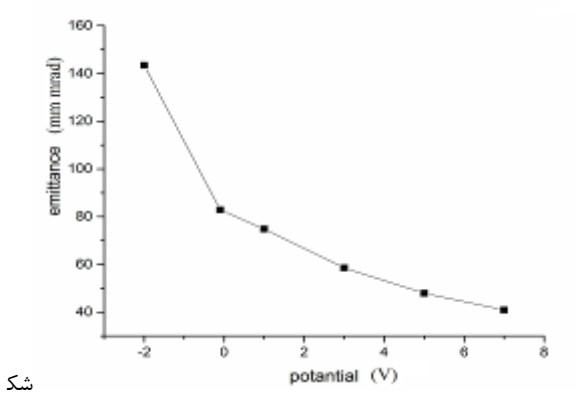


شکل ۶: قطر باریکه در تمرکز بر حسب پتانسیل الکترود نهایی

ولت و زاویه‌ی شیب الکترود ۶۷,۵ درجه قرار دارد. در فاصله‌ی ۳ سانتی متری از کاتد، الکترود شتاب دهنده را در پتانسیل ۱۰ ولت، و در انتها پتانسیل لنز الکترواستاتیک را بین 2- تا ۷ ولت متغییر قرار دادیم. شکل (۳) خطوط میدان الکتریکی در فضای اطراف الکترودها 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 الکترود انتهایی سیستم را بررسی خواهیم کرد.

۳- نتایج عددی

در شکل های (۵) الی (۷) تغییر مشخصات پرتو الکترونی با تغییر پتانسیل الکترود انتهایی ترسیم شده اند. 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



شکل ۷: گسیلندگی بر حسب پتانسیل الکترود نهایی

قطر لکه نیز افزایش می‌یابد تا جایی که در ۷ ولت به ۱,۳ میلیمتر می رسد. 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 الکترود 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.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]