

بررسی اثر زاویه‌ی گسیل و انرژی اولیه در تصویرسازی و رفتار کانونی در مدل شبیه‌سازی یک لنز

روزنه‌ای دو المانی

مقبل‌الحسین، مجتبی^۱؛ هادیان‌پور، زینب^۱؛ قلمبر دزفولی، عبدالمحمد^۱

^۱گروه فیزیک دانشگاه شهید چمران، بلوار گلستان، اهواز

چکیده

در این کار یک لنز روزنه‌ای دو المانی الکتروستاتیک طراحی و شبیه‌سازی شده است. سطوح هم‌پتانسیل، تصویرسازی و رفتار کانونی در این لنز مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین اثر تغییر زاویه‌ی گسیل و فاصله‌ی پرتوها از محور اپتیکی و نیز انرژی اولیه‌ی اشعه در مکان تشکیل تصویر و نقطه‌ی کانونی در آن مورد مطالعه قرار گرفته است.

A Survey of the effects of emission angle and initial energy variations in imaging and focal action of a simulated two element aperture lens

Moghbelalhossein, Mojtaba¹; Hadianpoor, Zeinab¹; Ghalambor Dezfuli, Abdolmohammad¹

¹Shahid Chamran University, Ahwaz

Abstract

A two element electrostatic aperture lens has been designed and simulated in this paper. Equipotential surfaces, imaging and focal action in this lens have been investigated. Moreover the effects of changing emission angle, distance of rays from optical axis and initial energy of beam in imaging and focal action have been studied.

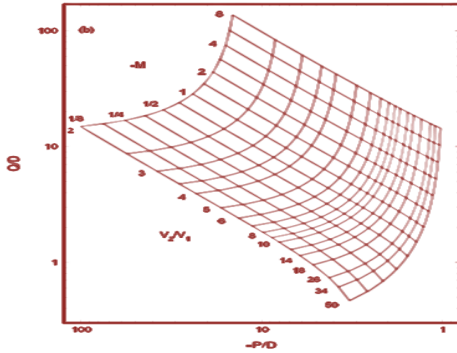
PACS No.

صورت می‌پذیرد. کاربردهای بی‌شمار و بی‌همتای تفنگ‌های الکترونی سبب شده که این ابزارها بیش از پیش مورد توجه و بررسی قرار گیرند. از جمله‌ی کاربردهای آن‌ها می‌توان به استفاده در مطالعات علمی در زمینه‌ی برخورد‌های الکترون-اتم و شتاب‌دهنده‌ها، جوشکاری، دریل‌کاری، ذوب، ساخت قطعات، تبخیر و لایه‌نشانی، استرلیزاسیون، لیتوگرافی و همچنین استفاده در صنعت پزشکی اشاره کرد [۲-۷]. برای جلوگیری از اندرکنش ذرات باردار درون اشعه‌های باردار نظیر اشعه‌های الکترونی تولید و انتقال پرتوها در شرایط خلأ انجام می‌شود. برای انتقال و متمرکز سازی پرتوها در تفنگ‌های الکترونی از لنزهای الکترونی استفاده می‌شود. لنزها از مهمترین اجزاء تفنگ‌های الکترونی و به‌کلی

مقدمه

پیدایش اپتیک الکترونی احتمالاً به سال ۱۹۲۶، هنگامیکه اچ. بوش^۱ نشان داد که تأثیر یک میدان مغناطیسی با تقارن محوری کوتاه بر پرتوهای الکترونی، مشابه با اثر یک لنز شیشه‌ای بر پرتوهای نوری است. تا سال ۱۹۳۹ اپتیک الکترونی پیشرفت سریعی را تجربه کرد که برخاسته از نیازهای مبرم صنعتی مانند میکروسکوپ‌های الکترونی، لوله‌های اشعه‌ی کاتدی و تلویزیون بود [۱]. این شاخه از فیزیک اتمی به تولید پرتوهای الکترونی، انتقال و بررسی رفتار آن‌ها درون میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی می‌پردازد که تمامی این فرآیندها در ابزارهایی به‌نام تفنگ الکترونی

¹ H. Busch



شکل ۱: نمودار P-Q برای لنز روزنه‌ای دو المانی را برای نسبت‌های پتانسیل و بزرگنمایی‌های متفاوت [۸]

طراحی و شبیه‌سازی

لنز روزنه‌ای دو المانی مورد استفاده در این طراحی شامل دو الکتروده به شکل قرص‌هایی با ضخامت 0.2 میلی‌متر و قطر روزنه‌ی 2 میلی‌متر هستند که به صورت هم‌محور در کنار هم قرار داده شده‌اند. در شکل زیر نمای سه بعدی این لنز را که توسط نرم‌افزار طراحی سه‌بعدی Solid Work رسم شده مشاهده می‌کنیم.



شکل ۲: نمای سه‌بعدی لنز روزنه‌ای دو المانی طراحی شده توسط نرم‌افزار Solid Work

در این تحقیق شبیه‌سازی طراحی‌ها توسط نرم‌افزار شبیه‌سازی EBS 2.00 انجام شده است. محاسبات در این نرم‌افزار بر اساس روش تفاضل توزیع صورت می‌گیرد. سطوح هم‌پتانسیل درون لنز روزنه‌ای دو المانی با نسبت پتانسیل $V_2/V_1 = 8$ که در فضای معادله‌ی لاپلاس توسط این نرم‌افزار شبیه‌سازی شده در شکل زیر نشان داده شده است. هر خط رنگی نمایانگر یک سطح هم‌پتانسیل در دو بعد است که مقدار پتانسیل مربوط به هر رنگ سمت راست شکل نشان داده شده است.

سامانه‌های اپتیکی به‌شمار می‌روند. فواصل کانونی، بزرگنمایی و مکان شیء و حتی انرژی پرتوهای ذرات باردار توسط این ابزارها کنترل می‌شوند که به دو دسته‌ی کلی الکتروستاتیک و مغناطیسی تقسیم می‌شوند. از آنجایی که محدود کردن میدان‌های مغناطیسی در فضا تا حدی غیرممکن است هنگام کار با پرتوهای با انرژی پایین که به شدت تحت تأثیر هر میدان خارجی قرار می‌گیرند از لنزهای الکتروستاتیک استفاده می‌شود.

تئوری

در اپتیک الکترونی رابطه‌ی میان فاصله‌ی شعاعی ذرات از محور و شیب مسیر حرکت ذرات رابطه‌ی پیرامحوری است. در سیستم‌های الکتروستاتیکی این رابطه به شکل زیر بیان می‌شود [۸]:

$$\frac{d^2r}{dz^2} + \frac{1}{2} \frac{V'}{V} \frac{dr}{dz} = -\frac{rV''}{4V} \quad (1)$$

رابطه‌ی فوق رابطه‌ی اساسی در اپتیک الکترونی به‌شمار می‌رود و بسیاری از پارامترهای اپتیکی نظیر فواصل کانونی از آن محاسبه می‌شوند. فواصل کانونی در سمت شیء و تصویر (F_1 و F_2) از طریق رابطه‌ی نیوتن [۸]

$$(P - F_1)(Q - F_2) = f_1 f_2 \quad (2)$$

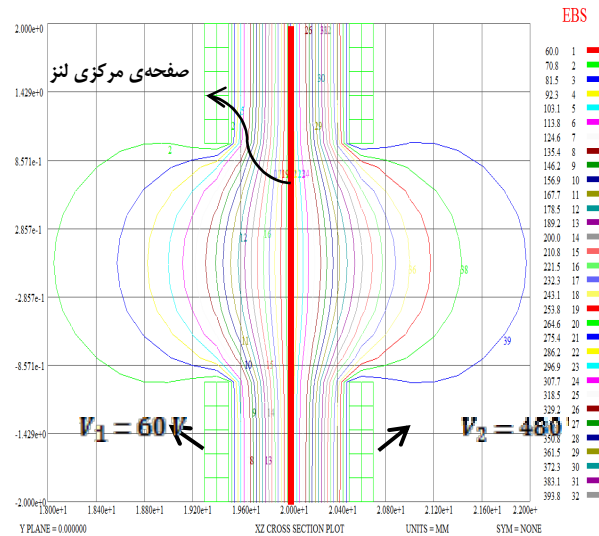
به فواصل شیء (P) و تصویر (Q) و همچنین نیم‌فواصل کانونی شیء و تصویر (f_1 و f_2) مرتبط می‌شوند. این رابطه به صورت معادله‌ی هذلولوی‌های مستطیلی است که در نمودارهای داده‌های مربوط به لنزهای الکتروستاتیک به کرات مشاهده می‌شود. هارتینگ [۲] و رید [۳] داده‌هایی شامل نمودارهای P-Q، نسبت‌های پتانسیل مورد استفاده در لنز و فواصل و نیم‌فواصل کانونی مربوط به هر نسبت پتانسیل برای هر لنز را در کتاب لنزهای الکتروستاتیک ارائه کرده‌اند [۹]. در شکل زیر نمودار P-Q برای لنز روزنه‌ای دو المانی را برای نسبت‌های پتانسیل و بزرگنمایی‌های متفاوت مشاهده می‌کنیم.

² E. Harting

³ F. H. Read

علامت * مربوط به پارامترهایی است که مقادیر آن‌ها توسط نرم‌افزار EBS بهینه شده است. همچنین پارامترهایی که با علامت † مشخص شده‌اند پارامترهایی هستند که مقادیر آن‌ها از داده‌های هارتینگ و رید استخراج شده است [۹].

هنگامی که پرتوها به صورت موازی وارد یک لنز می‌شوند به گونه‌ای لنز را ترک می‌کنند که از نقطه‌ی کانونی دوم لنز عبور کنند. بنابراین با توجه به این نکته برای شبیه‌سازی رفتار کانونی پرتوی الکترونی در این لنز از یک چشمه‌ی ایده‌آل موازی استفاده می‌کنیم. تغییر فاصله‌ی شعاعی پرتوهای الکترونی قبل از ورود به ناحیه‌ی مرکزی لنز بر محل برخورد پرتوها هنگام خروج با محور افقی تأثیر به‌سزایی دارد. این فاصله توسط پارامتر پهنای پرتو در طراحی چشمه‌ی الکترونی موازی کنترل می‌شود. این رفتار را برای لنز روزنه‌ای دو المانی با مشخصات ارائه شده در جدول (۱) در شکل (۵) مشاهده می‌کنیم.



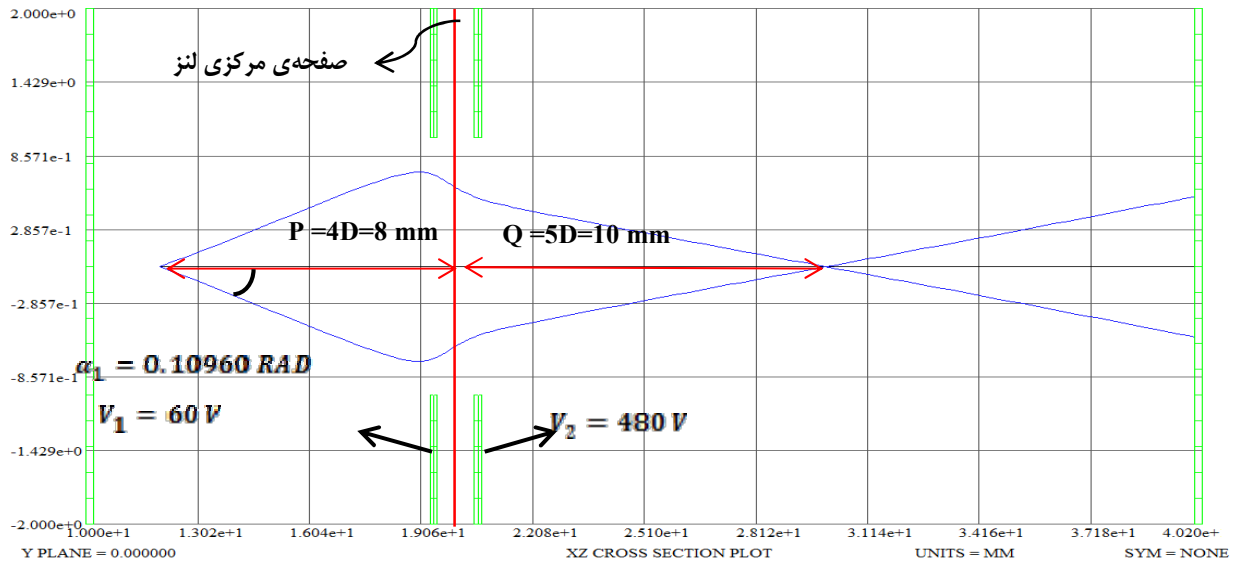
شکل ۳: سطوح هم‌پتانسیل تشکیل شده درون لنز روزنه‌ای دو المانی با نسبت

$$V_2/V_1 = 8$$

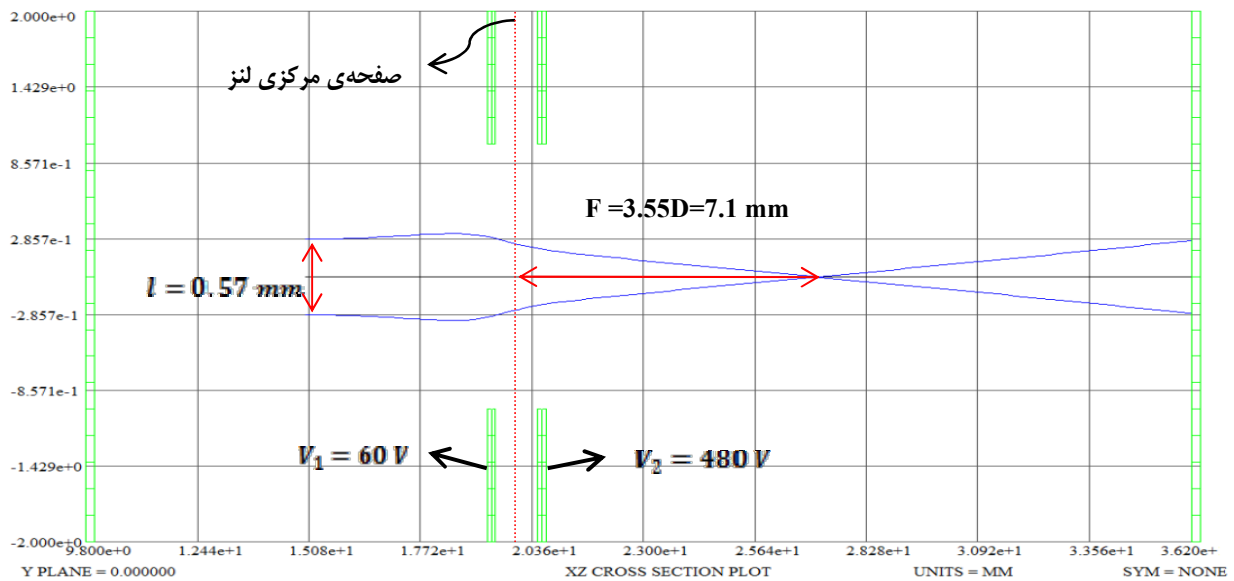
پتانسیل به منظور بررسی مشخصه‌های اپتیکی این لنز تشکیل تصویر یک نقطه از صفحه‌ی شیء بر روی صفحه‌ی تصویر شبیه‌سازی شده است. برای این کار از یک چشمه‌ی نقطه‌ای در محل شیء استفاده شد. در شکل (۴) تصویرسازی توسط یک لنز روزنه‌ای دو المانی با مشخصات ارائه شده در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول (۱) مشخصات مربوط به لنز روزنه‌ای دو المانی

مقادیر	پارامترها
2	قطر روزنه (mm)
0.5	فاصله جدایی المان‌ها (D)
8	V_2/V_1
4	$\dagger P$ (D)
5	$\dagger Q$ (D)
3.55	$\dagger F_2$ (D) نقطه‌ی کانونی
0.10960	زاویه‌ی گسیل* (RAD)
0.57	پهنای پرتو* (mm)
40	انرژی اولیه* (eV)



شکل ۴: شبیه‌سازی تصویرسازی در لنز روزنه‌ای دو المانی در انرژی ۴۰ الکترون ولت توسط نرم‌افزار EBS 2.00

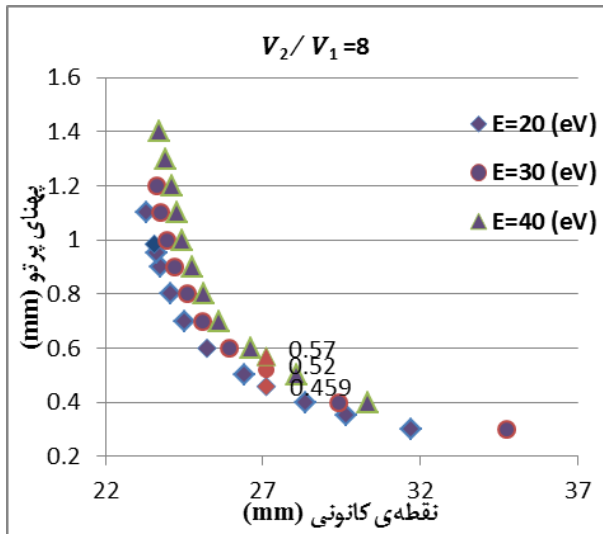


شکل ۵: شبیه‌سازی رفتار کانونی در لنز روزنه‌ای دو المانی در انرژی ۴۰ الکترون ولت توسط نرم‌افزار EBS 2.00

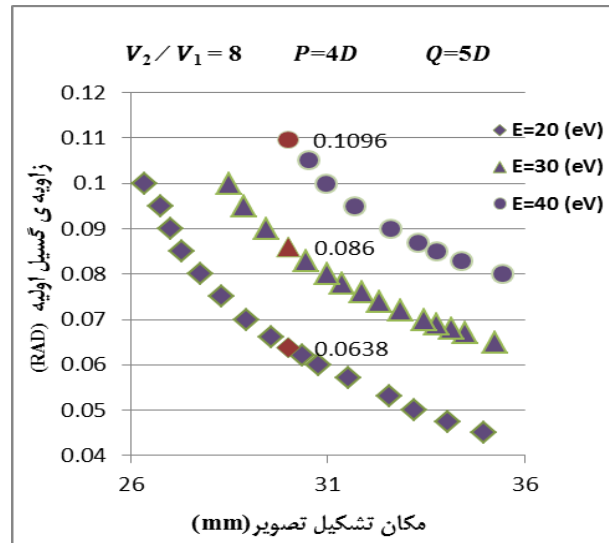
داده‌ها و نتایج

فقط از پرتوهایی که در یک زاویه‌ی مشخص و در رفتار کانونی فقط از پرتوهایی که در یک فاصله‌ی مشخص از محور اپتیکی گسیل می‌شوند استفاده کرده‌ایم که به ازای آن‌ها ابیراهی حذف می‌شود و شیء دقیقاً در صفحه‌ی تصویر و یا در یک نقطه مشخص متمرکز می‌شود. اثر تغییر زاویه‌ی گسیل و انرژی اولیه در لنز روزنه‌ای دو المانی در تصویرسازی در نمودار شکل زیر مورد بررسی قرار گرفته است.

از جمله پارامترهایی که برای چشمه‌ی نقطه‌ای تعریف می‌شود ماکزیمم زاویه‌ی گسیل و انرژی اولیه است. با توجه به تأثیر این پارامترها در ابیراهی‌ها، در تصویرسازی نیز اثر قابل ملاحظه‌ای بر مکان تشکیل تصویر دارند. در این تحقیق در بررسی رفتارهای اپتیکی پرتوهای الکترونی نظیر تصویرسازی و رفتار کانونی این ابیراهی‌ها را حذف کرده‌ایم. برای این منظور در تصویرسازی



شکل ۶: اثر فاصله‌ی پرتوها هنگام ترک چشمه‌ی الکترونی موازی بر مکان نقطه‌ی کانونی (F) برای سه انرژی اولیه‌ی $E = 20 \text{ eV}$ ، $E = 30 \text{ eV}$ و $E = 40 \text{ eV}$. نقاط قرمز رنگ بر روی نمودار محل دقیق تشکیل تصویر در داده‌های ارائه شده در جدول (۱) را نشان می‌دهد.



شکل ۵: اثر زاویه‌ی گسیل اولیه هنگام ترک چشمه‌ی الکترونی نقطه‌ای بر مکان تشکیل تصویر (Q) برای سه انرژی اولیه‌ی $E = 20 \text{ eV}$ ، $E = 30 \text{ eV}$ و $E = 40 \text{ eV}$. نقاط قرمز رنگ بر روی نمودار محل دقیق تشکیل تصویر در داده‌های ارائه شده در جدول (۱) را نشان می‌دهد.

مشابه حالت تشکیل تصویر در اینجا نیز مشاهده می‌کنیم که هر چه پهنای پرتو و در نتیجه فاصله از محور بیشتر می‌شود نیروی وارد بر ذرات بیشتر شده و در فاصله‌ی کمتری نسبت به مرکز لنز محور افقی را قطع می‌کنند. همچنین با افزایش انرژی و در نتیجه سرعت محوری ذرات در یک فاصله‌ی شعاعی یکسان، نقطه‌ی کانونی در مکانی دورتر نسبت به مرکز هندسی تشکیل می‌شود. به عبارتی برای آنکه بخواهیم ذرات با انرژی بالاتر را در نقطه‌ی کانونی دقیق متمرکز کنیم به نیروی بیشتری نیازمندیم و باید فاصله‌ی این ذرات را از محور افقی بیشتر کنیم تا نیروی بیشتری بر آن‌ها وارد شود.

نتیجه‌گیری

در این کار یک لنز روزنه‌ای دو المانی الکتروستاتیک طراحی و شبیه‌سازی شده است. سطوح هم‌پتانسیل تشکیل شده درون لنز، تصویرسازی و رفتار کانونی در این لنز مورد بررسی قرار گرفت. برای اینکه در این بررسی‌ها درگیر ابیراهی‌های موجود در این سیستم‌ها نشویم در تصویرسازی پرتوها فقط در یک زاویه‌ی گسیل مشخص وارد فضای لنزها شدیم. مقدار این زاویه توسط نرم‌افزار

همانطور که در نمودار فوق مشاهده می‌کنیم هر چه زاویه‌ی گسیل اولیه بیشتر باشد تصویر در مکان نزدیکتری به مرکز لنز تشکیل می‌شود. با توجه به اینکه نیروی وارد شده بر ذرات در نواحی مرکزی لنز متناسب با فاصله‌ی ذره از محور افقی است می‌توان نتیجه گرفت که برای زوایای بزرگتر و در نتیجه فواصل شعاعی بیشتر این نیرو قوی‌تر بوده و پرتو در فواصل کمتری از مرکز لنز محور افقی را قطع می‌کند.

هرچه مقدار انرژی اولیه‌ی ذرات بیشتر می‌شود تصویر در مکان دورتری از مرکز تشکیل می‌شود. با افزایش انرژی ذرات سرعت محوری ذرات بیشتر می‌شود و در نتیجه ذرات در فواصل شعاعی کمتری قرار خواهند گرفت و به دلیل بالابودن سرعت، زمان کمتری در معرض نیرو قرار می‌گیرند و در نتیجه در فواصل دورتر از مرکز محور افقی را قطع می‌کنند. همچنین اثر تغییر فاصله‌ی گسیل پرتوها از چشمه‌ی موازی و نیز انرژی اولیه‌ی آن‌ها در این لنز در رفتار کانونی پرتوها هنگام خروج از لنز بررسی شده که در نمودار شکل زیر ارائه شده است.

به‌گونه‌ای بهینه شد که شیء دقیقاً در محل به‌دست آمده از محاسبات ثوری و داده‌های ارائه شده برای این لنزها تصویر شود. در بررسی رفتار کانونی پرتوها در لنزها نیز پرتوها فقط در یک فاصله‌ی مشخص نسبت به محور اپتیکی به این سامانه‌ها تزریق شدند که مقدار این فاصله نیز توسط نرم‌افزار به‌گونه‌ای بهینه شد که پرتوها دقیقاً در نقطه‌ی کانونی استخراج شده از داده‌های موجود با محور اپتیکی برخورد کنند. همچنین اثر تغییر زاویه‌ی گسیل و فاصله از محور و نیز انرژی اولیه‌ی پرتوها هنگام ورود به فضای درون لنزها در مکان تشکیل تصویر و نقطه‌ی کانونی برای لنز روزنه‌ای دو المانی مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده شد که هرچه فاصله و یا زاویه‌ی گسیل اولیه بیشتر شود محل تشکیل تصویر و نقطه‌ی کانونی بر روی محور به سمت جلو انتقال می‌یابد. از طرفی هر چه انرژی اولیه‌ی ذرات بیشتر باشد پرتوها در فاصله‌ی بیشتری نسبت به مرکز هندسی لنزها محور اپتیکی را قطع می‌کنند.

مرجع‌ها

- [1] M. Reiser, "Theory and Design of Charged Particle Beams," Wiley. (2008) 4.
- [2] M. Suga et al., "The Atmospheric Scanning Electron Microscope with open sample space observes dynamic phenomena in liquid or gas," *Ultramicroscopy*, **111**, (2011) 1650-1658.
- [3] Y. Peng et al., "Beam quality test technology and devices of electron beam welding," *Vacuum*, **86**, (2011) 261-266.
- [4] W. Lu et al., "Scan Strategy in Electron Beam Selective Melting," *Tsinghua Science & Technology*, **14**, (2009) 120-126.
- [5] K.-H. Leitz et al., "Numerical Simulation of Drilling with Pulsed Beams," *Physics Procedia*, **39**, (2012) 881-892.
- [6] S. Urano et al., "Electron Beam Sterilization System," *Technical Review*, **40**, (2003) 282-285.
- [7] R. Elkeles, "Computed tomography imaging, coronary calcium and atherosclerosis," *Expert review of cardiovascular therapy*, **6**, (2008) 1083-1093.
- [8] D. W. O. Heddle, "Electrostatic Lens Systems," Taylor & Francis. (2010) 13-14.
- [9] E. Harting and F. H. Read., "Electrostatic lenses," Elsevier Scientific Pub. Co. (1976).