بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۴-۱۲ 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

# اندازه‌گیری انرژی باریکه شتابدهنده رودترون با استفاده از لیزر He-Ne و لایه اپتیکی

محسن عسکربیوکی[۱و۲]، دکتر محمود برهانی زرندی[۱]، دکتر سید پژمان شیرمردی[۲]، دکتر مهدی شریفیان[۱]

[۱]گروه اتمی و مولکولی، دانشکده فیزیک، پردیس علوم، دانشگاه یزد، یزد

[۲]مجتمع پژوهشی ایران مرکزی (یزد)، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای

**چکیده - در این تحقیق امکان اندازه‌گیری انرژی باریکه الکترونی شتابدهنده رودترون با استفاده از لیزر *He-Ne* و همچنین لایه اپتیکی نشان داده می‌شود. اساس اندازه‌گیری در این روش بر مبنای استفاده از مدل توزیع دز-عمق است. نمودار توزیع دز-عمق ناشی از پرتودهی لایه‌ی اپتیکی با استفاده از لیزر *He-Ne* با طول‌موج *632.8 nm* و با توان *5mW* اندازه‌گیری شد. نتایج تجربی و مقایسه آن با نتایج شبیه‌سازی نرم‌افزار *MCNP* نشان می‌دهد که این روش را می‌توان جایگزین روش‌های مرسوم نمود.**

کلید واژه- : انرژی باریکه الکترونی، شتابدهنده الکترون، لایه اپتیکی، لیزر He-Ne.

# Measurement of Rhodotron Accelerator Beam Energy using He-Ne Laser and Optical Lamina

M. Askarbioki[1,2], M. B. Zarandi[1], S. P. Shirmardi[2], M. Sharifian[1]

[1]Atomic & Molecular Group, Department of Science, Physics Factually, Yazd University, Yazd

[2]Central Iran Research Complex, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Yazd, Iran

Abstract- In this research, energy measurement of the Rhodotron accelerator by use of He-Ne and optical lamina is presented. Method used based on depth- dose distribution inside the glass optical layer induced by irradiation. Estimation of the energy distribution inside the glass is estimated by 5 mW He-Ne laser and z-scan set-up. Experimental results show ordinary methods of electron beam energy measurement can be replaced by this quick and on line measurement techniques.

Keywords: Electron Beam Energy, Electron Accelerator, Optical Lamina, He-Ne Laser.

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-11-14 ]



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

## ۱- مقدمه

برای اندازه‌گیری انرژی باریکه الکترون راه‌های گوناگونی وجود دارد [۱]. به طور معمول اساس این روش‌ها مبتنی‌بر به‌کارگیری پارامترهای فرایندهای هسته‌ای است که عبارتند از:

۱- استفاده از روش فعال‌سازی الکترون؛ در این روش انرژی الکترون با مقدار انرژی آستانه یک برهمکنش هسته‌ای سنجیده می‌شود و به عبارتی شروع برهمکنش هسته‌ای مورد نظر به‌معنای رسیدن انرژی باریکه به یک مقدار معین است [۲]. استفاده از این روش برای اندازه‌گیری انرژی الکترونها بسیار نادر است.

۲- روش استفاده از میدان‌های مغناطیسی کوک‌پذیر و اندازه‌گیری شعاع انحراف باریکه؛ در این روش باریکه الکترونی و یونی تحت تاثیر میدان مغناطیسی کوک‌پذیر قرار می‌گیرند و از راستای اولیه منحرف می‌شوند. میزان جابجایی با شدت میدان مغناطیسی اعمالی و همچنین انرژی باریکه متناسب است[۳].

امروزه استفاده از این روش برای اندازه‌گیری انرژی باریکه-های الکترونی به دلیل لزوم دستکاری روی آنها بسیار محدود است ولی برای اندازه‌گیری طیف انرژی ذرات باردار پلاسما هم اکنون رایج اند [۴].

۳- روش بررسی توزیع بار- عمق؛ در این گونه تحقیقات پژوهشگران با استفاده از توزیع فضایی یک بعدی جریان الکتریکی در عمق رسانای در حال پرتودهی انرژی باریکه الکترونی فرودی را اندازه‌گیری می‌کنند [۱, ۵]. مشکل عمده این طرح لزوم قرائت همزمان جریان الکتریکی بسیار کم در حد چند نانوآمپر و حفظ خلاء دربرگیرنده رسانا است.

۴-روش بررسی طول‌موج فوتون پراکنده شده کامپتون ناشی از برهمکنش باریکه لیزری با باریکه یونی و یا الکترونی؛ این روش اخیرا پایه گذاری شده و برای قرائت همزمان انرژی بسیار مناسب است [۶]. استفاده از آن برای قرائت انرژی‌های بزرگ در حدود چند GeV کاربردی است و همه بازه‌های انرژی را در بر نمی‌گیرد [۷].

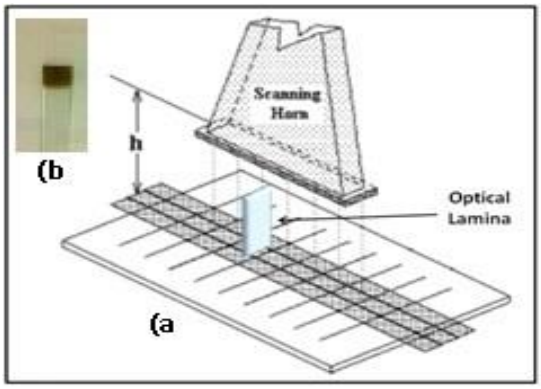
۵- استفاده از مدل توزیع دز-عمق که در آن از مقدار نفوذ الکترون در ماده معین، انرژی الکترون برآورد می‌شود [۸-۱۰]. این روش بسیار مرسوم و دقیق است و امروزه به مراتب از آن استفاده می‌شود. این روش برای اندازه‌گیری انرژی باریکه یونی و نوترونی نیز به کار می‌رود [۱۱, ۱۲] و استانداردهای بین المللی پرتودهی بر اساس آن تعریف شده است [۱۳]. هرچند این روش‌ها مرسوم اند اما بسیار پر هزینه و زمان‌بر اند.

در این مقاله از مدل استاندارد توزیع دز- عمق برای اندازه گیری انرژی الکترون‌ها با صرف هزینه کم و زمان اندک استفاده شده است.

## ۲- روش کار

سیلیس و ترکیبات آن مانند شیشه، بلور کوارتز و امثال آنها موادی هستند که در اثر پرتودهی الکترون خواص اپتیکی جدیدی به دست می‌آورند. مهمترین خاصیت اپتیکی این ترکیبات که در اثر پرتودهی تغییر می‌کند، تغییر ضریب جذب آنها ناشی از تشکیل مراکز رنگ است [۱۴].

اگر با توجه به شکل۱ یک لایه اپتیکی از جنس سیلیس (مثل شیشه) با ابعاد $3\times20\times100\ mm^3$ را در برابر باریکه الکترونی با انرژی تقریبا 10 MeV قرار دهیم، رنگ شیشه و طبعاً ضریب جذب آن تغییر خواهد کرد.



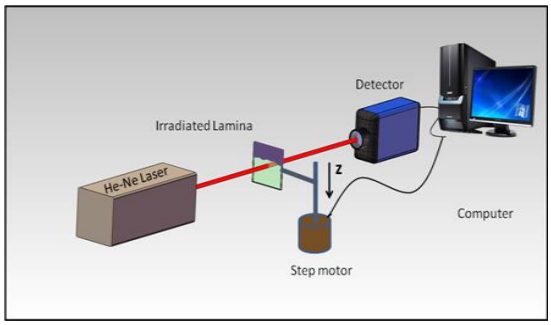

شکل ۱: a) نحوه قرار گرفتن لایه اپتیکی برای پرتودهی. b) تغییر رنگ شیشه در اثر پرتودهی.

همانطور که در شکل ۱-b) مشاهده می شود، شیشه در اثر پرتودهی تغییر رنگ داده ولی این تغییر رنگ عمیق نیست و دز تابشی در عمق مشخصی از ماده نفوذ کرده است. این تغییر رنگ که بیانگر تغییرات جذب ماده است، به راحتی توسط لیزر مرئی He-Ne با طول موج 632.8 nm قابل قرائت است.



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

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-11-14 ]




شکل۲: قرائت جذب لایه پرتودهی در عمق با استفاده از لیزر He-Ne به روش Z-Scan.

در شکل۲، تیغه شیشه‌ای از محل پرتودهی و به روش Z-Scan و در راستای پرتودهی قرائت می‌شود. در این قرائت، به سبب میزان دز دریافتی، تغییرات ضریب جذب اندازه‌گیری می‌گردد که در واقع همان عمق نفوذ باریکه است [۱۵].

## ۳- شبیه سازی دز-عمق با نرم‌افزار MCNP

برای آنکه در نهایت بتوان از اعداد تجربی بدست آمده به درستی برای تعیین انرژی باریکه استفاده کرد لازم است داده های تجربی را با مقادیر حاصل از شبیه‌سازی نظری مقایسه کرد. بدین منظور نفوذ دز دریافتی حاصل از باریکه الکترونی 9.5 MeV در یک لامین واقعی با درصد عناصر ذیل در نرم افزار MCNP شبیه سازی شد.

جدول ۱: درصد عناصر به کاررفته در لامین اندازه‌گیر.

**Room Temperature Density Calculation of Silicate Glasses**

Alexander Fluegel: "Global Model for Calculating Room-Temperature Glass Density from the Composition"
http://glassproperties.com ; J. Am. Ceram. Soc., vol. 90, no. 8, August 2008, p 2622-2625.

***Program help and instructions:***
Enter the glass composition of interest in the green marked cells.
The program estimates the density in the yellow marked cell
Model application limits are evaluated by the program.

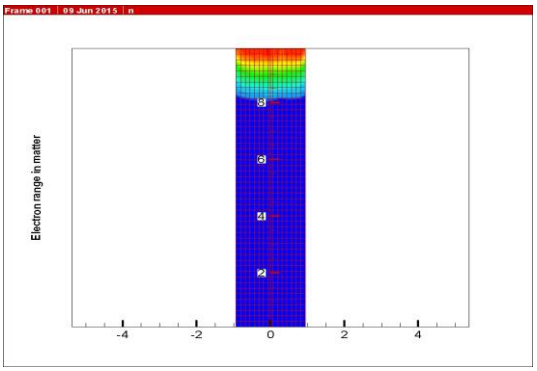
| Concentrations in wt% | |
|---|---|
| $SiO_2$ | 76/000 |
| $Na_2O$ | 11/000 |
| $K_2O$ | 1/000 |
| MgO | 1/000 |
| CaO | 10/000 |
| $Al_2O_3$ | 1/000 |
| $B_2O_3$ | 0/000 |
| $Li_2O$ | 0/000 |
| PbO | 0/000 |
| $TiO_2$ | 0/000 |

| | |
|---|---|
| Density at room temperature: | 2/46925 g/cm³ |
| Model sensitivity: | 0/00072 g/cm³ |
| Confidence interval in mass production: | 0/00802 g/cm³ |
| Error confidence level: | 95 % |

| Statistical information | |
|---|---|
| $t_{0.05,DF}$ = | 1/9603225 |
| $F_{0.05,DF}$ = | 1/2446402 |
| Number of data = | 6719 |
| Degree of freedom = | 6618 |

| Concentrations in mol% | |
|---|---|
| $SiO_2$ | 75/927 |
| $Na_2O$ | 10/653 |
| $K_2O$ | 0/637 |
| MgO | 1/489 |
| CaO | 10/704 |
| $Al_2O_3$ | 0/589 |
| $B_2O_3$ | 0/000 |
| $Li_2O$ | 0/000 |
| PbO | 0/000 |
| $TiO_2$ | 0/000 |

لامین سیلیکاتی برای دریافت دز باریکه الکترونی دارای ابعادی به اندازه $3\times20\times100\,mm^3$ است. در شکل۳ نحوه توزیع دز دریافتی در این نمونه با انرژی باریکه الکترونی 9.5 MeV و چگالی جریان 100 mA شبیه سازی شده است.

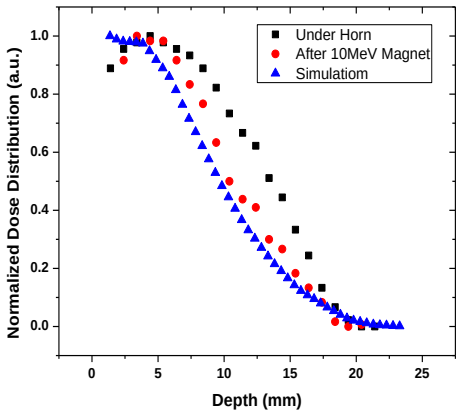



شکل۳: شبیه سازی دز دریافتی باریکه الکترونی با انرژی 9.5 MeV و چگالی جریان 100 mAبا استفاده از نرم افزار MCNP.

همانطور که در شکل۳ مشاهده می‌شود، اگر لامین را به صورت کاملا عمودی در زیر پرتودهی باریکه پرانرژی الکترونی با مشخصات انرژی فرودی E=9.5 MeV و همچنین جریان i=100 mA و سطح مقطع دایره‌ای یکنواخت با شعاع r=2.5 cm قرار دهیم، تا عمق تقریبی 21.3 mm از لبه ورودی لامین نفوذ دز خواهیم داشت. این نمودار دو بعدی با آنچه که در نمونه واقعی شکل ۱-b) نشان داده شده تطابق دارد.

## ۴- نتایج تجربی

اگر توزیع دز-عمق را در راستای فرود باریکه الکترونی در نمونه سیلیکاتی با استفاده از مفرضات قبلی و داده‌های نرم افزار MCNP شبیه‌سازی کنیم، نمودار ذیل بدست می‌آید.




شکل۴: نمودار تجربی توزیع دز-عمق بدست آمده برای لایه اپتیکی شیشه‌ای زیر Horn شتابدهنده رودترون (■) با دز اولیه 10 kGy، جلوی مگنت 10 MeV شتابدهنده رودترون (●) با دز اولیه 12 kGy و شبیه سازی توزیع دز-عمق باریکه الکترونی با انرژی 9.5 MeV با دز اولیه 20 kGy در نمونه سیلیکاتی با استفاده از نرم افزار MCNP (▲).



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

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-11-14 ]

همانطور که در شکل۴ مشاهده می‌شود، نتایج شبیه سازی (▲) تطابق نسبتا خوبی با نتایج تجربی (■ و ●) دارد. در این نمودار عمق نفوذ باریکه با انرژی E=9.5 MeV مقدار تقریبی 21.3 mm است. نهایتا نتیجه می‌گیریم که انرژی باریکه شتابدهنده رودترون با مقدار اسمی شناخته شده E=10 MeV، همواره این مقدار نیست و این مطلب در گزارشهای پژوهشگران دیگر نیز آمده است [۱۶].

همچنین این نمودار تایید کننده روش تجربی است که برای اندازه‌گیری انرژی باریکه الکترونی شتابدهنده رودترون انتخاب شده است. البته دو نمودار تجربی و نظری کاملا شبیه هم نیستند که باید این چنین باشد؛ چراکه در مقام تجربه بسیاری از پارامترها و شرایط محیطی وجود دارند که اعمال هرکدام از آنها در نرم افزار یا غیرممکن و یا بسیار دشوار است.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش انواع راه‌های اندازه‌گیری انرژی الکترون بیان شد. اندازه‌گیری انرژی الکترون بر اساس منحنی توزیع دز-عمق، مرسوم‌ترین روش برای اندازه‌گیری در حال حاضر است. اما بارزترین نقیصه، هزینه و زمان‌بر بودن آنها است. در این تحقیق سعی شد روش استانداردی مبتنی بر بررسی منحنی توزیع دز-عمق به کار برده شود با این تفاوت که در این روش انرژی باریکه الکترونی به صورت سریع و کم‌هزینه قرائت می‌شود. میزان خطای این روش بر اساس دقت حرکت موتور پله‌ای (0.1 mm) و روابط تجربی استاندارد [۱۳]، $\Delta E = 0.47\ MeV$ خواهد بود. نهایتا نتیجه گرفته شد که انرژی باریکه شتابدهنده رودترون که با انرژی اسمی E=10 MeV شناخته می‌شود همواره این مقدار نیست. دلیل آن نیز شرایط محیطی بعد از خروجی این شتابدهنده است.

## سپاسگزاری

در پایان مولفین از همکاری صمیمانه پرسنل بخش‌های مختلف مجتمع پژوهشی ایران مرکزی (یزد) در انجام این پژوهش تشکر و قدردانی می‌نمایند.

## مراجع

[1] P. Fuochi, M. Lavalle, A. Martelli, U. Corda, A. Kovacs, P. Hargittai, and K. Mehta, "Electron energy device for process control," Radiation Physics and Chemistry, Vol 67, pp. 593-598, 2003.
[2] E. Aird, "Physics of Electron Beam Therapy: Medical Physics Handbooks 13," IOP Publishing, 1985).
[3] Z. Zagórski, "Dependence of depth-dose curves on the energy spectrum of 5 to 13 MeV electron beams," Radiation Physics and Chemistry, Vol. 22, pp. 409-418, 1983.
[4] S. Golubev, I. Izotov, D. Mansfeld, and V. Semenov, "Experimental electron energy distribution function investigation at initial stage of electron cyclotron resonance dischargea," Review of Scientific Instruments 83, 02B504, 2012.
[5] P. Fuochi, M. Lavalle, A. Martelli, U. Corda, A. Kovacs, P. Hargittai, and K. Mehta, "Energy device for monitoring 4–10MeV industrial electron accelerators," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Vol. pp. 546, 385-390, 2005.
[6] E. Abakumova, M. Achasov, H. Dong, H. Qu, A. Krasnov, A. Kosarev, N. Muchnoi, E. Pyata, Q. Xiao, and X. Mo, "Vacuum chamber for the measurement system of the beam energy," Physics Procedia, Vol 32, pp. 753-756, 2012.
[7] J. Zhang, E. Abakumova, M. Achasov, V. Blinov, X. Cai, H. Dong, C. Fu, F. Harris, V. Kaminsky, and A. Krasnov, "The beam energy measurement system for the Beijing electron-positron collider," Nuclear Physics B-Proceedings Supplements, Vol. 225, pp. 309-314, 2012.
[8] A. Subiel, V. Moskvin, G. H. Welsh, S. Cipiccia, D. Reboredo, P. Evans, M. Partridge, C. DesRosiers, M. P. Anania, and A. Cianchi, "Dosimetry of very high energy electrons, VHEE) for radiotherapy applications: using radiochromic film measurements and Monte Carlo simulations," Physics in medicine and biology, Vol. 59, pp. 5811, 2014.
[9] J. Warman, M. De Haas, L. Luthjens, and M. Hom, "High-energy radiation monitoring based on radio-fluorogenic co-polymerization III: Fluorescent images of the cross-section and depth-dose profile of a 3MV electronbeam," Radiation Physics and Chemistry, Vol. 84, pp. 129-135, 2013.
[10] M. Cleland, R. Galloway, F. Genin, and M. Lindholm, "The use of dose and charge distributions in electron beam processing," Radiation Physics and Chemistry, Vol. 63, pp. 729-733, 2002.
[11] C. Kurz, A. Mairani, and K. Parodi, "First experimental-based characterization of oxygen ion beam depth dose distributions at the Heidelberg Ion-Beam Therapy Center," Physics in medicine and biology, Vol. 57, pp. 5017, 2012.
[12] W. S. Snyder, and J. Neufeld, "Calculated depth dose curves in tissue for broad beams of fast neutrons," The British journal of radiology, Vol. 28, pp. 342-350, 1955.
[13] ASTM51649, Practice for Dosimetry in an Electron Beam Facility for Radiation Processing at Energies Between 300 keV and 25 MeV, Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA, USA, 2008.
[14] K. S. Alshammari, "Characterization of MCP-200, MCP-150 and MCP-137 alloys for their use in radiations in shielding and protection," 2016.
[15] S. V. Nablo, "Electron-beam irradiation sterilization process,", Google Patents, 1987.
[16] A. M. Pousaleh and et. al, "Design And Construction Of The First Iranian Powerful Industrial Electron Accelerator," in The first National Conference Accelerators and Their Applications (Amirkabir University, Tehran, Iran), pp. 1-4, 2013.



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

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-11-14 ]