

## امکان سنجی ساخت حسگر نوری جهت اندازه گیری انرژی ذرات باردار شتابدهنده

محسن عسکریبویکی<sup>۱\*</sup>، علی محمد پورصالح<sup>۱</sup>، عباس بهجت<sup>۲</sup>

محمد عاطفی<sup>۱</sup>، محمدحسن منصوری فرد<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>سازمان انرژی اتمی ایران، معاونت توسعه کاربرد پرتوها، مجتمع پژوهشی کاربرد پرتوهای یزد

<sup>۲</sup>گروه فیزیک اتمی و ملکولی، دانشکده فیزیک، مجتمع علوم پایه، دانشگاه یزد

### چکیده:

تابش باریکه های الکترونی و یونی بر روی مواد باعث تغییر خواص اپتیکی از جمله ضریب جذب آنها می شود. بنابراین خواص اپتیکی مواد می توانند ابزاری مناسب برای مشخصه یابی از خصوصیات کمی و کیفی باریکه های الکترونی باشند. این تحقیق تغییرات ضریب جذب لایه اپتیکی مخصوص دز خورده را با استفاده از روش اسپکتروسکوپی دمش-گمانه دنبال می کند. در طراحی برپا شده، یک لامپ التهابی به عنوان چشمه نوری دمش و یک لیزر He-Ne به عنوان چشمه نوری گمانه به کار می رود. سپس تغییرات ضریب جذب لایه اپتیکی ناشی از تحریک القایی لامپ التهابی با استفاده از اندازه گیری توان عبوری لیزر He-Ne بررسی می شود. بررسی این تغییرات ما را به ساخت حسگر نوری انرژی شتابدهنده الکترونی رهنمون می سازد.

**کلید واژه:** باریکه الکترونی، شتابدهنده، دز دریافتی، ضریب جذب، لایه اپتیکی، روش دمش-گمانه.

### مقدمه:

امروزه استفاده از باریکه های الکترونی در زمینه های گوناگون تحقیقاتی، صنعتی و پزشکی در حال توسعه است [۱-۳]. باریکه های الکترونی دارای مشخصه های مهمی همچون شدت، عمق نفوذ (انرژی باریکه)، نمایه فضایی و نمایه زمانی هستند. هر کدام از این مشخصه ها در جای خود بیانگر کمیت و کیفیت باریکه اند. یکی از این مشخصه های مهم، عمق نفوذ الکترون یا همان انرژی باریکه است. برای اندازه گیری عمق نفوذ روشهای گوناگونی وجود دارد. معمول ترین این روشها استفاده از فیلمهای دزیمتری است که در داخل یک گوه فلزی یا عایق قرار می گیرند و با توجه به نحوه توزیع دز دریافتی شان و جنس گوه، انرژی باریکه را بدست می دهند [۴، ۵]. هر چند این روش مناسب و دقیق است اما اندازه گیری آن به صورت همزمان امکان پذیر نیست. روش دیگر استفاده از اسکنرهای مشبک است، به طوریکه چند سیم رسانا به صورت موازی و عمود بر تابش شتابدهنده قرار می گیرند [۶]. هر قدر باریکه الکترونی انرژی بیشتری داشته باشد، سیمهای زیرین جریان بیشتری را نشان می دهند. این روش حتی برای اسکن باریکه اشعه X نیز کاربرد دارد [۷]. اما این روش نیز به علت حضور باریکه الکترونی در تمام محیط و اثر گذاری بر روی کابل انتقال داده ها دارای خطا و نویز است. علاوه بر این مشکل باید مدارهای ADC (Analog to Digital Converter) نیز طراحی کرد تا داده های آنالوگ به صورت دیجیتال قرائت شوند که



با توجه به کثرت سیمها این عمل هزینه‌بر و دشوار است. روش جدیدی که ارائه می‌دهیم، استفاده از باریکه لیزری و ماده فعال اپتیکی برای اندازه‌گیری عمق نفوذ الکترون است. امروزه استفاده از روشهای اپتیکی برای مشخصه‌یابی از باریکه‌های الکترونی به سرعت در حال گسترش است [۸-۱۰]. حتی استفاده از این تکنولوژی یعنی ترکیب شاخه‌های فیزیک اتمی و هسته‌ای به عنوان موضوعات برگزیده فیزیک محسوب می‌شوند [۱۱]. دلیل آن این است که باریکه‌های نور لیزری ویژگیهای منحصر بفردی مانند قطبش، تکانه خطی فوتونی، همگرایی زاویه‌ای، شدت نسبتاً پایدار، تک بسامدی و کوک پذیر بودن طول موج دارند و به تغییر خواص اپتیکی به شدت حساس‌اند. بنابراین می‌توان از این ویژگی حساسیت باریکه نوری به عنوان سنجه‌ای برای اندازه‌گیری خصوصیات باریکه‌های الکترونی استفاده کرد. در این مقاله سعی کرده‌ایم تا امکان دستیابی به ساخت حسگر نوری انرژی باریکه‌های الکترونی را نشان دهیم. اساس کار این حسگر استفاده از روش اسپکتروسکوپی دمش-گمانه (Pump-Probe Spectroscopy) است [۱۳, ۱۴].

### روش کار:

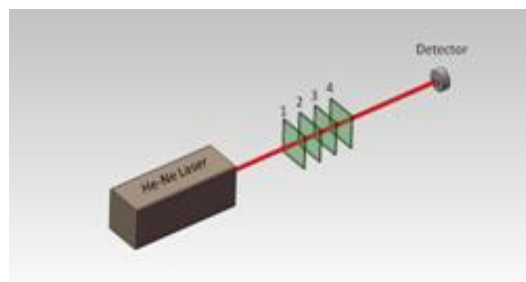
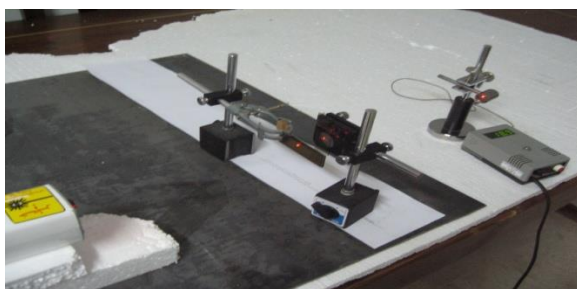
ضریب جذب کمیت اپتیکی است که بیانگر میرایی امواج الکترومغناطیس عبوری از محیطها مختلف است. مقدار توان خروجی موج الکترومغناطیس از یک محیط مشخص به طول  $x$ ، از رابطه (۱):

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad (1)$$

بدست می‌آید [۱۵]. که  $I_0$  شدت فرودی اولیه موج الکترومغناطیس،  $\alpha$  ضریب جذب و  $x$  ضخامت ماده و به عبارتی همان طول راه نوری عبوری موج داخل ماده است. ضریب جذب،  $\alpha$ ، به طول موج پرتو فرودی و همچنین جنس ماده وابسته است. بیشتر دستگاه‌های اسپکتروسکوپی، جذب ماده را نشان می‌دهند نه ضریب جذب در حالیکه ضریب جذب به عنوان مشخصه اپتیکی ماده معتبر است و روش‌های گوناگونی برای اندازه‌گیری آن وجود دارد [۱۶]. رابطه ضریب جذب با انرژی الکترون‌ها [۱۷] بدین صورت است:

$$\alpha = \frac{E}{\hbar} \sqrt{\frac{\mu \varepsilon}{2}} \left\{ \sqrt{1 + \left( \frac{\hbar \sigma}{E \varepsilon} \right)^2} - 1 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

که  $E$  انرژی باریکه الکترونی،  $\varepsilon$  و  $\mu$  ضریب دی الکتریک و تراوایی مغناطیسی ماده،  $\hbar$  ثابت پلانک و  $\sigma$  رسانندگی ماده است. در این تحقیق از ساده‌ترین روش یعنی بررسی تغییرات توان در اثر افزایش ضخامت استفاده کردیم (شکل ۲ را ببینید).



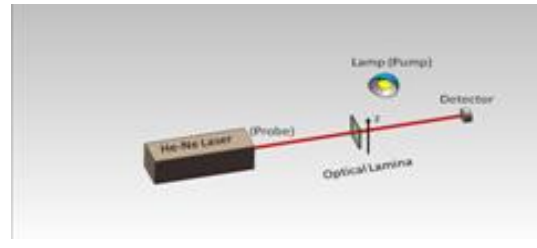
شکل ۲-الف: تصویر روش اندازه‌گیری ضریب جذب. شکل ۲-ب: نمای تجربی اندازه‌گیری ضریب جذب. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، لایه‌های اپتیکی یکسان با ضخامت برابر و معین به ترتیب در مقابل باریکه لیزری قرار می‌گیرند. با قرار گرفتن هر یک در برابر باریکه لیزری شدت نمایشی آشکارساز به صورت غیرخطی تغییر می‌کند. این تغییرات وابسته به ضریب جذب و زاویه تابش است. برای از بین بردن اثر زاویه تابش می‌توان از چینش اپتیکی مناسب استفاده کرد و حالت‌های عمود تابش ( $\theta = 0$ ) را بوجود آورد. با ثابت کردن زاویه تابش فقط ضریب جذب بر روی توان خروجی اثر گذار است. بنابراین با استفاده از رابطه (۱) داریم:

$$-\log\left(\frac{I}{I_0}\right) = \alpha x \quad (3)$$

از رابطه (۳) مشخص است که اگر شیب تغییرات،  $-\log\left(\frac{I}{I_0}\right)$ ، را بر حسب تغییرات ضخامت  $x$  بدست آوریم، می‌توانیم ضریب جذب ماده،  $\alpha$ ، را اندازه بگیریم. البته این ضریب جذب برای طول موج لیزری He-Ne معتبر است و برای طول موج‌های دیگر نیاز به چشم‌های لیزری با طول موج‌های مختلف است. اگر این لایه‌های اپتیکی تحت تابش الکترونی قرار بگیرند به اصطلاح به ترازهای بالاتر انرژی پمپ می‌شوند و خواص اپتیکی و از جمله ضریب جذبشان تغییر می‌کند [۱۵]. این ضریب جذب به راحتی توسط روش شکل ۲ قابل اندازه‌گیری است. از طرفی این لایه‌های تابش دیده الکترونی می‌توانند توسط اختلال میدان‌های الکترومغناطیس خارجی به حالت پایه بازگردند و ضریب جذبشان به حالت اولیه تغییر یابد (شبهه روشهای اسپکتروسکوپی EPR و ESR). این تغییرات ضریب جذب را نیز می‌توان با استفاده از روش اسپکتروسکوپی دمش-گمانه بررسی کرد. در این روش از یک چشمه نوری به عنوان پمپ (دمش) و از چشمه نوری دیگر به عنوان گمانه استفاده می‌کنند. در اینجا از لیزر He-Ne که ابزار اندازه‌گیری ضریب جذب است، به عنوان گمانه و از لامپ التهایبی ۸۰ W که وسیله‌ای برای تحریک القایی است، به عنوان پمپ (دمش) استفاده کردیم (شکل ۳ را ببینید). همانطور که در شکل ۳ دیده می‌شود، تیغه اپتیکی به عنوان ماده دز خورده فعال تحت تابش دو پرتو فوتونی قرار می‌گیرد.



شکل ۳-ب: برپایی ساختار تجربی تحریک ماده دز خورده برای تغییر ضریب جذب آن.

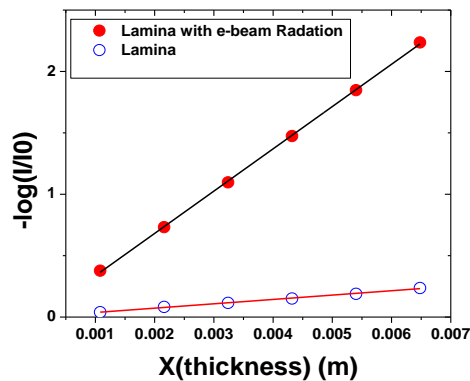


شکل ۳-الف: نمایی از تحریک ماده دز خورده برای تغییر ضریب جذب آن.

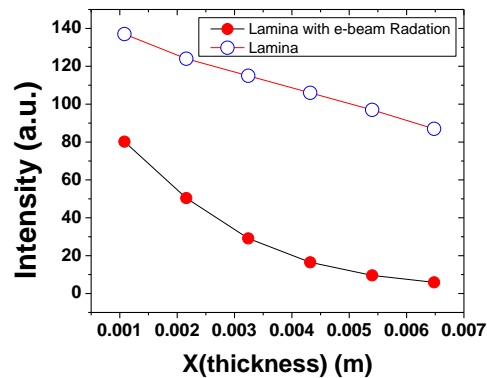
پرتو اول باریکه لیزری است که نقش باریکه گمانه را دارد و پرتو دوم تابش لامپ التهابی است که برای دمش تحریکی به کار می‌رود. اگر این لایه‌های دز خورده در اثر تابش لامپ التهابی دز خورده را از دست دهند و به حالت اولیه برگردند می‌توان امیدوار بود حسگرهای همزمان انرژی طراحی شود. بدین صورتکه اگر این لایه‌های اپتیکی به صورت عمود در زیر تابش شتابدهنده قرار گیرند با استفاده از روش Z-Scan می‌توان تغییرات ضریب جذب را بر حسب (z) که بیانگر نفوذ الکترونهاست با دقت اندازه گرفت. اما مهم است که برای تکرار اندازه‌گیری، این لایه‌ها دز اولیه را دوباره از دست داده و آماده دریافت دزهای بعدی شوند.

### نتایج:

در این تحقیق لایه‌های اپتیکی تحت تابش الکترونی دز ۲۷ KGy قرار گرفتند، سپس ضریب جذب این لایه‌ها با استفاده از روش مذکور مطابق شکل ۲ اندازه‌گیری شد.



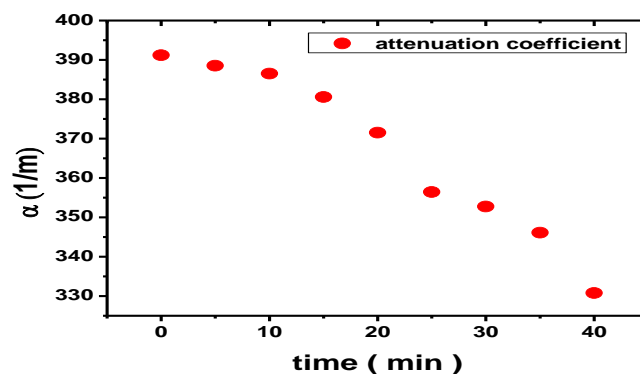
شکل ۴-ب: نمودار تغییر  $-\log(I/I_0)$  با افزایش ضخامت لایه‌های اپتیکی برای اندازه‌گیری ضریب جذب.



شکل ۴-الف: نمودار تغییر شدت خروجی با افزایش ضخامت لایه‌های اپتیکی.

## 19 th Iranian's Nuclear Conference

همانطور که در نمودار شکل ۴ مشاهده می‌شود، داده‌های تجربی تطابق خوبی با تئوری دارند و مقدار ضریب جذب برای لایه اپتیکی بدون پرتودهی الکترونی ( $\alpha = 35.48 \frac{1}{m}$ ) (○) و با پرتودهی ( $\alpha = 344.369 \frac{1}{m}$ ) (●) بدست آمد. حال اگر لایه‌های دز خورده مطابق شکل ۳ تحت تابش یک چشمه نور غیرهمراس‌التهابی  $^{80}W$  قرار بگیرند، توان عبوری نور لیزر He-Ne با گذشت زمان تغییر می‌کند. این تغییرات توان عبوری، ناشی از تغییرات ضریب جذب با گذشت زمان است که با اندازه‌گیری تجربی مطابق شکل ۲ بدین صورت بدست می‌آیند.



شکل ۵: اندازه‌گیری تغییرات ضریب جذب با گذشت زمان.

همانطور که در نمودار شکل ۵ مشاهده می‌شود، ضریب جذب با گذشت زمان به صورت غیر خطی و با شیب تند تغییر می‌کند. هرچند این زمان نسبتاً طولانی است اما مطابق انتظارمان لایه‌ها در اثر تابش‌التهابی دز خود را از دست می‌دهند. حال اگر بجای این لامپ‌التهابی غیرهمدوس (Incoherent)، چشمه همدوس لیزری (Coherent) را بیاوریم که سرعت تغییرات ضریب جذب را شدت بخشد می‌توانیم حسگرهای نوری شتابدهنده با بهره و سرعت بالا طراحی کنیم. این حسگرهای نوری در مقابل خروجی‌های شتابدهنده قرار می‌گیرند و انتقال داده از آنها توسط باریکه لیزری و بازآوایی آنها نیز توسط چشمه همدوس یا غیرهمدوس نوری دیگر است.

### بحث و نتیجه‌گیری:

در این تحقیق با استفاده از خاصیت اپتیکی ضریب جذب، نتیجه‌ای برای اندازه‌گیری کیفیت و کمیت باریکه‌های الکترونی از جمله انرژی معرفی کردیم. استفاده از باریکه لیزری در روشی موسوم به دمش-گمانه این امکان را فراهم کرد که بتوانیم تغییرات دز جذبی را به صورت همزمان و در راستای انتشار باریکه الکترونی و برای زمان‌های متوالی ببینیم. از طرفی چون انتقال داده‌ها از مقابل خروجی‌های شتابدهنده توسط باریکه لیزری صورت می‌گیرد نویزهای الکتریکی، خطایی در سیستم اندازه‌گیری اعمال نمی‌کنند.



مراجع:

- [۱] J. Chen, Z. Guo, K. Liu, and L. Zhou, "Development of Accelerator Mass Spectrometry and Its Applications," *Reviews of Accelerator Science and Technology* ۰۴, pp. ۱۱۷-۱۴۵, ۲۰۱۱.
- [۲] A. W. Chao, and W. Chou, "Editorial Preface," *Reviews of Accelerator Science and Technology* ۰۴, pp. v-vi, ۲۰۱۱.
- [۳] E. v. d. Bij, J. Serrano, T. Wlostowski, M. Cattin, E. Gousiou, P. A. Sanchez, A. Boccardi, N. Voumard, and G. Penacoba, "Open Hardware for CERN's accelerator control systems," *Journal of Instrumentation* ۷, C۰۱۰۳۲, ۲۰۱۲.
- [۴] S. E. Burch, et. al, "A new approach to film dosimetry for high energy photon beams: Lateral scatter filtering," *Medical Physics* ۲۴, pp. ۷۷۵-۷۸۳, ۱۹۹۷.
- [۵] J. Dutreix, and A. Dutreix, "Film Dosimetry Of High-energy Electrons," *Annals of the New York Academy of Sciences* ۱۶۱, pp. ۳۳-۴۳, ۱۹۶۹.
- [۶] C. H. Back, F. King, G. Collet, R. Kirby, and C. Field, "A novel wire scanner for high-intensity pulsed beams," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* ۴۳۵, pp. ۳۱۸-۳۲۵, ۱۹۹۹.
- [۷] T. Akesson, et. al, "An X-ray scanner for wire chambers," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* ۵۰۷, pp. ۶۲۲-۶۳۵, ۲۰۰۳.
- [۸] Y. Liu, et al, "Nonintrusive emittance measurement of Energy ;GeV H- beam," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* ۶۷۵, pp. ۹۷-۱۰۲, ۲۰۱۲.
- [۹] S. T. Boogert, et. al, "Micron-scale laser-wire scanner for the KEK Accelerator Test Facility extraction line," *Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams* ۱۳, ۱۲۲۸۰۱, ۲۰۱۰.
- [۱۰] Y. Liu, et. al, "Laser wire beam profile monitor in the spallation neutron source (SNS) superconducting linac," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* ۶۱۲, pp. ۲۴۱-۲۵۳, ۲۰۱۰.
- [۱۱] S. Kneip, et. al, "Characterization of transverse beam emittance of electrons from a laser-plasma wakefield accelerator in the bubble regime using betatron x-ray radiation," *Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams* ۱۵, ۰۲۱۳۰۲, ۲۰۱۲.
- [۱۲] J. Schwarz, et. al, "Measurement of trigger and cascade section runtimes in ۶ MV switches using fiber coupled photodetectors," *Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams* ۱۵, ۰۷۲۸۰۲, ۲۰۱۲.
- [۱۳] W. Demtröder, "Pump-and-Probe Spectroscopy," in *Laser Spectroscopy* (Springer, Berlin Heidelberg), pp. ۳۳۸-۳۴۰, ۲۰۰۸.
- [۱۴] K. Meyer, C. Ott, P. Raith, A. Kaldun, Y. Jiang, A. Senftleben, M. Kurka, R. Moshammer, J. Ullrich, and T. Pfeifer, "Noisy Optical Pulses Enhance the Temporal Resolution of Pump-Probe Spectroscopy," *Physical Review Letters* ۱۰۸, ۰۹۸۳۰۲, ۲۰۱۲.
- [۱۵] D. Hopkins, M. Maqbool, and M. Islam, "Linear attenuation coefficient and buildup factor of MCP-۹۶ alloy for dose accuracy, beam collimation, and radiation protection," *Radiol Phys Technol* ۵, pp. ۲۲۹-۲۳۶, ۲۰۱۲.
- [۱۶] J. H. Hubbell, "Survey of photon-attenuation-coefficient measurements ۱۰ eV to ۱۰۰ GeV," *Atomic Data and Nuclear Data Tables* ۳, pp. ۲۴۱-۲۹۷, ۱۹۷۱.
- [۱۷] H. Cember, T. E. Johnson, and P. Alaei, "Penetration depth," in *Introduction to Health Physics: Fourth Edition* (Pergamon Press, Elmsford, New York), pp. ۵۹۲, ۲۰۰۸.