بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

بررسی پارامترهای چشمه الکترونی لیزری و هدف در تولید پرتو ایکس

لیدا نیک زاد[۱]، علیرضا احتصامی سرابی[۲]، فرنگیس گورنگی[۳] و رسول صدیقی بنابی[۴]

[۱] پژوهشکده لیزر و اپتیک، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران
[۲] دانشکده مرکز تحقیقات فیزیک پلاسما، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران
[۳] گروه فیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز، تهران
[۴] گروه فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

چکیده - الکترونهای شبه‌تک‌انرژی حاصل از شتابدهنده‌های لیزر-پلاسمایی با هدفهای تیغه‌ای شکل جامد برخورد کرده و اشعه ایکس تولید شده با استفاده از کد *MCNP4C* شبیه سازی می‌شود. اثر پارامترهای توزیع الکترونی نظیر پهنای‌پالس (ΔE)، انرژی‌پیک (E_p)، و انرژی‌کل الکترونها (E_t)، اندازه باریکه الکترون، بعلاوه جنس و ضخامت هدف، بر بازدهی اشعه ایکس مورد مطالعه قرار می‌گیرند. نتیجه گرفته می‌شود که در هدف‌های ضخیم‌تر، استفاده از چشمه الکترونی با قطر کوچکتر، ΔE کمتر و E_p بیشتر، و بکارگیری هدف با عدد اتمی و چگالی بزرگتر، بازدهی پرتو ایکس افزایش می‌یابد.

کلید واژه- الکترونهای شبه‌تک‌انرژی، برهمکنش لیزر-پلاسما، شبیه سازی اشعه ایکس.

The parameters of laser-produced-electron source and target in x-ray generation

Nikzad, Lida[1]; Ehtesami-Sarabi, Alireza[2]; Goorangi, Farangis[3]; Sadighi-Bonabi, Rasoul[4]

[1] Laser & Optics Research School, NSTRI, Tehran

[2] Department of Plasma Physics Research Center, Science & Research Branch Islamic Azad University, Tehran

[3] Physics Department, Islamic Azad University, Central Branch, Tehran

[4] Physics department, Sharif University of Technology, Tehran

Abstract- The quasi-monoenergetic electrons produced by laser-plasma accelerators collide with slab solid targets and the generated x-ray is simulated by MCNP4C code. In this work, the effects of electron profile parameters such as pulse-width (ΔE), energy of the peak (E_p), and total energy of electrons (E_t), electron beam dimension, plus material and thickness of target are studied on x-ray efficiency. It is resulted that in thicker targets, by using an electron source with smaller diameter, larger E_p and smaller ΔE, also a target with larger atomic number and density, x-ray efficiency is increased.

Keywords: Laser-plasma interaction, Quasi-mono-energetic electrons, X-ray simulation.

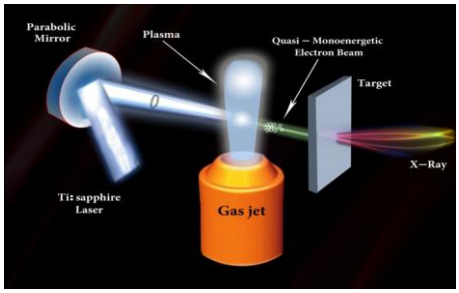
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]

۱- مقدمه

آزمایشگاههای زیادی در جهان پیشگامان تولید لیزرهای پرتوان تا چندین تراوات و حتی پتاوات با کاربردهای جدید در زمینه‌های مختلف بوده‌اند. استفاده از تکنیک Chirped-Pulse-Amplification (CPA) [۱] در دهه ۱۹۹۰، باعث تحولات وسیعی در تکنولوژی لیزرهای توان بالا گردید. پالسهای فمتوثانیه‌ای لیزرهای پرشدت می‌توانند پس از برخورد با ماده و ایجاد پلاسما، به تولید و شتاب ذراتی همچون الکترونها، پروتونها و یونهای سنگین، پرتوهای ایکس و گاما و ... منجر شوند. از برخورد لیزر با هدف گازی، باریکه‌های الکترونی با انرژی‌های چندین MeV و حتی GeV تولید شده‌اند [۲]. از بمباران یک هدف جامد با الکترونهای خروجی از شتابدهنده‌های لیزر-پلاسمایی، تابش ترمزی و مشخصه اشعه ایکس تولید می‌شوند. اشعه‌های ایکس دارای کاربردهای زیادی در علوم پزشکی، مواد، فیزیک، شیمی، و غیره می‌باشند.

۲- روش انجام کار

در اثر برهمکنش پالسهای سیستم لیزری Ti:sapphire با انرژی ۵۰۰ میلی ژول و پهنای‌پالس ۳۰ فمتوثانیه با محیط گازی هلیوم، پلاسما تولید شده و به دنبال آن الکترونهای درون پلاسما شتاب داده می‌شوند. سپس این الکترونهای پرانرژی به طور عمودی با یک هدف جامد برخورد کرده و فوتونهای ایکس مشخصه و ترمزی تولید می‌شوند. لازم به ذکر است که در این تحقیق، برخلاف کارهای انجام شده که منجر به تولید اشعه ایکس با برهمکنش مستقیم لیزر-هدف می‌شود، بر روی اشعه ایکس تولیدی با برهمکنش الکترون-هدف کار شده است. در شکل ۱ چیدمان موردنیاز برای شبیه‌سازی تولید پرتو ایکس نشان داده شده است.

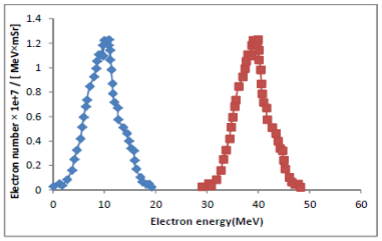


شکل ۱: شمایی از تولید اشعه ایکس، شامل برهمکنش لیزر با هدف گازی، و برخورد الکترونهای پرانرژی تولید شده با هدف جامد.

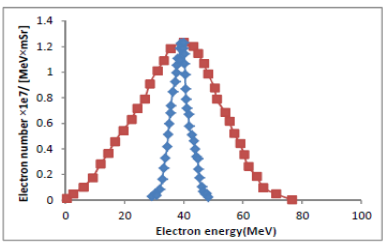
ابزار محاسباتی برای این کار، کد شبیه سازی MCNP4C [۳] است، که براساس روش مونت کارلو، کار می‌کند. در هر مورد، مشخصات چشمه و هدف (اندازه و توزیع انرژی الکترونی، و جنس و شکل و ابعاد هدف) به عنوان ورودی به کد داده می‌شوند و خروجی موردنظر مثلا شار سطحی اشعه ایکس، F_X، (تعداد فوتون بر واحد سطح) بدست می‌آید. در این کار مقایسه طیف‌های حاصله، فقط در انرژی مربوط به پیک مشخصه اصلی K_α در بازه انرژی بین ۱۰ تا ۱۰۰ کیلوالکترون ولت صورت می‌گیرد.

۳- نتایج شبیه سازی و بحث

در انجام شبیه‌سازیها، یک طیف الکترونی شبه‌تک‌انرژی تجربی با قطر ۹ میکرون با پهنای‌پالس ΔE =۶ MeV و انرژی‌پیک E_p =۴۰ MeV [۴]، و دو طیف شبه‌تک‌انرژی فرضی با پهنای‌پالس بیشتر (ΔE =۲۴ MeV)، و انرژی-پیک کمتر (E_p =۱۰MeV) نسبت به طیف تجربی مذکور استفاده شده است (شکل ۲). در هر دو مورد، انرژی‌کل الکترونها، E_t، (سطح زیر نمودارها) با هم متفاوت هستند.



(الف)

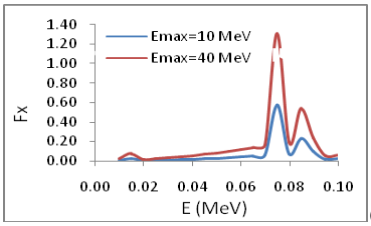


(ب)

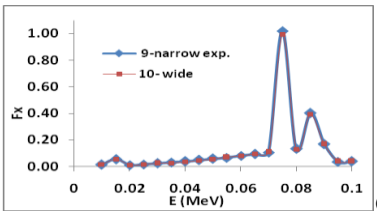
شکل ۲: طیفهای الکترونی شبه‌تک‌انرژی تجربی و فرضی؛ الف) با پهنای‌پالس یکسان، ولی انرژی‌پیک متفاوت؛ ب) با انرژی‌پیک یکسان، ولی پهنای‌پالس متفاوت.

ابتدا، برای بررسی تاثیر انرژی‌پیک (E_p)، برخورد طیفهای الکترونی شکل ۲الف به هدف تیغه‌ای سربی جامد شبیه-سازی می شوند. نتایج شبیه‌سازی با این دو طیف، بصورت نمودار شار اشعه ایکس تولید شده برحسب انرژی، به-عنوان نمونه برای هدف با ضخامت ۲۰۰۰ میکرون، در شکل ۳الف نشان داده شده است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]



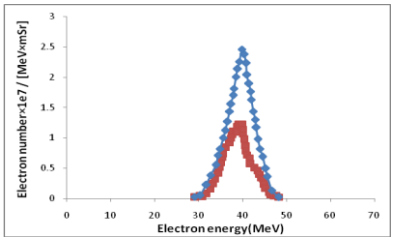
(الف)



(ب)

شکل ۳: شار اشعه ایکس حاصله با استفاده از یک تیغه سربی و دو طیف الکترونی، الف) دارای E_p متفاوت و هدف ۲۰۰۰ میکرونی، ب) دارای τ متفاوت و هدف ۳۵۰۰ میکرونی.

در بررسی تاثیر پهنای‌پالس (ΔE)، از دو طیف الکترونی شکل ۲ب استفاده شده است. نتایج حاصله برای هدف با ضخامت نمونه ۳۵۰۰ میکرون، در شکل ۳ب نشان داده شده است. از بررسی نتایج بدست آمده از طیف‌های مذکور برای ضخامتهای گوناگون، نتیجه گرفته می شود که در هدف‌های با ضخامت بیشتر، طیف الکترونی با انرژی‌پیک بزرگتر در تولید فوتونهای اشعه ایکس بهتر عمل می‌کند، زیرا الکترونها انرژی لازم برای عبور از ضخامت ماده و تولید فوتون را دارند. همچنین در هدفهای با ضخامت کمتر، طیف الکترونی دارای پهنای‌پالس بیشتر، شار اشعه ایکس بیشتری تولید می‌کند؛ علت آن است که طیف پهن‌تر دارای تعداد بیشتری الکترون از هر دو نوع کم‌انرژی و پرانرژی می‌باشد، و درضخامتهای کمتر، کل این الکترونها قادر به عبور از ماده و تولید فوتون می‌باشند. در مرحله بعد، دو طیف الکترونی با پهنای‌پالس و انرژی-پیک یکسان و انرژی‌کل نابرابر، با هم مقایسه شده‌اند؛ در انرژی‌پیک، تعداد الکترونهای طیف فرضی دو برابر طیف تجربی می‌باشد (شکل ۴).



شکل ۴: طیفهای الکترونی شبه‌تک‌انرژی تجربی (کوتاه به رنگ قرمز) و فرضی (بلند و آبی رنگ) با انرژی‌پیک و پهنای‌پالس یکسان و انرژی‌کل نابرابر.

نتایج شبیه‌سازی حاصل از طیفهای شکل ۴ نشان می-دهند هنگامی که پهنای‌پالس و انرژی‌پیک طیفهای الکترونی برابر هستند، میزان شار اشعه ایکس حاصل از برخورد آنها با هدف، در همه ضخامتها تقریبا یکسان می-باشد، حتی اگر انرژی‌کل آنها متفاوت باشد. در جدول ۱ تعدادی از خروجی‌های به دست آمده نشان داده شده‌اند. F_L و F_{Sh} به ترتیب شار ماکزیمم اشعه ایکس حاصل از طیفهای بلند و کوتاه در شکل ۴، و N/A نشانگر تعداد الکترونها بر واحد سطح می‌باشند.

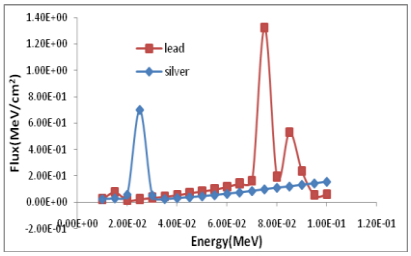
جدول۱- شار اشعه ایکس حاصل از دو طیف شکل ۴ برای ضخامتهای مختلف سرب؛

$d\ (\mu m)$	1000	1500	2000
$F_L \approx F_{Sh}\ (N/A)$	1.07	1.24	1.32

پیش از این نشان داده شده است که با افزایش ضخامت هدف، شار اشعه ایکس حاصل از الکترونهای با طیف شبه-تک‌انرژی، افزایش قابل‌ملاحظه‌ای نسبت به الکترونهای با طیف شبه‌ماکسولی نشان می‌دهد، حتی هنگامی که انرژی‌کل (E_t) دو طیف برابر می‌باشد [۵]. می‌توان چنین نتیجه گرفت که در توزیع‌های الکترونی، دو عامل پهنای-پالس و انرژی‌پیک، نقش موثرتری نسبت به انرژی‌کل در تولید فوتونهای ایکس ایفا می‌کنند.

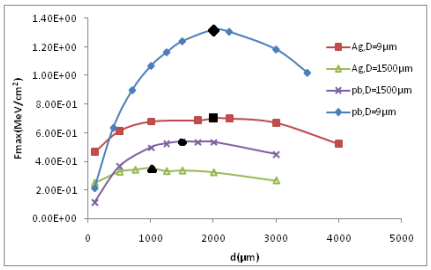
علاوه بر فاکتورهای چشمه، خصوصیات هدف نیز بر روی مقدار شار فوتونهای ایکس موثرند. برای بررسی نقش عدد اتمی و چگالی هدف، طیف الکترونی تجربی به دو هدف تیغه‌ای از جنس نقره و سرب به ترتیب با اعداد اتمی ۴۷ و ۸۲ و چگالیهای $10.49 gcm^{-3}$ و $11.34 gcm^{-3}$ تابانیده می شود. نمودار شار فوتون‌های ایکس حاصل برحسب انرژی برای ضخامت برابر ۲۰۰۰ میکرون در شکل ۵ نمایش داده شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش عدد اتمی و چگالی ماده، شار اشعه ایکس تولید شده در انرژی پیک مشخصه K_α افزایش یافته و به سمت انرژی‌های بیشتر حرکت می‌کند. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازیها با نتایج تجربی مطابقت دارند [۶].

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]



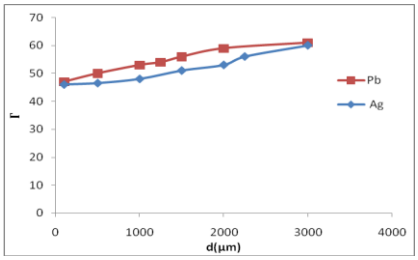
شکل ۵: مقایسه شار اشعه ایکس تولید شده برحسب انرژی برای هدفهای تیغه ای سرب و نقره با ضخامت ۲۰۰۰ میکرون.

به منظور بررسی نقش ابعاد چشمه الکترونی بر روی بازدهی اشعه ایکس، قطر باریکه الکترونی از ۹ میکرون به ۱۵۰۰ میکرون، افزایش داده می‌شود. لازم به ذکر است که برای هر چشمه الکترونی و هر ماده، ضخامت بهینه‌ای برای هدف وجود دارد که شار اشعه ایکس به بیشترین مقدار خود می‌رسد. برای دو هدف سرب و نقره، و دو چشمه مذکور با ابعاد متفاوت، ضخامت‌های بهینه و شارهای ماکزیمم با رنگ مشکی روی نمودارهای شکل ۶ مشخص شده‌اند.



شکل ۶: مقایسه ماکزیمم شار اشعه ایکس تولید شده برحسب ضخامت برای هدفهای تیغه‌ای سرب و نقره، برای دو طیف الکترونی با قطر نابرابر.

مشاهده می‌شود که با استفاده از قطر باریکه کوچکتر ۹ میکرونی نسبت به ۱۵۰۰ میکرونی، یعنی با افزایش تمرکز مکانی (یا همدوسی مکانی) الکترونها، شار ماکزیمم و ضخامت بهینه هدف افزایش می‌یابند. برای محاسبه درصد افزایش تولید شار پرتو ایکس حاصل از دو باریکه الکترونی با ابعاد مختلف، از رابطه $\Gamma = [(F_1 - F_2)/F_1] \times 100$ استفاده می‌شود. F_1 و F_2 به ترتیب نشان دهنده ماکزیمم شار اشعه ایکس حاصل از باریکه الکترونی با قطرهای ۹ و ۱۵۰۰ میکرون می‌باشند. درصد افزایش Γ بر حسب ضخامت برای دو هدف نقره و سرب در شکل ۷ مقدار مثبتی را نشان می‌دهد. به طور مثال برای ضخامت ۲۰۰۰ میکرون افزایش ۵۹ درصدی برای سرب و ۵۳ درصدی برای نقره بدست می‌آید. در نتیجه با کاهش قطر باریکه الکترونی، و افزایش عدد اتمی و چگالی ماده، درصد افزایش تولید شار پرتو ایکس سیر صعودی نشان می‌دهد.



شکل ۷: درصد افزایش Γ برحسب ضخامت برای دو هدف نقره و سرب.

۴- نتیجه‌گیری

در بمباران هدفهای جامد توسط الکترونهای شبه‌تک‌انرژی ناشی از برهمکنش لیزر-پلاسما، اشعه ایکس تولید شده توسط کد MCNP4C شبیه‌سازی شده است. در این مقاله، نقش مشخصه‌های توزیع چشمه الکترونی و هدف، در افزایش بازدهی فوتونهای حاصله ارزیابی شده است. نشان داده شده که در هدفهای با ضخامت کمتر، استفاده از طیف الکترونی با پهنای‌پالس بیشتر و انرژی‌پیک کمتر، و در ضخامت‌های بیشتر استفاده از توزیع با پهنای‌پالس کمتر و انرژی‌پیک بیشتر نقش به‌سزایی در افزایش تولید اشعه ایکس دارد. بعلاوه، با بکارگیری باریکه الکترونی با ابعاد کوچکتر، ضخامت بهینه هدف و تولید اشعه ایکس افزایش می‌یابند. همچنین انتخاب هدفی با عدد اتمی و چگالی بزرگتر، باعث افزایش بازدهی اشعه ایکس می‌شود. می‌توان نتیجه گرفت که به‌منظور افزایش بازدهی تولید پرتو ایکس، انتخاب فاکتورهای مناسب برای چشمه الکترونی و هدف مورد استفاده، اجتناب ناپذیر است.

مراجع

[1] D. Strickland and G. Mourou, "*Compression of amplified chirped optical pulses*", Opt. Commun. 56, 219 (1985)

[2] W. P. Leemans et al., *GeV electron beams from a centimetre-scale accelerator*, Nature Physics 2, 696-699 (2006).

[3] *MCNP™-A General Monte Carlo N-Particle transport Code*, edited by J. F. Briesmeister (Version 4C, Los Alamos National Laboratory, LA-13709-M, 2000).

[4] R. Sadighi-Bonabi, H. A. Navid, and P. Zobdeh, *Observation of quasi mono-energetic electron bunches in the new ellipsoid cavity model*, Laser Part. Beams 27, 223 (2009).

[5] L. Nikzad et al., *Simulation of enhanced characteristic x rays from a 40-MeV electron beam laser accelerated in plasma*, Phys. Rev. ST Accel. Beams 15, 021301 (2012).

[6] G. F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement* (John Wiley & Sons, Inc., New York, 2000), 3rd ed.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]