بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

مطالعه توزیع زاویه ای فرود باریکه الکترونی بر هدف در افزایش بازدهی اشعه ایکس به روش شبیه سازی

علیرضا احتصامی سرابی[۱]، لیدا نیک زاد[۲*]

[۱] مرکز تحقیقات فیزیک پلاسما، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
[۲*] پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده لیزر و اپتیک، تهران

چکیده – پیشرفت لیزرهای پالس کوتاه پرتوان افق جدیدی را برای مطالعه برهمکنش لیزر و ماده گشوده است. یکی از کاربردهای برهمکنش لیزرهای پرتوان با پلاسما، شتابدهی الکترون های نسبیتی حاصل از این برهمکنش می باشد. برخورد این الکترون های پرانرژی با یک هدف ثانویه، منجر به تولید تابش های مشخصه و ترمزی ایکس می شود. با محاسبه جریان خروجی توسط کد شبیه سازی **MCNP۴C** به بررسی نقش توزیع زاویه ای باریکه الکترون فرودی بر افزایش بازدهی تولید اشعه ایکس می پردازیم. نتایج شبیه سازی نشان می دهند که تغییر زاویه برخورد باریکه الکترونی نقش بسزایی در ازدیاد جریان فوتونی موثر ایفا می کند.

کلید واژه- الکترون های شبه تک انرژی، زاویه فرود الکترون، شبیه سازی تولید پرتوهای ایکس.

Study of angular distribution of electrons entrance on a target in x-ray efficiency increment via simulation

Alireza Ehtesami-Sarabi[۱], Lida Nikzad[۲]

[۱] Plasma Physics Research Center, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
[۲]Laser & optics Research School, NSTRI, Tehran

Abstract- Progress on high-power lasers with ultrashort pulses has been opened a new horizon to the laser-material interaction. One of the applications of laser- plasma interaction is acceleration of relativistic electrons. The collision of these energetic electrons with a secondary target, results in the characteristic and Bremsstrahlung x-rays generation. By calculating the output current via MCNP۴C simulation code, the effect of angular distribution of the colliding electrons on raising the x-ray efficiency is considered. The results of simulation reveal that changing the entrance angle of the electrons has an important role on increasing the efficient photons current.

Keywords: Quasi-monoenergetic electrons, entrance angle of electrons, simulation of x-ray generation.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

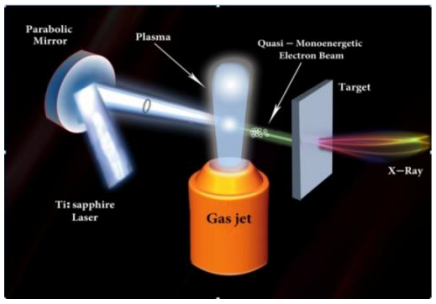
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

۱- مقدمه

پیشرفت در تکنولوژی ساخت لیزرهای پرشدت پالس کوتاه در دهه ۹۰ باعث بوجود آمدن انقلابی در افزایش شدت و توان لیزرها گردیده است. پیک توان این لیزرها را با استفاده از تکنیک تقویت پالس کشیده شده یا به اختصار (CPA) می توان به مقدار تراوات و حتی پتاوات افزایش داد [۱]. در این روش می توان انرژی پالس لیزر را به نحو موثری از محیط بهره بدون صدمه رساندن به تقویت کننده اپتیکی خارج نمود. یکی از کاربردهای لیزرهای پرشدت پالس کوتاه، برهمکنش آنها با هدف های جامد وگازی، تولید پلاسما و شتابدهی ذراتی نظیر الکترون ها تا حد نسبیتی می باشد. الکترون های حاصل از این برهمکنش دارای توزیع های شبه تک انرژی و شبه ماکسولی با انرژی های چندین گیگا الکترون ولت می باشند [۲,۳]. از برخورد این الکترون های پرانرژی به سطح مواد با عدد اتمی بالا، پرتوهای ایکس مشخصه و ترمزی تولید می شوند. از جمله کاربردهای پرتوهای ایکس تولید شده می توان به استفاده آنها در پرتونگاری، استفاده در مطالعه ساختار بلورها و پرتودرمانی اشاره کرد.

۲- روش کار

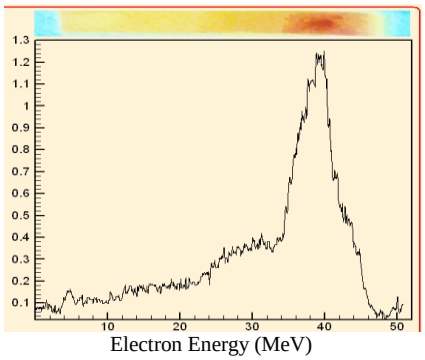
سیستم لیزری تیتانیم-سفایر با توان ۲۰ تراوات، آهنگ تکرار ۱۰هرتز و پهنای پالس ۳۰ فمتو ثانیه بعد از برخورد به نازل gas-jet منجر به تولید پلاسما می شود. الکترون های حاصل از این برهمکنش پس از برخورد به اهداف جامد منجر به تولید اشعه ایکس می شوند. این فرآیند در شکل ۱ نشان داده شده است. در این تحقیق با استفاده از کد MCNP4C که براساس روش مونت کارلو کار می کند [۴]، به بررسی برخی عوامل تاثیرگذار در افزایش بازدهی جریان اشعه ایکس حاصل از برخورد الکترون های شبه تک انرژی با هدف سربی می پردازیم. سرب فلزی با عدد اتمی۸۲ و چگالی g/cm^3 ۱۱.۳٤ می باشد. مشخصات این فلز بعنوان هدف و همچنین مشخصات چشمه الکترونی در ورودی کد لحاظ شده و در خروجی داده های مربوط به جریان بدست می آیند. داده های جریان فوتونی در بازه انرژی ۱۰ تا ۱۰۰ کیلو الکترون ولت و در پیک مشخصه K_α مقایسه می شوند. برخلاف بررسی های فراوانی که برای مطالعه بازدهی اشعه ایکس تولید شده توسط برخورد مستقیم لیزر به هدف صورت گرفته شده است، ما در این مقاله به بررسی برخی عوامل موثر در افزایش اشعه ایکس توسط برخورد الکترون به هدف ثانویه می پردازیم.



شکل۱ : طرح تولید اشعه ایکس با استفاده از الکترون های پرانرژی

۳- نتایج شبیه سازی و بحث

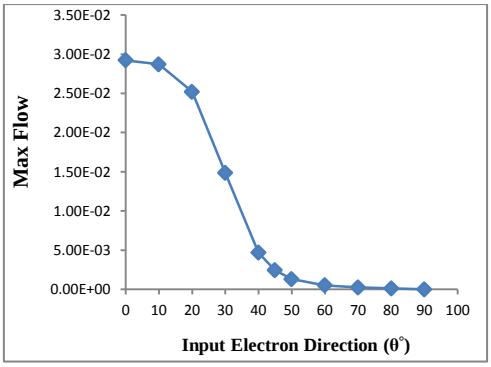
در شکل۲ طیف الکترونی تجربی با توزیع شبه تک انرژی [۵] نشان داده شده است.



شکل۲ : طیف الکترونی تجربی با پهنای پالس ۶.۵ و پیک انرژی ۴۰مگا الکترون ولت.

در این مقاله به بررسی نقش توزیع های زاویه ای الکترون برخوردی بر جریان خروجی فوتون های ناشی از این برخورد توسط طیف الکترونی تجربی شکل ۲ با هدف سربی به ضخامت ۲۰۰۰ میکرون می پردازیم. اساس تجربی این بررسی به قرار زیر است: پرتو الکترونی را تحت زوایای مختلف از یک نقطه ثابت به هدف مورد نظر می تابانیم و جریان خروجی کلی از سطح جلویی هدف را بررسی می کنیم (شکل ۳). در شکل ۳ مشاهده می شود که بیشترین خروجی مربوط به زاویه فرود صفر درجه باریکه الکترونی است. محور z عمود بر سطح هدف در نظر گرفته می شود و زاویه صفر فرود الکترون ها، در راستای z می باشد. تحت زاویه فرود 90° الکترون(یعنی در راستای هدف) برخوردی با هدف صورت نمی گیرد، از اینرو بدیهی است که جریان فوتونی تحت این زاویه مقداری نخواهد داشت.

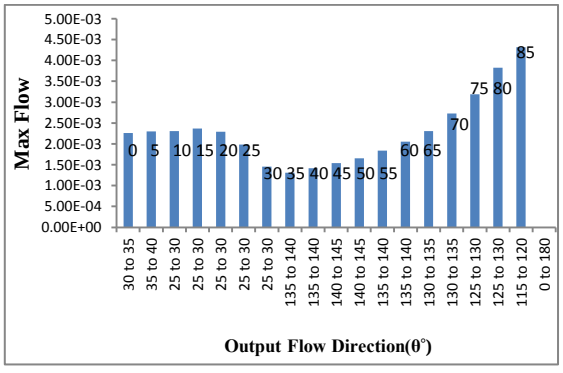
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]



شکل ۳: بیشینه ی جریان خروجی کلی از سطح جلویی بر حسب زاویه فرود الکترون

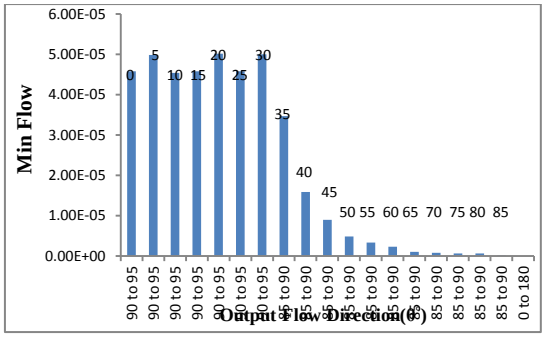
در مرحله بعد، برای هر زاویه فرود باریکه الکترونی، جریان خروجی را در زوایای مختلف اندازه گیری می کنیم. به عبارت دیگر هر بار موضع آشکارساز را در بازه زاویه ای معینی قرار می دهیم که بیشینه ی جریان فوتونی حاصل شود. لازم به ذکر است که در این مرحله اندازه گیری جریان فوتونی روی مجموع سطوح عقبی (سطح فرود الکترون) و جلویی هدف صورت گرفته است. برای بررسی اینکه مقادیر بیشینه و کمینه ی جریان های سطحی فوتونی در چه زوایای خروجی اتفاق می افتند، در شکل۴ نمودار بیشینه و کمینه ی برحسب زوایای خروجی به ترتیب برای زوایای فرود ۰ تا ۹۰ درجه رسم شده است. لازم به ذکر است که روی نمودارهای شکل ۴ زوایای فرود الکترون قید شده اند تا بررسی و تحلیل نمودارهای حاصل دقیق تر و راحت تر صورت گیرند. به عنوان مثال، برای زاویه فرود $^{\circ}$۸۵ باریکه الکترونی، بیشترین جریان خروجی و کمترین جریان خروجی هنگامی به دست می آید که دتکتور به ترتیب در زوایای مابین ۱۱۵ تا ۱۲۰ و ۸۵ تا ۹۰ درجه قرار می گیرد. بعد از زاویه فرود $^{\circ}$۸۵، کمترین و بیشترین جریان فوتونی سهم زاویه $^{\circ}$۸۰ بوده که با بررسی نمودارهای شکل ۴ به این نتیجه می رسیم که تحت این زاویه فرود، مقادیر بیشینه و کمینه ی به ترتیب در زوایای ۱۲۵ تا ۱۳۰ درجه و ۸۵ تا ۹۰ درجه اتفاق افتاده است. بعد از زاویه فرود $^{\circ}$۸۰ این مقادیر سهم زاویه فرود $^{\circ}$۷۵ بوده و الی آخر. این سیر تا زاویه فرود $^{\circ}$۳۵ برقرار بوده و برای زوایای کمتر از این مقدار برقرار نیست.

بررسی های دقیق نمودارهای شکل ۴(الف) نشان می دهند که برای زوایای فرود ۰ تا ۳۰ درجه باریکه الکترونی، بیشینه ی جریان فوتونی در زوایای ۲۵ تا ۴۰ بیشترین مقدار را دارد. همچنین برای زوایای ۳۵ تا ۸۵ درجه فرود الکترون، مقدار بیشینه ی جریان ایکس مربوط به بازه ۱۱۵ تا ۱۴۰ درجه می باشد. به عبارتی برای زوایای فرود ۰ تا ۳۰ درجه، بیشینه ی جریان فوتونی در جلو هدف و روبه جلو بیشترین مقدار را دارد. برای زوایای فرود ۳۵ تا ۸۵ این مقدار در پشت هدف موردنظر و در خلاف جهت فرود الکترون به بیشترین مقدار خود می رسد. به عنوان نمونه برای زاویه فرود $^{\circ}$۲۰ باریکه الکترونی، باید آشکارساز را جلو هدف موردنظر و در زاویه ای مابین ۲۵ تا ۳۰ درجه قرار داد تا بیشترین جریان فوتونی حاصل شود. برای زاویه فرود $^{\circ}$۶۵ چشمه الکترونی، آشکارساز را پشت هدف مورد نظر و در زاویه ای مابین ۱۳۰ تا ۱۳۵ درجه قرار می دهیم تا بیشترین جریان بدست آید. مقایسه های نمودار ۴(ب) نشان می دهد که برای زوایای فرود ۰ تا ۳۰ درجه برخورد باریکه الکترونی، کمینه ی جریان فوتونی پشت هدف مورد نظر، خلاف راستای فرود الکترون و در زاویه ۹۰ تا ۹۵ درجه اتفاق می افتد. برای فرود تحت زوایای ۳۵ تا ۸۵ درجه، کمینه ی جریان فوتونی جلو هدف، روبه جلو و با زاویه ۸۵ تا ۹۰ درجه می باشد. ازاین رو برای همه زوایای فرود، حداقل مقدار اشعه مربوط به زوایای نزدیک به $^{\circ}$۹۰ (۸۵ تا ۹۵ درجه) یعنی تقریبا در راستای سطح هدف است. در کاربردهای مختلف هر یک از تابش‌های مشخصه و ترمزی، نیاز است تا سهم تابش موردنظر حتی‌الامکان افزایش و سهم تابش دیگر کاهش داده شود. با تغییر پارامترهای هدف و چشمه، از جمله با افزایش انرژی و کاهش ابعاد باریکه چشمه، و انتخاب جنس و هندسه مناسب برای هدف، و همچنین انتخاب زاویه مناسب فرودی و خروجی، می‌توان میزان تابش مورد مورد نظر را بهینه نمود [۶].



(الف)

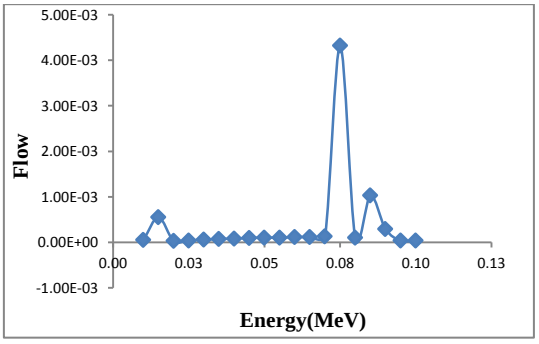
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]



(ب)

شکل ۴: (الف) بیشینه ی جریان فوتونی برحسب زاویه خروج جریان به ترتیب برای زوایای ۰ تا ۹۰ درجه فرود الکترون(ب) کمینه ی جریان فوتونی برحسب زاویه خروج جریان به ترتیب برای زوایای ۰ تا ۹۰ درجه فرود الکترون

در شکل ۵ نمودار کل جریان فوتونی (مشخصه و ترمزی) برای فرود $^{\circ}$۸۵ و زوایای خروج ۱۱۵ تا ۱۲۰ درجه به صورت تابعی از انرژی داده شده است. همانطور که از نمودار هم مشخص است بیشترین جریان فوتونی مربوط به انرژی پیک مشخصه اصلی K_{α} با انرژی ۰.۰۷۵ مگاالکترون ولت می باشد. پیک های مشخصه دیگر مربوط به پیک مشخصه K_{β} با انرژی ۰.۰۸۵ مگا الکترون ولت و همچنین سری های L می باشند. نتایج نمودار شکل ۵ برای پیک های مشخصه، حاصل از نتایج شبیه سازی، با نتایج گزارش های تجربی در توافق است [۷].



شکل ۵: جریان فوتونی(مشخصه و ترمزی) برای فرود $^{\circ}$۸۵ و زوایای خروج ۱۱۵ تا ۱۲۰ درجه.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله اشعه ایکس حاصل از برخورد الکترون های شبه تک انرژی تجربی با استفاده از کد شبیه سازی MCNP۴C برای هدف سربی مورد بررسی قرار گرفت. در این بررسی نقش توزیع زاویه ای باریکه الکترونی فرودی و جریان فوتونی خروجی در انرژی پیک مشخصه اصلی K_{α} مورد ارزیابی واقع شد. نتیجه گرفته شد که تغییر زاویه فرود باریکه الکترونی تاثیر بسزایی در افزایش جریان فوتون سطحی ایفا می کند. همچنین در زاویه فرود معین، جریان فوتونی خروجی در بازه زاویه ای مشخصی مقدار بیشینه و کمینه ی را به خود اختصاص می دهد.

مراجع

[۱] D. Strickland and G. Mourou, "*Compression of amplified chirped optical pulses*", Opt. Commun. ۵۶, ۲۱۹ (۱۹۸۵).

[۲] W. P. Leemans et al., *GeV electron beams from a centimetre-scale accelerator*, Nature Physics ۲, ۶۹۶-۶۹۹ (۲۰۰۶).

[۳] S. P. D. Mangles et al., *Monoenergetic beams of relativistic electrons from intense laser–plasma interactions*, Nature ۴۳۱, ۵۳۵-۵۳۸ (۲۰۰۴).

[۴] *MCNP^{TM}-A General Monte Carlo N-Particle transport Code*, edited by J. F. Briesmeister (Version ۴C, Los Alamos National Laboratory, LA-۱۳۷۰۹-M, ۲۰۰۰).

[۵] 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 ۲۷, ۲۲۳ (۲۰۰۹).

[۶] C. W. Siders et al., Report No. UCRL-TR-۲۲۸۴۰۹, FY۰۶ LDRD Final Report, Tracking Code: ۰۴-ERD-۰۶۴ (۲۰۰۷).

[۷] G. F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement* (John Wiley & Sons, Inc., New York, ۲۰۰۰), ۳rd ed.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]