لیزر در پزشکی؛ ۱۳۹۷، دورهٔ ۱۵، شمارهٔ ۳، صفحات: ۳۰-۲۲ .

مقاله پژوهشی

افزایش تابش اشعهٔ ایکس در تابش‌دهی لیزری فلزات جهت استفاده در میکروسکوپی اشعهٔ ایکس با وضوح بالا: تأثیر چگالی اولیهٔ هدف

رضا فاضلی [۱]
ساسان تیزرو [۲]

خلاصه

هدف: پلاسمای حاصل از برهمکنش لیزر با ماده یکی از منابع جدید اشعهٔ ایکس است که از خصوصیات بسیار خوبی نظیر طول زمانی بسیار کوتاه و شدت یا روشنایی بالا برخوردار است. درنتیجه، به‌عنوان یکی از کاربردها جهت تصویربرداری از نمونه‌های بیولوژیک بسیار مناسب است. دراین‌زمینه فلز طلا نسبت به سایر اهداف، تابش ایکس بیشتری به‌دست می‌دهد. اما، دانشمندان به‌منظور کاهش هزینه‌ها به‌دنبال استفاده از مواد ارزان‌تری هستند. در این مقاله با استفاده از شبیه‌سازی‌های هیدرودینامیکی نشان می‌دهیم که با کاهش چگالی اولیهٔ سرب تا یک حد مشخصی می‌توان میزان اشعهٔ ایکس حاصل از تابش‌دهی لیزری آن را به مقدار قابل‌توجهی افزایش داد.

روش بررسی: در این مطالعه برهمکنش لیزر با مادهٔ هدف و تشکیل و انبساط پلاسما به‌وسیلهٔ یک کد هیدرودینامیکی به‌نام EHYBRID شبیه‌سازی شده است. سپس روابط فیزیکی مربوط به تولید اشعهٔ ایکس از پلاسما بررسی شد و با استفاده از آن‌ها برنامه‌های کامپیوتری مناسب در نرم‌افزار MATLAB تهیه گردید. با استفاده از این برنامه‌ها و خروجی کد EHYBRID، میزان اشعهٔ ایکس تولیدشده در سلول‌های مختلف پلاسما در هر لحظه از زمان محاسبه گردید. محاسبات برای دو فلز طلا و سرب انجام گردید و در نهایت تأثیر کاهش چگالی اولیه سرب بر میزان تابش اشعهٔ ایکس مورد بررسی قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان دادند که با درنظر گرفتن چگالی عادی برای دو فلز، میزان تابش ایکس از پلاسمای طلا بیشتر است. اما، با استفاده از یک هدف سربی با چگالی اولیهٔ کاهش‌یافته می‌توان تابش ایکس از پلاسمای حاصل از آن را تا مقدار مربوط به طلا افزایش داد. در واقع چگالی اولیهٔ سرب باید به مقداری بین ۰/۲۵ تا ۰/۱ چگالی عادی کاهش داده شود.

نتیجه‌گیری: تابش اشعهٔ ایکس از پلاسمای حاصل از تابش‌دهی لیزری دو فلز طلا و سرب به‌منظور استفاده در میکروسکوپی اشعهٔ ایکس به‌صورت عددی شبیه‌سازی شد. نتایج حاصل از این مطالعه نشان دادند که کاهش چگالی اولیهٔ سرب که با روش‌های لایه‌نشانی خاصی قابل انجام است، تابش ایکس از پلاسمای آن را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد. بنابراین می‌توان با استفاده از فلزات ارزان با چگالی اولیهٔ مناسب، علاوه‌بر کاهش قابل توجه هزینه‌ها اشعهٔ ایکسی با شدت و روشنایی بسیار مناسب تولید کرد که جهت تصویربرداری میکروسکوپی از نمونه‌های بیولوژیک با وضوح بسیار بالا قابل استفاده باشد.

واژه‌های کلیدی: برهمکنش لیزر با ماده، پلاسمای لیزری، تابش اشعهٔ ایکس از پلاسما، میکروسکوپی اشعهٔ ایکس

۱. استادیار، گروه اپتیک و لیزر، دانشکدهٔ علوم پایه، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران

۲. کارشناس ارشد، گروه مهندسی هسته ای، واحد علوم و تحقیقات بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران

نویسندهٔ مسئول: رضا فاضلی تلفن: ۰۹۱۱۷۶۱۴۰۰۶
پست الکترونیک: rfazeli@alumni.iust.ac.ir

[Downloaded from icml.ir on 2025-11-04]

مقدمه

یکی از بهترین منابع تابش الکترومغناطیسی در محدودهٔ طیفی اشعهٔ ایکس، پلاسمای حاصل از برهمکنش لیزر با ماده می‌باشد. با تابش‌دهی یک مادهٔ هدف مناسب به‌وسیلهٔ پالس لیزری پرتوان، پلاسمایی تولید می‌شود که می‌تواند دانسیتهٔ الکترونی از مرتبهٔ 10^{23} cm^{-3} و درجهٔ حرارت‌هایی به میزان چندین کیلوالکترون ولت داشته باشد. این شرایط باعث می‌شود که پلاسمای لیزری منبع بسیار مناسبی برای تابش اشعهٔ ایکس شود. اشعهٔ ایکس تولیدشده از این روش دارای روشنایی یا شدت بالا، طول زمانی کوتاه، اندازهٔ کوچک و ثبات فضایی بسیار خوبی است که باعث کاربرد روزافزون این منابع در بخش‌های متنوعی نظیر لیتوگرافی با دقت بالا [۱و۲]، میکروسکوپی اشعهٔ ایکس [۵-۳] و گداخت لیزری [۶] شده است. به‌ویژه اشعهٔ ایکس در محدودهٔ طول‌موجی 2.3-4.4 نانومتر که به محدودهٔ پنجرهٔ آب (Water-Window Region) معروف است، برای تصویربرداری از نمونه‌های زیستی زنده با کنتراست بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد زیرا آب در این محدودهٔ طیفی تقریباً شفاف است [۴و۷]. اما، منابع مرسوم و سنتی اشعهٔ ایکس یعنی همان منابع تابشی سینکروترون (Synchrotron Radiation Sources) می‌توانند پرتوهای ایکس نرم (Soft x-ray) با توان متوسط بالا را در محدودهٔ طول‌موجی پنجرهٔ آب و نیز دیگر طول‌موج‌ها تولید کنند. بااین‌حال، حداکثر روشنایی اشعهٔ ایکس حاصل از آن‌ها نسبت به یک پلاسمای لیزری کمتر است و این امر باعث می‌شود که زمان تابش‌دهی نمونه جهت تصویربرداری حدود چند میلی‌ثانیه باشد. اما، پلاسمای تولیدشده توسط لیزر می‌تواند اشعهٔ ایکسی با روشنایی بالا تولید کند که شرایط را برای تصویربرداری در زمان بسیار کوتاه‌تر یعنی در حدود طول زمانی پالس لیزر (کمتر از یک نانوثانیه) و با وضوح بسیار بالا فراهم می‌سازد. کاهش زمان قرارگیری نمونه در معرض تابش ایکس می‌تواند از یک‌سو باعث کاهش تخریب تصویر یا تار شدن آن در اثر حرکت نمونه شود و از سوی دیگر از ایجاد تغییرات ساختاری ناشی از تابش اشعهٔ ایکس در نمونه جلوگیری کند.

در میان فلزات مختلف به‌عنوان مادهٔ هدف برای تولید پلاسمای لیزری، فلز طلا به‌دلیل تولید اشعهٔ ایکس مناسب و نیز پایین بودن اتلاف انرژی به‌عنوان مادهٔ هدف بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۱۰-۸]. (همچنین استفاده از مواد ترکیبی شامل طلا نظیر Au/Gd، Au/U، Au/Sm و U/Au/Dy نیز در کاربردهای دیگری مانند گداخت گزارش شده است [۱۶-۱۱]). مسلماً استفاده از طلا در چنین مواردی باعث بالا رفتن هزینه‌ها می‌شود. به‌همین‌دلیل دانشمندان به‌دنبال مواد ارزان‌تری هستند که درعین‌حال بتواند اشعهٔ ایکس مورد نیاز را به میزان مناسب تولید کند. بنابراین باید از روش‌هایی برای افزایش میزان تابش اشعهٔ ایکس از این مواد بهره برد تا بتوان شدت تابش ایکس از آن‌ها را به مقدار مورد نیاز افزایش داد. در سال‌های اخیر توجه زیادی به یافتن روش‌هایی برای افزایش تابش ایکس از پلاسمای لیزری شده است. تأثیر شرایط مختلف پالس لیزر و مادهٔ هدف بر میزان تابش اشعهٔ ایکس موضوع بسیاری از مطالعات اخیر در زمینهٔ برهمکنش لیزر با ماده بوده است. در این زمینه روش‌های مختلفی ارائه شده است که درواقع به بهینه‌سازی شرایط لیزر و یا هدف مورد استفاده می‌پردازند. برای نمونه استفاده از تکنیک پیش پالس یا دوپالسی [۱۷و۱۸] و هدف‌هایی که تغییرات ساختاری در آن‌ها ایجاد شده مانند اهداف پوشیده‌شده از نانوذرات [۱۹]، اهداف متخلخل [۲۰] و نیز اهدافی با سطوح نانوساختار مانند سطوح شبکه‌ای (توری مانند) [۲۱] یا نانولوله‌ای [۲۲] گزارش شده است.

هدف ما در این مطالعه این است که نشان دهیم با کاهش چگالی اولیهٔ یک فلز ارزان‌قیمت مانند سرب می‌توان تابش ایکس از پلاسمای حاصل از تابش دهی لیزری آن را تا حد قابل توجهی افزایش داد که بتواند جایگزین مناسبی برای مادهٔ گران‌قیمتی مانند طلا باشد. در این مقاله، مطالعات به‌صورت مقایسه‌ای بین دو عنصر سرب و طلا که دارای ویژگی‌های مناسب برای تولید اشعهٔ ایکس هستند، انجام گرفته است. برهمکنش پالس‌های لیزری پرتوان با این دو فلز به‌وسیلهٔ یک کد هیدرودینامیکی شبیه‌سازی شده است. سپس با استفاده از اطلاعات به‌دست‌آمده و کدهای کامپیوتری نوشته‌شده براساس روابط مربوط، تابش اشعهٔ ایکس پیوسته (ترمزی و بازترکیب) از پلاسما محاسبه شده است. سپس تأثیر کاهش چگالی اولیهٔ اهداف مورد استفاده بر میزان تابش ایکس مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت چگالی اولیهٔ مناسبی برای سرب به‌دست آمده است که بتواند باعث تولید میزان مناسب اشعهٔ ایکس شود، به‌طوری‌که بتواند جایگزین مناسبی برای طلا باشد.

تئوری و روش بررسی

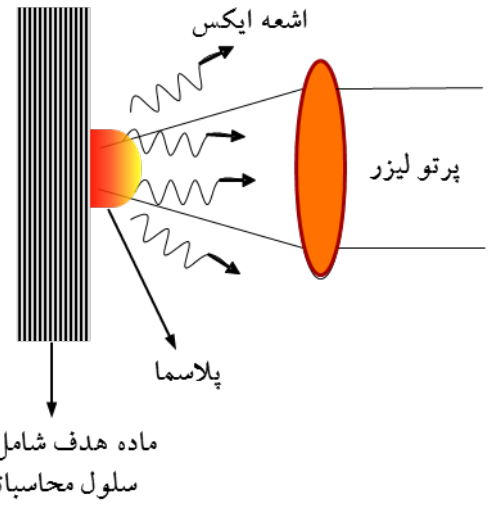
در این مطالعه برای شبیه‌سازی برهمکنش لیزر با هدف و تشکیل و انبساط پلاسما از کد هیدرودینامیکی EHYBRID استفاده شده است [۲۳]. در این مطالعه از نسخهٔ دوم این کد که به زبان Fortran نوشته شده و در محیط ویندوز قابل اجراست، بهره برده‌ایم. این کد هیدرو دینامیکی مجموعه‌ای کامل از معادلات حاکم بر پلاسما شامل معادلات ماکسول، حرکت سیال، پیوستگی و معادلهٔ حالت را باتوجه به شرایط مرزی حل می‌نماید و پارامترهای پلاسما را برحسب زمان در ۹۸ سلول محاسباتی به‌دست می‌دهد. این کد برای شبیه‌سازی اثرهای پالس‌های نانو ثانیه و پیکوثانیه (>10 ps) مناسب است و قابلیت اعمال دو پالس لیزری و نیز شبیه‌سازی اهداف دو لایه را نیز دارد. برای مادهٔ هدف، نود و هشت لایهٔ موازی درنظر گرفته شده است که لیزر از لایهٔ نود و هشتم به‌صورت عمود بر سطح لایه وارد مادهٔ هدف می‌شود.

با جای‌گذاری اطلاعات مربوط‌به مادهٔ هدف ازجمله چگالی جرمی، ضخامت و انرژی یونیزاسیون الکترون‌های آن و همچنین خصوصیات

[Downloaded from icml.ir on 2025-11-04]

پالس لیزر در ورودی کد، می‌توان اطلاعات مورد نیاز مربوط به پلاسمای تشکیل‌شده را برحسب زمان و در هر سلول محاسباتی به‌دست آورد. از مقادیر به‌دست‌آمده ازجمله دما و دانسیتهٔ الکترونی، برای محاسبهٔ تابش ایکس پیوسته از پلاسما استفاده می‌شود که این کار به‌وسیلهٔ برنامهٔ کامپیوتری دیگری انجام شده است. این برنامه در محیط نرم‌افزار MATLAB و براساس روابطی که در ادامه توضیح داده می‌شود، نوشته شده است که در سیستم عامل ویندوز قابل اجرا می‌باشد. (شکل ۱) طرحی شماتیک از شرایط لیزر و هدف را نشان می‌دهد.

تابش ایکس از پلاسما از طریق فرآیندهای ترمزی یا آزاد-آزاد[1]، باز ترکیب یا آزاد-مقید[2] و خط یا مقید-مقید[3] انجام می‌شود [۲۴و۲۵]. در تابش ترمزی، الکترون‌های آزاد تحت تأثیر پتانسیل کولنی یون شتاب می‌گیرند و طیف الکترومغناطیسی پیوسته تابش می‌کنند. در فرآیند بازترکیب، گذار الکترون‌های آزاد به ترازهای انرژی یون‌ها باعث تابش ایکس پیوسته می‌شود. اما، تابش خط، نتیجهٔ گذار الکترون‌های مقید از ترازهای برانگیخته به ترازهای انرژی پایین‌تر یون‌ها است. در این تحقیق به‌طور خاص گسیل اشعهٔ ایکس ازطریق تابش‌های پیوستهٔ ترمزی و بازترکیب درنظر گرفته شده است. محاسبهٔ تابش خط از پلاسما شامل محاسبات بسیار پیچیده‌تری است. به‌همین‌دلیل این فرآیند در تحقیق جداگانه‌ای مورد بررسی قرار خواهد گرفت. البته باید توجه داشت که قسمت عمدهٔ تابش ایکس در محدودهٔ طول‌موجی مورد نظر در این تحقیق، ناشی از تابش‌های پیوسته می‌باشد.



شکل۱: هدف فلزی تحت تابش لیزر، تشکیل پلاسما و تابش اشعهٔ ایکس

با فرض یک توزیع سرعت ماکسولی برای الکترون‌ها و یون‌ها، میزان تابش ایکس ازطریق تابش ترمزی برحسب فرکانس را می‌توان از رابطهٔ زیر محاسبه نمود [۲۴و۲۵]:

$$\varepsilon_B^{\nu} = \frac{32\pi}{3}\left(\frac{2\pi}{3kT_e m_e}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{ze^6 n_e^2}{m_e c^3} \exp\left(-\frac{h\nu}{kT_e}\right) \qquad (۱)$$

که در آن m_e، n_e، T_e و e به‌ترتیب جرم، دانسیتهٔ عددی، دما و بار الکترون می‌باشند. پارامترهای c، Z، k و h نیز به‌ترتیب سرعت نور در خلأ، درجهٔ یونیزاسیون یون‌ها، ثابت بولتزمان و ثابت پلانک هستند. شکل عددی رابطهٔ فوق به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\varepsilon_B^{\nu} = 6.8 \times 10^{-38} z n_e^2 T_e^{-\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{h\nu}{kT_e}\right) \mathrm{erg\ sec^{-1} cm^{-3} Hz^{-1}} \qquad (۲)$$

در تابش بازترکیب، الکترون آزاد توسط یک اتم یونیزه با درجهٔ یونیزاسیون Z+1 جذب می‌شود و درنتیجه الکترون به‌حالت مقید اتم یونیزه با درجهٔ یونیزاسیون Z گذار می‌کند. بدین‌ترتیب یک فوتون با انرژی زیر ساطع می‌گردد:

$$h\nu = \frac{1}{2} m_e v^2 + E_z^n \qquad (۳)$$

که در آن عبارت اول و دوم در سمت راست معادله نشان‌دهندهٔ انرژی جنبشی اولیهٔ الکترون و انرژی تراز نهایی هستند و n عدد کوانتومی اصلی است. ازآنجاکه انرژی اولیهٔ الکترون می‌تواند مقادیر پیوسته داشته باشد، تابش ایجادشده دارای طیف پیوسته خواهد بود. باتوجه به رابطهٔ فوق می‌توان نتیجه گرفت که گذارهای بازترکیب در شرط $h\nu \geq E_z^n$ (لبهٔ بازترکیب) صدق می‌کنند به‌طوری‌که طیف تابش‌شده به‌دلیل بازترکیب در ترازهای مختلف، دارای «جهش»هایی خواهد بود. میزان تابش حاصل از گذار الکترون‌های آزاد به تراز مقیدی با عدد کوانتومی اصلی n مربوط به یون‌های با درجهٔ یونیزاسیون Z_i را می‌توان از رابطهٔ زیر محاسبه کرد [۲۴و۲۵]:

$$\varepsilon_R^{\nu,n} = n_e \sum_{i=1}^{Z} n_i Z_i^2 \frac{16\sqrt{2\pi}\, Z_i^2 e^6 \sqrt{m_e}}{3\sqrt{3}\, m_e^2 c^3 (kT_e)^{3/2}} \chi \frac{G_R}{n^3} \exp\left(\frac{\chi}{n^2 kT_e} - \frac{h\nu}{kT_e}\right) \qquad (۴)$$

$$\chi = \frac{2\pi^2 m_e e^4 Z_i^2}{h^2}$$

که در آن n_i دانسیتهٔ عددی یون‌های با درجهٔ یونیزاسیون Z_i است و پارامتر G_R ضریب گانت[4] نام دارد که می‌توان آن‌را با تقریب خوبی برابر واحد درنظر گرفت [۲۶].

براساس روابط فوق، یک برنامهٔ کامپیوتری در محیط نرم‌افزار MATLAB نوشته شد که بتواند میزان تابش ایکس از پلاسمای

1. Bremsstrahlung or Free-free emission
2. Recombination or Free-bound emission
3. Line or Bound-bound emission
4. Gaunt factor

[Downloaded from icml.ir on 2025-11-04]

لیزری را برای مقادیر مشخص n_e، T_e، n_i و Z_i در فرکانس مشخص ν محاسبه کند. این پارامترها برای هر سلول محاسباتی و در هر گام زمانی از خروجی کد EHYBRID استخراج گردیده و به‌عنوان ورودی در برنامهٔ کامپیوتری تهیه‌شده استفاده شده‌اند. با استفاده از این برنامه مقدار کل تابش ایکس پیوسته از پلاسما در هر گام زمانی با انتگرال‌گیری از روابط (۲) و (۴) در بازهٔ فرکانسی مورد نظر و سپس جمع‌بندی مقادیر حاصل برای تمام سلول‌های پلاسما محاسبه گردید. شرایط مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها در جدول شمارهٔ ۱ آورده شده است.

جدول۱: مشخصات اصلی لیزر و مادهٔ هدف مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها

ضخامت (μm)	مادهٔ هدف	شعاع نقطهٔ کانونی لیزر (μm)	طول پالس (ns)	طول موج (μm)	شدت لیزر (W/cm^2)
200	Au, Pb	100	2	0.351	10^{14}, 10^{15}

یافته‌ها

شکل‌های ۲-الف و ۲-ب میزان تابش اشعهٔ ایکس بازترکیب (Recombination) را برای پلاسمای تولیدشده از هدف طلا با ضخامت 200 μm در تابش‌دهی به‌وسیلهٔ پالس لیزری با طول پالس 2 ns اما با شدت‌های متفاوت 10^{14} $W.cm^{-2}$ و 10^{15} $W.cm^{-2}$ نشان می‌دهد. همچنین شکل‌های ۲-ج و ۲-د نشان‌دهندهٔ تابش ایکس ترمزی (Bremsstrahlung) از پلاسما است. مقادیر به‌دست‌آمده مربوط به زمان t=1 ns پس از شروع تابش‌دهی است. همان‌طورکه مشاهده می‌کنیم با افزایش شدت پالس لیزر به 10^{15} $W.cm^{-2}$ میزان تابش‌ها حدوداً به میزان ده برابر افزایش پیدا کرده است. مقایسهٔ طیف‌های تابشی ترمزی و بازترکیب نشان می‌دهد که در فرکانس‌های پایین، تابش ترمزی غالب است و در فرکانس‌های بالای طیف، تابش بازترکیب تأثیر بسیار بیشتری دارد.

حال تابش ایکس کل را برای دو هدف طلا و سرب مقایسه می‌کنیم که معادل است با مجموع تابش‌های ترمزی و بازترکیب تابش‌شده از تمام سلول ها که در کل بازهٔ فرکانسی انتگرال‌گیری شده است. شکل‌های ۳-الف و ۳-ب میزان تابش کل برحسب زمان را برای طلا و سرب در دو شدت لیزری 10^{14} $W.cm^{-2}$ و 10^{15} $W.cm^{-2}$ نشان می‌دهند. اهداف مورد نظر با ضخامت 200 μm درنظر گرفته شده‌اند و طول پالس لیزر 2 ns می‌باشد.

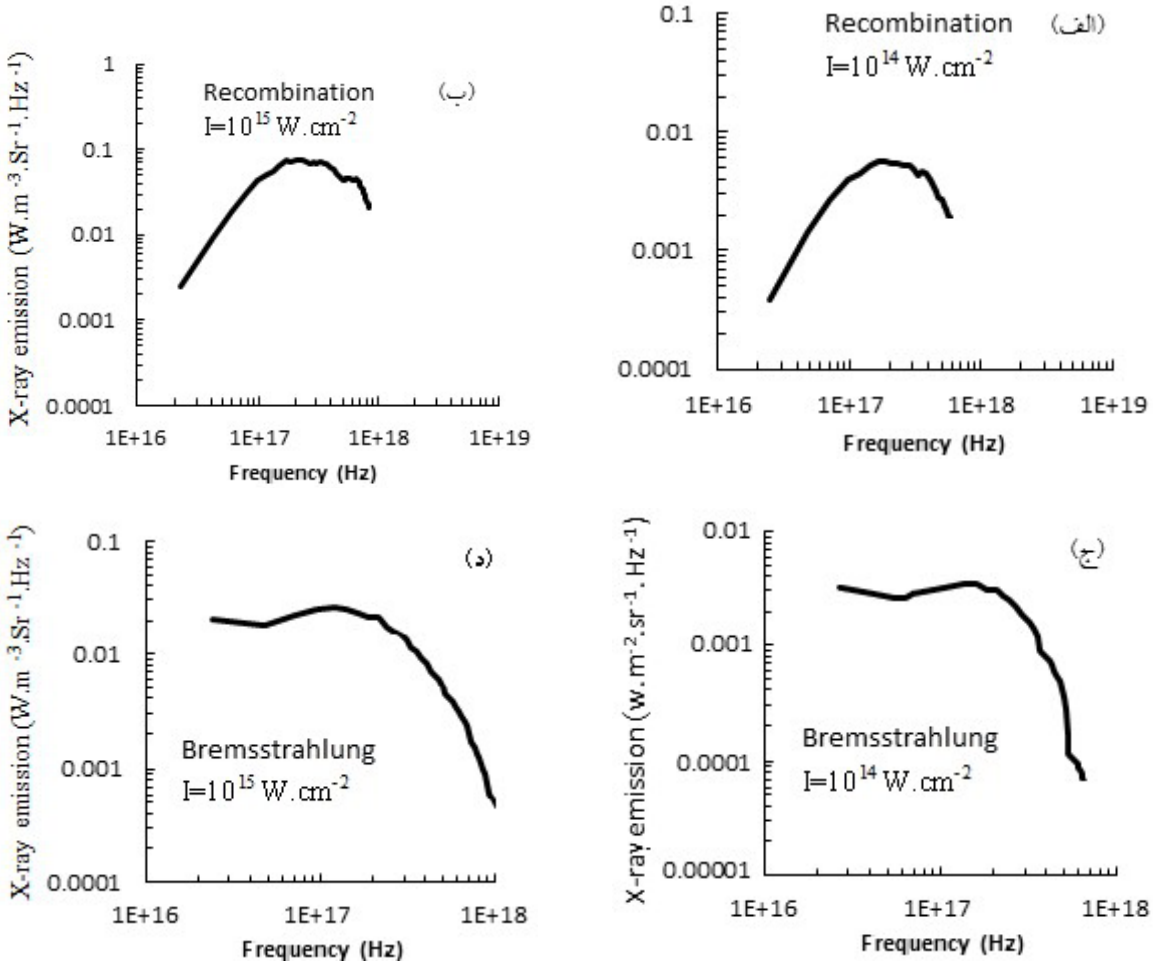
این شکل نشان می‌دهد که برای هر دو هدف و در هر دو شدت، تابش ایکس از پلاسما نسبت به زمان یک روند افزایشی دارد تا زمانی‌که پالس لیزر پایان یابد. همچنین مشاهده می‌کنیم که برای اهدافی با چگالی‌های عادی، میزان تابش از هدف طلا بیشتر از سرب است. در شرایط شدت پالس 10^{14} $W.cm^{-2}$ تفاوت کمتری در تابش منتشرشده از دو هدف مشاهده می‌شود اما، همچنان تابش ایکس از هدف طلا بیشتر است. برای بررسی تأثیر کاهش چگالی اولیه بر میزان تابش ایکس برای هدف‌های طلا و سرب، ابتدا تغییر میزان تابش در سلول‌های مختلف هدف را بررسی می‌کنیم.

در شکل ۴-الف و ۴-ب نمودار تابش برحسب شمارهٔ سلول‌ها برای اهداف سرب و طلا با چگالی معمولی و با کاهش چگالی به میزان ۱/۲ و ۱/۴ نمایش داده شده است. شدت لیزر 10^{15} $W.cm^{-2}$ و طول پالس لیزر 2 ns است. باتوجه به شکل ۴-الف مشخص می‌شود که با کاهش چگالی اولیهٔ هدف، لایه‌های بیشتری در تابش ایکس سهیم خواهند شد. همان‌طورکه قبلاً بیان گردید، کاهش چگالی ماده باعث افزایش نفوذ پالس لیزر می‌شود و موجب افزایش دما و دانسیتهٔ الکترونی در لایه‌های درونی پلاسما و تولید اشعهٔ ایکس از آن‌ها می‌گردد. با مقایسهٔ شکل‌های ۴-الف و ۴-ب مشاهده می‌شود که با کاهش چگالی در هدف سربی، سلول‌های بیشتری نسبت به طلا در تابش ایکس شرکت می‌کنند که دلیل آن کمتر بودن ذاتی چگالی سرب نسبت به طلا و نفوذ بیشتر پالس لیزر در سرب است. نکتهٔ دیگری که از مقایسهٔ دو نمودار به‌دست می‌آید، بیشتر بودن مقدار عددی شدت تابش برای هدف طلا نسبت به هدف سرب است.

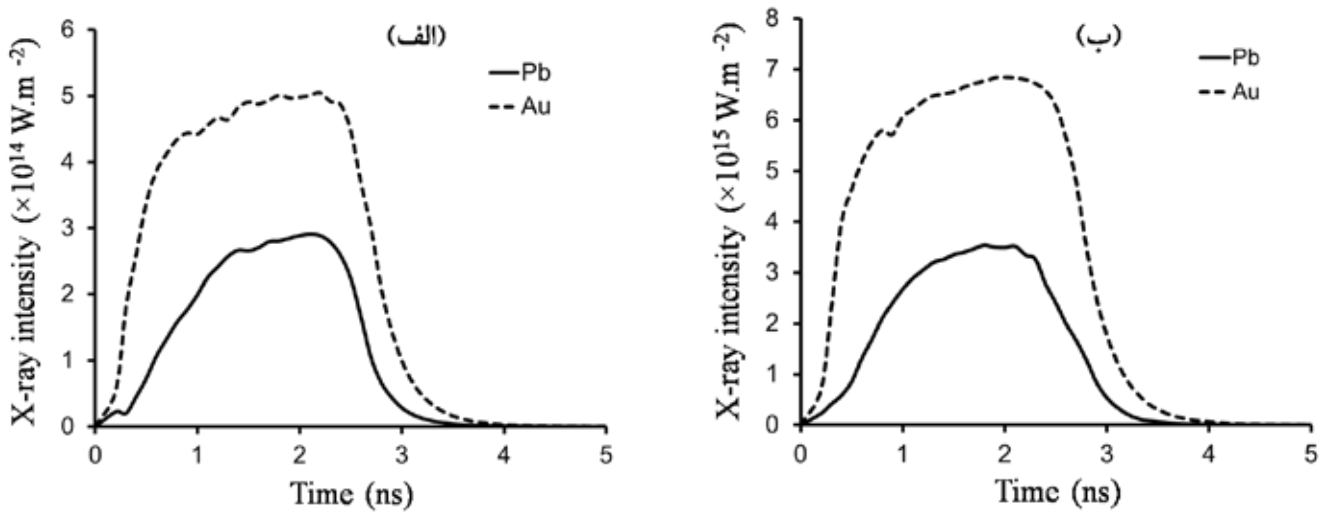
حال، تأثیر کاهش چگالی اولیهٔ سرب را بر مقدار کل تابش ایکس از آن بررسی می‌کنیم. شکل ۵ نمودار تابش ایکس کل بر حسب زمان را برای هدف سربی با چگالی جرمی کاهش‌یافته تحت تابش لیزر نشان می‌دهد. در این نتایج فرض شده است که چگالی اولیهٔ هدف به نسبت‌های ۱/۱۰، ۱/۴،۱/۲ و در مقایسه با چگالی عادی آن کاهش یافته باشد. همچنین نمودار تابش کل بر حسب زمان برای هدف طلا با چگالی معمولی نیز به منظور مقایسه آورده شده است.

همان‌طورکه مشاهده می‌شود با کاهش بیشتر چگالی اولیهٔ هدف سربی، افزایش قابل‌توجهی در تابش ایکس ایجاد می‌شود. علت این امر نفوذ بیشتر پالس لیزر و جذب بیشتر انرژی لیزر و درنتیجه افزایش قابل‌توجه دما و دانسیتهٔ الکترونی در پلاسما است که نتیجهٔ آن افزایش تابش ایکس است. تأثیر کاهش چگالی اولیهٔ هدف به‌گونه‌ای است که هم موجب افزایش کمیت و هم کیفیت در پرتوی ایکس ساطع‌شده می‌گردد. پی‌بردن به این موضوع که تابش از هدف سرب با چه چگالی اولیه‌ای با تابش از هدف طلا با چگالی عادی تقریباً برابری می‌کند به‌منظور مقایسه می‌تواند حائز اهمیت باشد. شکل ۵ نشان می‌دهد که با کاهش چگالی اولیهٔ سرب تا مقدار ۲۵/۰ نسبت به چگالی عادی، تابش ایکس از آن تقریباً با تابش ایکس از هدف طلا برابر می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که کاهش بیشتر چگالی اولیهٔ سرب به ۱/۰ مقدار عادی، تأثیر چندانی بر افزایش بیشتر تابش ایکس ندارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که هدف سربی با چگالی اولیه‌ای در محدودهٔ ۲۵/۰ تا ۱/۰ مقدار عادی می‌تواند تابش ایکسی تقریباً معادل با مقدار مربوط به هدف طلا تولید کند.

[Downloaded from icml.ir on 2025-11-04]

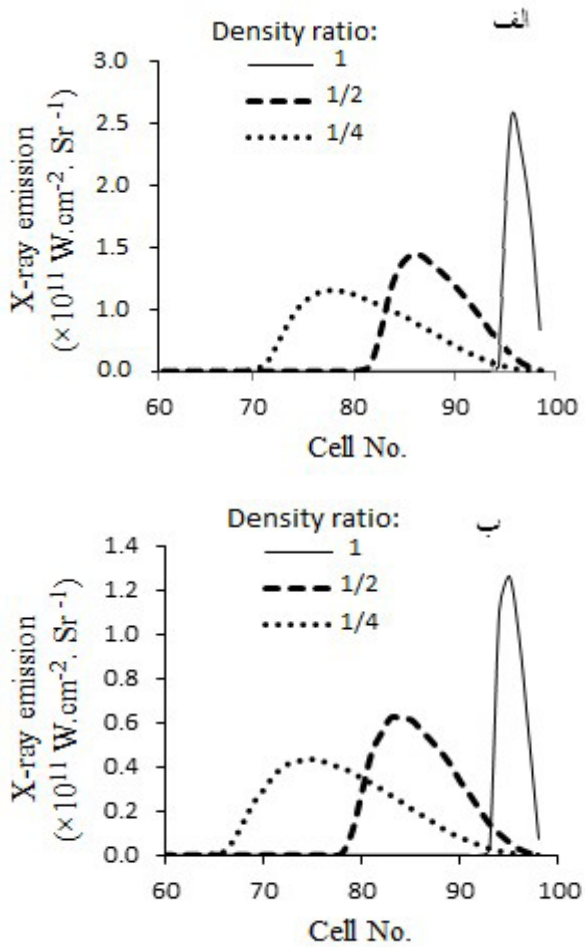


شکل۲: (الف و ب) تابش بازترکیب، (ج و د) تابش ترمزی از پلاسمای حاصل از برهمکنش پالس لیزری 2 ns با شدت‌های 10^{14} W.cm^{-2} و 10^{15} W.cm^{-2} با هدف طلا به ضخامت 200 μm نتایج مربوط است به زمان t=1 ns پس از آغاز برهمکنش

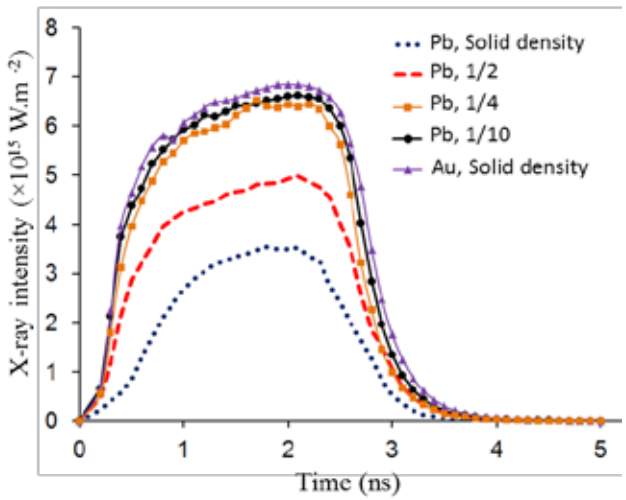


شکل۳: نمودار شدت تابش ایکس کل برحسب زمان برای دو هدف طلا و سرب با ضخامت 200 μm. الف: شدت پالس 10^{14} W.cm^{-2} و ب: شدت پالس 10^{15} W.cm^{-2}. طول پالس لیزر 2 ns می‌باشد.

[Downloaded from icml.ir on 2025-11-04]



شکل۴: تابش ایکس برحسب شـــمارهٔ سلول‌ها برای اهداف الف: طلا و ب: سرب با چگالی های اولیهٔ مختلف. شدت لیزر 10^{15} W.cm^{-2} و طول پالس لیزر 2 ns است.



شـــکل۵: نمودار تابش کل بر حســـب زمان برای تابش به هدف طلا بدون کاهش چگالی و سرب با کاهش چگالی به میزان ۱/۲ و ۱/۴ و ۱/۱۰

بحث و نتیجه‌گیری

از زمانی‌که اولین آزمایش‌ها در زمینهٔ برهمکنش لیزر با ماده انجام شـــد (اوایل دههٔ ۸۰)، مشـــخص شد که پلاســـماهای تولیدشده به‌وسیلهٔ لیزر منابع بسیار خوبی برای تابش الکترومغناطیسی در ناحیهٔ طیف اشعهٔ ایکس هســـتند. پالس‌های اشعهٔ ایکس تولیدشـــده از این طریق دارای روشنایی یا شـــدت بســـیار خوب و نیز طول پالس کوتاهی هستند. مشخصات این پالس‌ها ازجمله شـــدت و طول پالس را می‌توان با استفاده از پارامترهای لیزر و مادهٔ هدف کنترل نمود. چنین خواصی ســـبب شـــد که این منابع به‌طور گســـترده در بخش‌های پیشـــرفتهٔ علمی و فنی نظیر لیتوگرافی، تصویربرداری اشـــعهٔ ایکس، گداخت به‌روش محصورسازی لختی ICF[5]، لیزرهای اشـــعهٔ ایکس و علم مواد مورد اســـتفاده قرار گیرند [۶-۱]. یکی از مهم‌تریـــن این کاربردها در بخش پزشـــکی، فراهم کردن امکان تصویر برداری با وضوح بســـیار بـــالا از نمونه‌های زندهٔ بیولوژیک اســـت. در این مورد مدت‌زمان قرارگیری نمونه در معرض تابش اشعهٔ ایکس بسیار حائز اهمیت اســـت زیرا اگر این زمان طولانی باشـــد می‌تواند موجب تغییرات ســـاختاری در نمونه و نیز کاهش دقت و کیفیت تصویر شود. این زمان در مورد اشـــعهٔ ایکس حاصل از پلاسمای لیزری نسبت به سایر منابع مرسوم نظیر سینکروترون‌ها و پلاسمای حاصل از تخلیهٔ الکتریکی بسیار کوتاه‌تر است که یک مزیت عالی به‌شمار می‌رود.

ازطرف‌دیگر تصویربرداری از نمونه‌های بیولوژیکی زنده با وضوح بســـیار بالا نیاز به یک منبع اشـــعهٔ ایکس با شدت مناسب در ناحیهٔ طیفی پنجرهٔ آب (2.3-4.4 nm) دارد [۷]. اما، پلاســـمای حاصل از تابش‌دهی لیزری همهٔ مواد نمی‌تواند اشـــعهٔ ایکس با شـــدت مورد نیاز را تولید کند. شدت اشـــعهٔ ایکس حاصل از تابش‌دهی لیزری اهدافی مانند طلا مناسب است اما، بسیار پرهزینه است. برای مثال ایتو و همکاران در سال ۲۰۱۶ از تابش دهی لیزری هدف طلا برای تولید اشعهٔ ایکس به‌منظور تصویربرداری اشعهٔ ایکس از نمونه‌های زنده اســـتفاده کردند [۸]. آن‌ها از یک لایهٔ نازک طلا به‌عنوان هدف اســـتفاده کردند و آن را به‌وسیلهٔ یک پالس لیزر پرشدت با انرژی ۲۰ ژول و طول پالس ۶۰۰ پیکوثانیه تابش‌دهی کردند تا پلاسمای طلا تشـــکیل شود. پالس اشعهٔ ایکس تابش‌شـــده از این پلاسما در ناحیهٔ پنجرهٔ آب با شـــدت 1.4×10^{15} photons/pulse/sr اندازه‌گیری شد. اشعهٔ ایکس تابش‌شده با این شدت امکان ضبط یک تصویر میکروسکوپی از سلول‌های بیولوژیک زنده را با یک‌بار قرار گرفتن در معرض تابش پالس فراهم ساخت. همچنین ماســـیم و همکاران در سال ۲۰۱۶ از تابش‌دهی لیزری نانوذرات کروی طلا برای تولید اشعهٔ ایکس به‌منظور تصویربرداری اســـتفاده کردند [۲۷]. آن‌ها نشان دادند که با تغییر قطر نانوذرات، میزان تابش ایکس از آن‌ها تغییر می‌کند و برای قطری در حدود ۵۰-۴۰ نانومتر بیشـــترین مقدار تابش ایکس حاصل می‌شـــود. همچنین سو و همکاران

5. Inertial Confinement Fusion

[Downloaded from icml.ir on 2025-11-04]

نیز در سال ۲۰۱۸ از سوسپانسیون نانوکلوئیدی طلا به‌عنوان مادهٔ هدف استفاده کردند [۲۸]. آن‌ها از تکنیک دوپالسی برای تابش‌دهی لیزری هدف استفاده کردند و نشان دادند که با به‌کارگیری یک تأخیر زمانی مناسب بین دو پالس لیزر می‌توان تابش ایکس بهینه‌ای به‌دست آورد.

اما، باتوجه به هزینهٔ بالای اهداف طلا یافتن راه‌هایی برای افزایش شدت تابش ایکس از اهداف ارزان‌تر بسیار مطلوب است. بدین‌منظور باید جذب انرژی لیزر در مادهٔ هدف و نیز میزان تبدیل انرژی جذب‌شده به اشعهٔ ایکس را افزایش داد. تحقیقات در این زمینه نشان داده است که با ایجاد برخی تغییرات ساختاری در مادهٔ هدف می‌توان شدت تابش ایکس را بهبود داد. استفاده از اهداف ساختاری مانند گریتینگ یا ساختار سطحی توری‌مانند [۲۱]، نانوذرات [۱۹و۲۷]، آرایش نانولوله‌ها یا نانو سیم‌های فلزی [۲۲، ۲۹و۳۰]، اهداف گازی [۳۳-۳۱] و اهداف با چگالی کاهش‌یافته (متخلخل یا فوم‌مانند) [۲۰و۳۶-۳۴] می‌تواند باعث افزایش تابش اشعهٔ ایکس شود. استفاده از پیش‌پالس لیزری یا تکنیک دوپالسی نیز برای افزایش اشعهٔ ایکس پیشنهاد شده است [۱۷و۱۸]. در این میان نشان داده شده است که هدف‌های گازی می‌توانند به‌طور قابل‌توجهی بازده تبدیل انرژی لیزر به اشعهٔ ایکس را افزایش دهند اما، استفاده از آن‌ها شامل برخی مشکلات است. کار با چنین اهداف گازی کم‌چگال به‌صورت تجربی بسیار دشوار است و همچنین تنها در بعضی از محدوده‌های طول‌موجی محدود استفاده می‌شوند [۳۳]. در سال‌های اخیر تحقیقات انجام‌شده بر روی مواد با چگالی کاهش‌یافته مانند اهداف متخلخل یا فوم‌مانند، نشان داده است که چنین اهدافی میزان جذب لیزر را افزایش می‌دهند و منجر به افزایش تابش اشعهٔ ایکس می‌شوند [۳۷-۳۴]. چنین اهدافی می‌توانند جایگزینی مناسب برای مواد گازی باشند. همچنین ساخت و استفادهٔ تجربی از آن‌ها نسبت به سایر اهداف ساختاریافته ساده‌تر و ارزان‌تر است. برای مثال هارا و همکاران در سال ۲۰۱۸ از هدف متخلخل بیسموت با چگالی کاهش‌یافته تا ۷/۵ درصد استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که اشعهٔ ایکس حاصل از تابش‌دهی لیزری این هدف در ناحیهٔ پنجرهٔ آب نسبت به هدف با چگالی عادی بیشتر است. دنگ و همکاران نیز در سال ۲۰۱۸ تابش اشعهٔ ایکس از هدف طلا در شرایط چگالی عادی و چگالی کاهش‌یافته ($0.36\ g\ cm^{-3}$) را به‌صورت تجربی اندازه‌گیری کردند. آن‌ها از پالس‌های لیزری نانوثانیه با انرژی ۵۰۰ ژول برای تابش‌دهی اهداف استفاده کردند. نتایج نشان داد که با استفاده از هدف با چگالی اولیهٔ کاهش‌یافته، تابش اشعهٔ ایکس حدود ۲۱ درصد نسبت به هدف با چگالی عادی افزایش می‌یابد.

در مطالعهٔ حاضر هدف این است که نشان دهیم از طریق کاهش چگالی اولیهٔ یک هدف کم‌هزینه مانند سرب (نسبت به طلا) می‌توان تابش اشعهٔ ایکس از آن را تحت تابش لیزر تا حد قابل توجهی افزایش داد که بتواند جایگزین مناسبی برای مواد پرهزینه‌ای مانند طلا باشد. در این مقاله ابتدا تابش اشعهٔ ایکس از پلاسمای حاصل از تابش‌دهی لیزری طلا و سرب به‌منظور استفاده در میکروسکوپی اشعهٔ ایکس به‌صورت عددی شبیه‌سازی شد. مقایسهٔ طیف‌های تابشی ترمزی و بازترکیب نشان داد که در فرکانس‌های پایین، تابش ترمزی غالب است و در فرکانس‌های بالای طیف، تابش بازترکیب تأثیر بسیار بیشتری دارد. مشاهده شد که برای اهدافی با چگالی‌های عادی و در شرایط تابشی برابر، میزان تابش از هدف طلا به مقدار قابل توجهی بیشتر از سرب است. نشان داده شد که کاهش چگالی هدف که با روش‌های لایه‌نشانی خاصی قابل انجام است، به میزان زیادی موجب افزایش تابش اشعهٔ ایکس می‌شود. مشاهده شد که با استفاده از یک هدف سربی که چگالی اولیهٔ آن به مقداری در محدودهٔ ۰/۲۵ تا ۰/۱ نسبت به چگالی عادی کاهش یافته باشد، می‌توان اشعهٔ ایکسی تقریباً معادل با مقدار مربوط به طلا را به‌دست آورد. بنابراین، می‌توان با استفاده از فلزات ارزان با چگالی اولیهٔ مناسب، علاوه‌بر کاهش قابل توجه هزینه‌ها، اشعهٔ ایکسی با شدت و روشنایی بسیار مناسب تولید کرد که جهت تصویربرداری میکروسکوپی از نمونه‌های بیولوژیک با وضوح بسیار بالا قابل استفاده باشد. همچنین بهینه‌سازی تابش اشعهٔ ایکس از این طریق به‌طور چشمگیری کمک می‌کند تا زمان تابش‌دهی نمونه جهت تصویربرداری کاهش یابد و درنتیجه از ایجاد اثرهای مخرب روی ابزار اپتیکی و نیز نمونهٔ بیولوژیک جلوگیری شود.

[Downloaded from icml.ir on 2025-11-04]

References:

1. Bakshi, V. EUV Sources for Lithography. SPIE Press: 2006.

2. Su MG, Min Q, Cao SQ, Sun DX, Hayden P, O'Sullivan G, Dong CZ. Evolution analysis of EUV radiation from laser-produced tin plasmas based on a radiation hydrodynamics model. Sci Rep. 2017; 7(1): 45212.

3. Sakdinawat A, Attwood D. Nanoscale X-ray imaging. Nat Photonics. 2010; 4(12): 840-8.

4. Legall H, Blobel G, Stiel H, Sandner W, Seim C, Takman P, Martz DH, Selin M, Vogt U, Hertz HM, Esser D, Sipma H, Luttmann J, Höfer M, Hoffmann HD, Yulin S, Feigl T, Rehbein S, Guttmann P, Schneider G, Wiesemann U, Wirtz M, Diete W. Compact x-ray microscope for the water window based on a high brightness laser plasma source. Opt Express. 2012; 20(16): 18362.

5. Fazeli R. Tuning laser plasma x-ray source for single shot microscopy using nano-porous targets. Opt. Lett. 2016; 41(22): 5250.

6. Glenzer SH, Spears BK, Edwards MJ. First implosion experiments with cryogenic thermonuclear fuel on the National Ignition Facility. Plasma Phys Control Fusion. 2012; 54(4): 45013.

7. Higashiguchi T, Otsuka T, Jiang W. Efficient "water window" soft x-ray high-Z plasma source. J Phys Conf Ser. 2013; 463(1): 12024.

8. Ito A, Inoue T, Kado M, Ohigashi T, Tone S, Shinohara K. Biomedical Application of Soft X-ray Microscopy with Special Reference to Spectromicroscopy. Acta Phys Pol A. 2016; 129(2): 260-3. doi:10.12693/APhysPolA.129.260.

9. Fazeli R. Enhanced X-ray emission from laser-produced gold plasma by double pulses irradiation of nano-porous targets. Phys Lett A. 2017; 381(5): 467-71.

10. Shang W, Yang J, Dong Y. Enhancement of laser to x-ray conversion with a low density gold target. Appl Phys Lett. 2013; 102(9): 94105.

11. Suter L, Rothenberg J, Munro D, Wonterghem B Van, Haan S. Exploring the limits of the National Ignition Facility's capsule coupling. Phys Plasmas. 2000; 7(5): 2092.

12. Wilkens HL, Gunther J, Mauldin MP. Progress in Coating Multi-Layered Cocktail Hohlraums. Fusion Sci Technol. 2006; 49(4): 846-50.

13. Wilkens HL, Nikroo A, Wall DR, Wall JR. Developing depleted uranium and gold cocktail hohlraums for the National Ignition Facility. Phys Plasmas. 2007; 14(5): 56310.

14. Jones OS, Schein J, Rosen MD, Suter LJ, Wallace RJ, Dewald EL, Glenzer SH, Campbell KM, Gunther J, Hammel BA, Landen OL, Sorce CM, Olson RE, Rochau GA, Wilkens HL, Kaae JL, Kilkenny JD, Nikroo A, Regan SP. Proof of principle experiments that demonstrate utility of cocktail hohlraums for indirect drive ignition. Phys Plasmas. 2007; 14(5): 56311.

15. Schein J, Jones O, Rosen M, Dewald E, Glenzer S, Gunther J, Hammel B, Landen O, Suter L, Wallace R. Demonstration of Enhanced Radiation Drive in Hohlraums Made from a Mixture of High- Z Wall Materials. Phys Rev Lett. 2007; 98(17): 175003.

16. Rosen MD, Hammer JH. Analytic expressions for optimal inertial-confinement-fusion hohlraum wall density and wall loss. Phys Rev E. 2005; 72(5): 56403.

17. Fazeli R, Mahdieh MH. Comparison of line x-ray emission from solid and porous nano-layer coated targets irradiated by double laser pulses. Phys Plasmas. 2015; 22(11): 113303.

18. Freeman JR, Harilal SS, Hassanein A. Enhancements of extreme ultraviolet emission using prepulsed Sn laser-produced plasmas for advanced lithography applications. J Appl Phys. 2011; 110(8): 83303.

19. Rajeev PP, Taneja P, Ayyub P, Sandhu AS, Kumar GR. Metal Nanoplasmas as Bright Sources of Hard X-Ray Pulses. Phys Rev Lett. 2003; 90(11): 115002.

20. Okuno T, Fujioka S, Nishimura H, Tao Y, Nagai K, Gu Q, Ueda N, Ando T, Nishihara K, Norimatsu T, Miyanaga N, Izawa Y, Mima K, Sunahara A, Furukawa H, Sasaki A. Low-density tin targets for efficient extreme ultraviolet light emission from laser-produced plasmas. Appl Phys Lett. 2006; 88(16): 161501.

21. Gordon SP, Donnelly T, Sullivan A, Hamster H, Falcone RW. X rays from microstructured targets heated

[Downloaded from icml.ir on 2025-11-04]

by femtosecond lasers. Opt Lett. 1994; 19(7): 484.

22. Mondal S, Chakraborty I, Ahmad S, Carvalho D, Singh P, Lad AD, Narayanan V, Ayyub P, Kumar GR, Zheng J, Sheng ZM. Highly enhanced hard x-ray emission from oriented metal nanorod arrays excited by intense femtosecond laser pulses. Phys Rev B. 2011; 83(3): 35408.

23. Pert GJ. The hybrid model and its application for studying free expansion. J Fluid Mech. 1983; 131(1): 401.

24. Griem HR. Plasma Spectroscopy. McGraw-Hill: New York, 1964.

25. Cooper J. Plasma spectroscopy. Reports Prog Phys. 1966; 29(1): 302.

26. Turcu ICF. X-Rays from Laser Plasmas, Generation and Application. John Wiley & Sons: New York, 1999.

27. Masim FCP, Porta M, Hsu W-H, Nguyen MT, Yonezawa T, Balčytis A, Juodkazis S, Hatanaka K. Au Nanoplasma as Efficient Hard X-ray Emission Source. ACS Photonics. 2016; 3(11): 2184-90.

28. Hsu W-H, Masim FCP, Balčytis A, Huang HH, Yonezawa T, Kuchmizhak AA, Juodkazis S, Hatanaka K. Enhancement of X-ray emission from nanocolloidal gold suspensions under double-pulse excitation. Beilstein J Nanotechnol. 2018; 9(1): 2609-17.

29. Purvis MA, Shlyaptsev VN, Hollinger R, Bargsten C, Pukhov A, Prieto A, Wang Y, Luther BM, Yin L, Wang S, Rocca JJ. Relativistic plasma nanophotonics for ultrahigh energy density physics. Nat Photonics. 2013; 7(10): 796-800.

30. Van Dao L, Hannaford P. Nanophotonics for plasma heating. Nat Photonics. 2013; 7(10): 771-2.

31. Müller M, Mey T, Niemeyer J, Mann K. Table-top soft x-ray microscope using laser-induced plasma from a pulsed gas jet. Opt Express. 2014; 22(19): 23489.

32. Mey T, Rein M, Großmann P, Mann K. Brilliance improvement of laser-produced soft x-ray plasma by a barrel shock. New J Phys. 2012; 14(7): 73045.

33. Back CA, Grun J, Decker C, Suter LJ, Davis J, Landen OL, Wallace R, Hsing WW, Laming JM, Feldman U, Miller MC, Wuest C. Efficient Multi-keV Underdense Laser-Produced Plasma Radiators. Phys Rev Lett. 2001; 87(27): 275003.

34. Hara H, Kawasaki H, Tamura T, Hatano T, Ejima T, Jiang W, Ohashi H, Namba S, Sunahara A, Sasaki A, Nishikino M, O'Sullivan G, Higashiguchi T. Emission of water-window soft x-rays under optically thin conditions using low-density foam targets. Opt. Lett. 2018; 43(15): 3750.

35. Dong Y, Yang J, Song T, Shang W, Zhang L, Huang C, Zhu T, Zhang W, Li Z, Zhan X, Du H, Wang F, Liu S, Jiang S, Ding Y. Efficient soft x-ray sources from laser-irradiated gold foam targets with well-controlled impurities. Nucl Fusion. 2018; 58(1): 16038.

36. Shang W, Yu R, Zhang W, Yang J. Optimization of x-ray emission from under-critical CH foam coated gold targets by laser irradiation. Nucl Fusion. 2016; 56(8): 86002.

37. Fazeli R. Enhanced X-ray emission from laser-produced gold plasma by double pulses irradiation of nano-porous targets. Phys Lett A. 2017; 381(5): 467-71.

[Downloaded from icml.ir on 2025-11-04]