

افزایش تابش اشعه ایکس در تابش دهی لیزری فلزات جهت استفاده در میکروسکوپی اشعه ایکس با وضوح بالا: تأثیر چگالی اولیه هدف

خلاصه

هدف: پلاسمای حاصل از برهمکنش لیزر با ماده یکی از منابع جدید اشعه ایکس است که از خصوصیات بسیار خوبی نظیر طول زمانی بسیار کوتاه و شدت یا روشنایی بالا برخوردار است. در نتیجه، به عنوان یکی از کاربردها جهت تصویربرداری از نمونه‌های بیولوژیک بسیار مناسب است. در این زمینه فلز طلا نسبت به سایر اهداف، تابش ایکس بیشتری به دست می‌دهد. اما، دانشمندان به منظور کاهش هزینه‌ها به دنبال استفاده از مواد ارزان تری هستند. در این مقاله با استفاده از شبیه‌سازی‌های هیدرودینامیکی نشان می‌دهیم که با کاهش چگالی اولیه سرب تا یک حد مشخصی می‌توان میزان اشعه ایکس حاصل از تابش دهی لیزری آن را به مقدار قابل توجهی افزایش داد.

روش بررسی: در این مطالعه برهمکنش لیزر با ماده هدف و تشکیل و انبساط پلازما به وسیله یک کد هیدرودینامیکی به نام EHYBRID شبیه‌سازی شده است. سپس روابط فیزیکی مربوط به تولید اشعه ایکس از پلازما 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 اشعه ایکس تولید شده در سلول‌های مختلف پلازما 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 اشعه ایکس مورد بررسی قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان دادند که با در نظر گرفتن چگالی عادی برای دو فلز، میزان تابش ایکس از پلاسمای طلا بیشتر است. اما، با استفاده از یک هدف سربی با چگالی اولیه کاهش یافته می‌توان تابش ایکس از پلاسمای حاصل از آن را تا مقدار مربوط به طلا افزایش داد. در واقع چگالی اولیه سرب باید به مقداری بین $0/25$ تا $0/1$ چگالی عادی کاهش داده شود.

نتیجه‌گیری: تابش اشعه ایکس از پلاسمای حاصل از تابش دهی لیزری دو فلز طلا و سرب به منظور استفاده در میکروسکوپی اشعه ایکس به صورت عددی شبیه‌سازی شد. نتایج حاصل از این مطالعه نشان دادند که کاهش چگالی اولیه 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 اولیه مناسب، علاوه بر کاهش قابل توجه هزینه‌ها اشعه 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 اشعه ایکس از پلازما، میکروسکوپی اشعه ایکس

رضا فاضلی^۱
ساسان تیزرو^۲

۱. استادیار، گروه اپتیک و لیزر، دانشکده 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

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

مقدمه

یکی از بهترین منابع تابش الکترومغناطیسی در محدوده طیفی اشعه ایکس، پلاسماهای حاصل از برهمکنش لیزر با ماده می‌باشد. با تابش دهی یک ماده هدف مناسب به وسیله پالس لیزری پرتوان، پلاسمایی تولید می‌شود که می‌تواند دانسیته الکترونی از مرتبه 10^{23} cm^{-3} و درجه حرارت‌هایی به میزان چندین کیلو الکترون ولت داشته باشد. این شرایط باعث می‌شود که پلاسماهای لیزری منبع بسیار مناسبی برای تابش اشعه ایکس شود. اشعه ایکس تولیدشده از این روش دارای روشنایی یا شدت بالا، طول زمانی کوتاه، اندازه کوچک و ثبات فضایی بسیار خوبی است که باعث کاربرد روزافزون این منابع در بخش‌های متنوعی نظیر لیتوگرافی با دقت بالا [۱ و ۲]، میکروسکوپی اشعه ایکس [۳-۵] و گداخت لیزری [۶] شده است. به‌ویژه اشعه ایکس در محدوده طول موجی 4.4-2.3 نانومتر که به محدوده پنجره آب (Water-Window Region) معروف است، برای تصویربرداری از نمونه‌های زیستی زنده با کنتراست بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد زیرا آب در این محدوده طیفی تقریباً شفاف است [۷ و ۴]. اما، منابع مرسوم و سنتی اشعه ایکس یعنی همان منابع تابشی سینکروترون (Synchrotron Radiation Sources) می‌توانند پرتوهای ایکس نرم (Soft x-ray) با توان متوسط بالا را در محدوده طول موجی پنجره آب و نیز دیگر طول موج‌ها تولید کنند. با این حال، حداکثر روشنایی اشعه ایکس حاصل از آن‌ها نسبت به یک پلاسماهای لیزری کمتر است و این امر باعث می‌شود که زمان تابش دهی نمونه جهت تصویربرداری حدود چند میلی ثانیه باشد. اما، پلاسماهای تولیدشده توسط لیزر می‌تواند اشعه 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 یک سو باعث کاهش تخریب تصویر یا تار شدن آن در اثر حرکت نمونه شود و از سوی دیگر از ایجاد تغییرات ساختاری ناشی از تابش اشعه ایکس در نمونه جلوگیری کند.

در میان فلزات مختلف به‌عنوان ماده هدف برای تولید پلاسماهای لیزری، فلز طلا به دلیل تولید اشعه ایکس مناسب و نیز پایین بودن اتلاف انرژی به‌عنوان ماده هدف بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۸-۱۰]. (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 [۱۱-۱۶]). مسلماً استفاده از طلا در چنین مواردی باعث بالا رفتن هزینه‌ها می‌شود. به همین دلیل دانشمندان به دنبال مواد ارزان تری هستند که در عین حال بتواند اشعه ایکس مورد نیاز را به میزان مناسب تولید کند. بنابراین باید از روش‌هایی برای افزایش میزان تابش اشعه 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 پلاسماهای لیزری شده است. تأثیر شرایط مختلف پالس لیزر و ماده هدف بر میزان تابش اشعه ایکس موضوع بسیاری از مطالعات اخیر در زمینه برهمکنش لیزر با ماده بوده است. در این زمینه روش‌های مختلفی ارائه شده است که در واقع به بهینه‌سازی شرایط لیزر و یا هدف مورد استفاده می‌پردازند. برای نمونه استفاده از تکنیک پیش پالس یا دوپالسی [۱۷ و ۱۸] 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 اولیه یک فلز ارزان قیمت مانند سرب می‌توان تابش ایکس از پلاسماهای حاصل از تابش دهی لیزری آن را تا حد قابل توجهی افزایش داد که بتواند جایگزین مناسبی برای ماده گران قیمتی مانند طلا باشد. در این مقاله، مطالعات به صورت مقایسه‌ای بین دو عنصر سرب و طلا که دارای ویژگی‌های مناسب برای تولید اشعه ایکس هستند، انجام گرفته است. برهمکنش پالس‌های لیزری پرتوان با این دو فلز به وسیله یک کد هیدرودینامیکی شبیه‌سازی شده است. سپس با استفاده از اطلاعات به دست آمده و کدهای کامپیوتری نوشته‌شده بر اساس روابط مربوط، تابش اشعه ایکس پیوسته (ترمزی و باز ترکیب) از پلاسما محاسبه شده است. سپس تأثیر کاهش چگالی اولیه اهداف مورد استفاده بر میزان تابش ایکس مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت چگالی اولیه مناسبی برای سرب به دست آمده است که بتواند باعث تولید میزان مناسب اشعه ایکس شود، به طوری که 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 نسخه 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 معادله حالت را با توجه به شرایط مرزی حل می‌نماید و پارامترهای پلاسما را بر حسب زمان در ۹۸ سلول محاسباتی به دست می‌دهد. این کد برای شبیه‌سازی اثرهای پالس‌های نانو ثانیه و پیکوثانیه ($>10 \text{ ps}$) مناسب است و قابلیت اعمال دو پالس لیزری و نیز شبیه‌سازی اهداف دو لایه را نیز دارد. برای ماده هدف، نود و هشت لایه موازی در نظر گرفته شده است که لیزر از لایه نود و هشتم به صورت عمود بر سطح لایه وارد ماده هدف می‌شود.

با جای گذاری اطلاعات مربوط به ماده هدف از جمله چگالی جرمی، ضخامت و انرژی یونیزاسیون الکترون‌های آن و همچنین خصوصیات

با فرض یک توزیع سرعت ماکسولی برای الکترون‌ها و یون‌ها، میزان تابش ایکس از طریق تابش ترمزی برحسب فرکانس را می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود [۲۴ و ۲۵]:

$$\epsilon_B^v = \frac{32\pi}{3} \left(\frac{2\pi}{3kT_e m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{ze^6 n_e^2}{m_e c^3} \exp\left(-\frac{hv}{kT_e}\right) \quad (1)$$

که در آن m_e ، n_e ، T_e و e به ترتیب جرم، دانسیته عددی، دما و بار الکترون می‌باشند. پارامترهای c ، Z ، k و h نیز به ترتیب سرعت نور در خلأ، درجه یونیزاسیون یون‌ها، ثابت بولتزمن و ثابت پلانک هستند. شکل عددی رابطه فوق به صورت زیر خواهد بود:

$$\epsilon_B^v = 6.8 \times 10^{-38} z n_e^2 T_e^{-\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{hv}{kT_e}\right) \text{ erg sec}^{-1} \text{ cm}^{-3} \text{ Hz}^{-1} \quad (2)$$

در تابش بازترکیب، الکترون آزاد توسط یک اتم یونیزه با درجه یونیزاسیون $Z+1$ جذب می‌شود و در نتیجه الکترون به حالت مقید اتم یونیزه با درجه یونیزاسیون Z گذار می‌کند. بدین ترتیب یک فوتون با انرژی زیر ساطع می‌گردد:

$$hv = \frac{1}{2} m_e v^2 + E_Z^n \quad (3)$$

که در آن عبارت اول و دوم در سمت راست معادله نشان‌دهنده انرژی جنبشی اولیه الکترون و انرژی تراز نهایی هستند و n عدد کوانتومی اصلی است. از آنجاکه انرژی اولیه الکترون می‌تواند مقادیر پیوسته داشته باشد، تابش ایجادشده دارای طیف پیوسته خواهد بود. باتوجه به رابطه فوق می‌توان نتیجه گرفت که گذارهای بازترکیب در شرط $hv \geq E_Z^n$ (لبه بازترکیب) صدق می‌کنند به طوری که طیف تابش شده به دلیل 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 درجه یونیزاسیون Z_i را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد [۲۴ و ۲۵]:

$$\epsilon_R^{v,n} = n_e \sum_{i=1}^Z n_i Z_i^2 \frac{16\sqrt{2\pi} Z_i^2 e^6 \sqrt{m_e}}{3\sqrt{3} m_e^2 c^3 (kT_e)^{3/2}} \chi \frac{G_R}{n^3} \exp\left(\frac{\chi}{n^2 kT_e} - \frac{hv}{kT_e}\right) \quad (4)$$

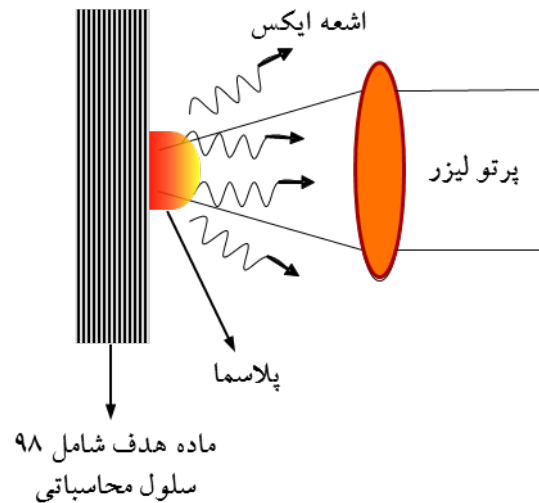
$$\chi = \frac{2\pi^2 m_e e^4 Z_i^2}{h^2}$$

که در آن n_i دانسیته عددی یون‌های با درجه یونیزاسیون Z_i است و پارامتر G_R ضریب گانت نام دارد که می‌توان آن را با تقریب خوبی برابر واحد در نظر گرفت [۲۶].

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

پالس لیزر در ورودی کد، می‌توان اطلاعات مورد نیاز مربوط به پلاسما تشکیل‌شده را برحسب زمان و در هر سلول محاسباتی به دست آورد. از مقادیر به دست آمده از جمله دما و دانسیته الکترونی، برای محاسبه تابش ایکس پیوسته از پلاسما استفاده می‌شود که این کار به وسیله برنامه 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، باز ترکیب یا آزاد-مقید^۲ و خط یا مقید-مقید^۳ انجام می‌شود [۲۴ و ۲۵]. 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، نتیجه گذار الکترون‌های مقید از ترازهای برانگیخته به ترازهای انرژی پایین‌تر یون‌ها است. در این تحقیق به طور خاص گسیل اشعه ایکس از طریق تابش‌های پیوسته ترمزی و بازترکیب در نظر گرفته شده است. محاسبه تابش خط از پلاسما شامل محاسبات بسیار پیچیده‌تری است. به همین دلیل این فرآیند در تحقیق جداگانه‌ای مورد بررسی قرار خواهد گرفت. البته باید توجه داشت که قسمت عمده تابش ایکس در محدوده طول موجی مورد نظر در این تحقیق، ناشی از تابش‌های پیوسته می‌باشد.



شکل ۱: هدف فلزی تحت تابش لیزر، تشکیل پلاسما و تابش اشعه ایکس

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

4. Gaunt factor

$10^{14} \text{ W.cm}^{-2}$ تفاوت کمتری در تابش منتشر شده 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 بر حسب شماره 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 $10^{15} \text{ W.cm}^{-2}$ و طول پالس لیزر 2 ns است. با توجه به شکل ۴-الف مشخص می‌شود که با کاهش چگالی اولیه هدف، لایه‌های بیشتری در تابش ایکس سهیم خواهند شد. همان‌طور که قبلاً بیان گردید، کاهش چگالی ماده باعث افزایش نفوذ پالس لیزر می‌شود و موجب افزایش دما و دانسیته الکترونی در لایه‌های درونی پلاسما و تولید اشعه ایکس از آن‌ها می‌گردد. با مقایسه 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. نکته دیگری که از مقایسه دو نمودار به دست می‌آید، بیشتر بودن مقدار عددی شدت تابش برای هدف طلا نسبت به هدف سرب است.

حال، تأثیر کاهش چگالی اولیه 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 کاهش یافته تحت تابش لیزر نشان می‌دهد. در این نتایج فرض شده است که چگالی اولیه هدف به نسبت‌های ۱/۱۰، ۱/۲، ۱/۴ 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.

همان‌طور که مشاهده می‌شود با کاهش بیشتر چگالی اولیه هدف سربی، افزایش قابل توجهی در تابش ایکس ایجاد می‌شود. علت این امر نفوذ بیشتر پالس لیزر و جذب بیشتر انرژی لیزر و در نتیجه افزایش قابل توجه دما و دانسیته الکترونی در پلاسما است که نتیجه آن افزایش تابش ایکس است. تأثیر کاهش چگالی اولیه هدف به گونه‌ای است که هم موجب افزایش کمیت و هم کیفیت در پرتوی ایکس ساطع شده 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 به منظور مقایسه می‌تواند حائز اهمیت باشد. شکل ۵ نشان می‌دهد که با کاهش چگالی اولیه 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 اولیه 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 محدوده ۲۵/۰ تا ۱/۰ مقدار عادی می‌تواند تابش ایکسی تقریباً معادل با مقدار مربوط به هدف طلا تولید کند.

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

جدول ۱: مشخصات اصلی لیزر و ماده هدف مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها

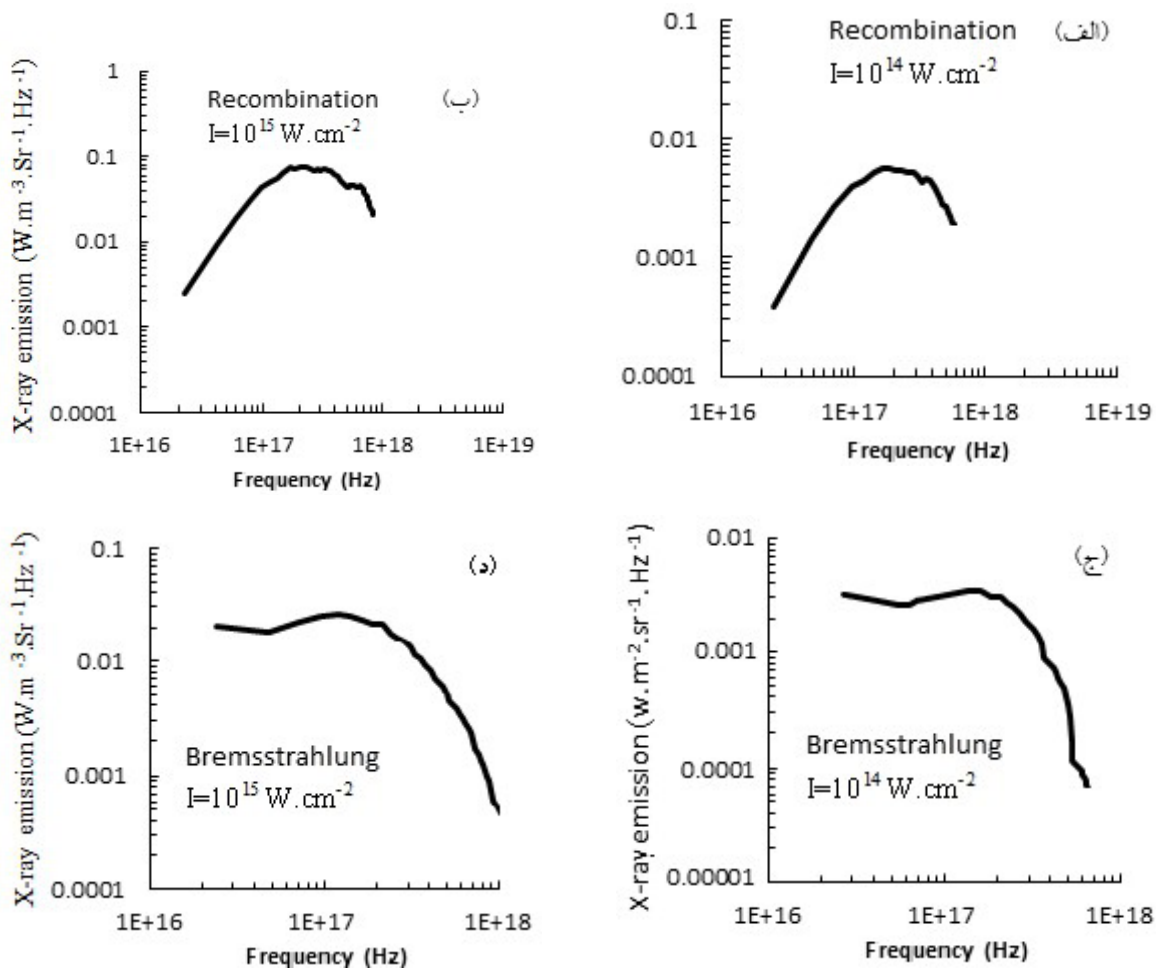
ضخامت (μm)	ماده هدف	شعاع نقطه کانونی لیزر (μm)	طول پالس (ns)	طول موج (μm)	شدت لیزر (W/cm^2)
200	Au, Pb	100	2	0.351	$10^{14}, 10^{15}$

یافته‌ها

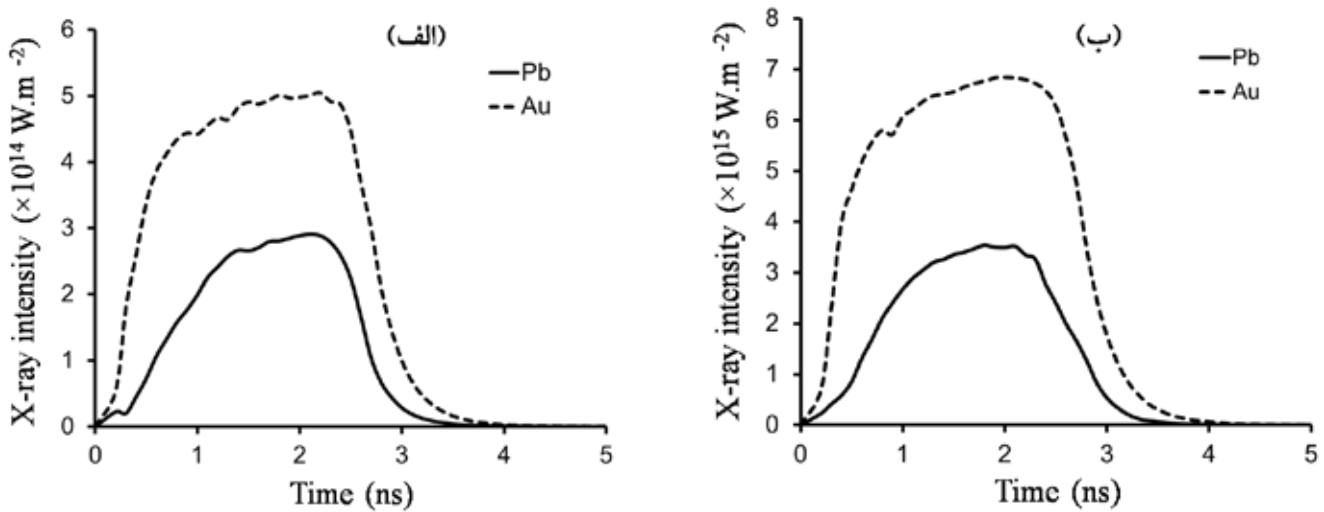
شکل‌های ۲-الف و ۲-ب میزان تابش اشعه ایکس باز ترکیب (Recombination) را برای پلاسما تولید شده از هدف طلا با ضخامت $200 \mu\text{m}$ در تابش دهی به وسیله پالس لیزری با طول پالس 2 ns اما با شدت‌های متفاوت $10^{14} \text{ W.cm}^{-2}$ و $10^{15} \text{ W.cm}^{-2}$ نشان می‌دهد. همچنین شکل‌های ۲-ج و ۲-د نشان‌دهنده تابش ایکس ترمزی (Bremsstrahlung) از پلاسما است. مقادیر به دست آمده مربوط به زمان $t=1 \text{ ns}$ پس از شروع تابش دهی است. همان‌طور که مشاهده می‌کنیم با افزایش شدت پالس لیزر به $10^{15} \text{ W.cm}^{-2}$ میزان تابش‌ها حدوداً به میزان ده برابر افزایش پیدا کرده است. مقایسه طیف‌های تابشی ترمزی و باز ترکیب نشان می‌دهد که در فرکانس‌های پایین، تابش ترمزی غالب است و در فرکانس‌های بالای طیف، تابش باز ترکیب 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 باز ترکیب تابش شده از تمام سلول‌ها که در کل بازه فرکانسی انتگرال گیری شده است. شکل‌های ۳-الف و ۳-ب میزان تابش کل بر حسب زمان را برای طلا و سرب در دو شدت لیزری $10^{14} \text{ W.cm}^{-2}$ و $10^{15} \text{ W.cm}^{-2}$ نشان می‌دهند. اهداف مورد نظر با ضخامت $200 \mu\text{m}$ در نظر 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 زمانی که 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



شکل ۲: (الف و ب) تابش باز ترکیب، (ج و د) تابش ترمزی از پلاسمای حاصل از برهمکنش پالس لیزری 2 ns با شدت های $10^{14} \text{ W.cm}^{-2}$ و $10^{15} \text{ W.cm}^{-2}$ با هدف طلا به ضخامت $200 \mu\text{m}$ نتایج مربوط است به زمان $t=1 \text{ ns}$ پس از آغاز برهمکنش

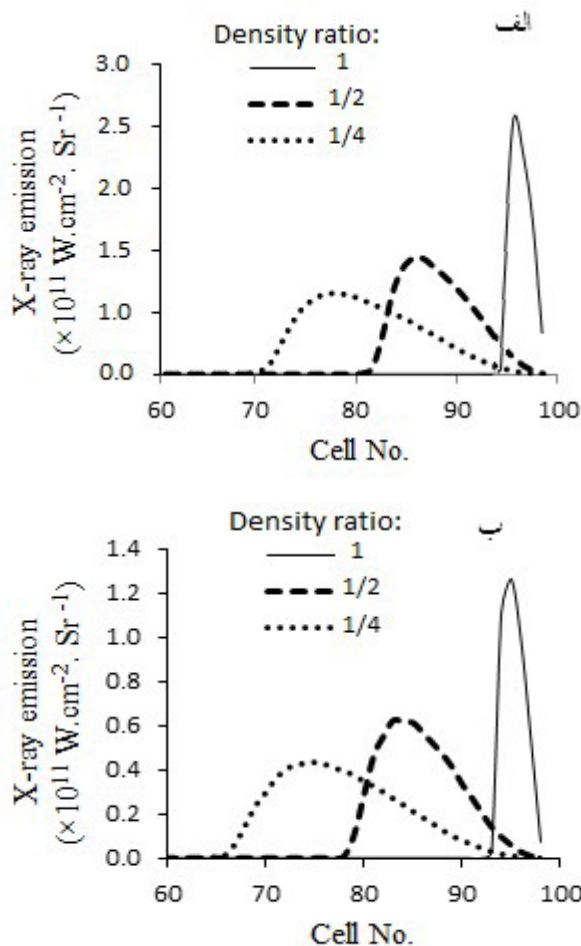


شکل ۳: نمودار شدت تابش ایکس کل برحسب زمان برای دو هدف طلا و سرب با ضخامت $200 \mu\text{m}$. الف: شدت پالس $10^{14} \text{ W.cm}^{-2}$ و ب: شدت پالس $10^{15} \text{ W.cm}^{-2}$. طول پالس لیزر 2 ns می باشد.

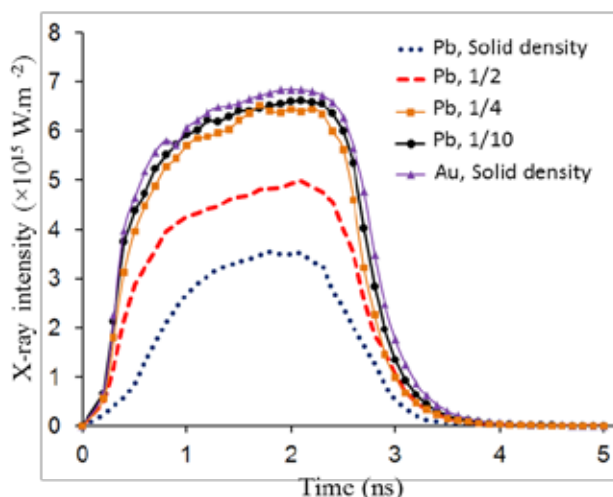
بحث و نتیجه‌گیری

از زمانی که اولین آزمایش‌ها در زمینهٔ برهمکنش لیزر با ماده انجام شد (اوایل دههٔ ۸۰)، مشخص شد که پلاسماهای تولیدشده به وسیلهٔ لیزر منابع بسیار خوبی برای تابش الکترومغناطیسی در ناحیهٔ طیف اشعهٔ ایکس هستند. پالس‌های اشعهٔ ایکس تولیدشده از این طریق دارای روشنایی یا شدت بسیار خوب و نیز طول پالس کوتاهی هستند. مشخصات این پالس‌ها از جمله شدت و طول پالس را می‌توان با استفاده از پارامترهای لیزر و مادهٔ هدف کنترل نمود. چنین خواصی سبب شد که این منابع به‌طور گسترده در بخش‌های پیشرفتهٔ علمی و فنی نظیر لیتوگرافی، تصویربرداری اشعهٔ ایکس، گداخت به‌روش محصورسازی لختی ICF، لیزرهای اشعهٔ ایکس و علم مواد مورد استفاده قرار گیرند [۶-۱۱]. یکی از مهم‌ترین این کاربردها در بخش پزشکی، فراهم کردن امکان تصویربرداری با وضوح بسیار بالا از نمونه‌های زندهٔ بیولوژیک است. در این مورد مدت‌زمان قرارگیری نمونه در معرض تابش اشعهٔ ایکس بسیار حائز اهمیت است زیرا اگر این زمان طولانی باشد می‌تواند موجب تغییرات ساختاری در نمونه و نیز کاهش دقت و کیفیت تصویر شود. این زمان در مورد اشعهٔ ایکس حاصل از پلاسما لیزری نسبت به سایر منابع مرسوم نظیر سینکروترون‌ها و پلاسما حاصل از تخلیهٔ الکتریکی بسیار کوتاه‌تر است که یک مزیت عالی به‌شمار می‌رود.

از طرف دیگر تصویربرداری از نمونه‌های بیولوژیکی زنده با وضوح بسیار بالا نیاز به یک منبع اشعهٔ ایکس با شدت مناسب در ناحیهٔ طیفی پنجرهٔ آب (۲.۳-۴.۴ nm) دارد [۷]. اما، پلاسما حاصل از تابش‌دهی لیزری همهٔ مواد نمی‌تواند اشعهٔ ایکس با شدت مورد نیاز را تولید کند. شدت اشعهٔ ایکس حاصل از تابش‌دهی لیزری اهدافی مانند طلا مناسب است اما، بسیار پرهزینه است. برای مثال ایتو و همکاران در سال ۲۰۱۶ از تابش‌دهی لیزری هدف طلا برای تولید اشعهٔ ایکس به‌منظور تصویربرداری اشعهٔ ایکس از نمونه‌های زنده استفاده کردند [۸]. آن‌ها از یک لایهٔ نازک طلا به‌عنوان هدف استفاده کردند و آن را به‌وسیلهٔ یک پالس لیزر پرشدت با انرژی ۲۰ ژول و طول پالس ۶۰۰ پیکوثانیه تابش‌دهی کردند تا پلاسما طلا تشکیل شود. پالس اشعهٔ ایکس تابش‌شده از این پلاسما در ناحیهٔ پنجرهٔ آب با شدت 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 ماسیم و همکاران در سال ۲۰۱۶ از تابش‌دهی لیزری نانوذرات کروی طلا برای تولید اشعهٔ ایکس به‌منظور تصویربرداری استفاده 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 بیشترین مقدار تابش ایکس حاصل می‌شود. همچنین سو و همکاران



شکل ۴: تابش ایکس برحسب شمارهٔ سلول‌ها برای اهداف الف: طلا و ب: سرب با چگالی‌های اولیهٔ مختلف. شدت لیزر 10^{15} W.cm⁻² و طول پالس لیزر 2 ns است.



شکل ۵: نمودار تابش کل بر حسب زمان برای تابش به هدف طلا بدون کاهش چگالی و سرب با کاهش چگالی به میزان ۱/۲ و ۱/۴ و ۱/۱۰

5. Inertial Confinement Fusion

استفاده در میکروسکوپی اشعه ایکس به صورت عددی شبیه‌سازی شد. مقایسه 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 اشعه ایکس می‌شود. مشاهده شد که با استفاده از یک هدف سربی که چگالی اولیه آن به مقداری در محدوده 0.25 تا 0.1 نسبت به چگالی عادی کاهش یافته باشد، می‌توان اشعه ایکسی تقریباً معادل با مقدار مربوط به طلا را به دست آورد. بنابراین، می‌توان با استفاده از فلزات ارزان با چگالی اولیه مناسب، علاوه بر کاهش قابل توجه هزینه‌ها، اشعه 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 اشعه ایکس از این طریق به‌طور چشمگیری کمک می‌کند تا زمان تابش‌دهی نمونه جهت تصویربرداری کاهش یابد و در نتیجه از ایجاد اثرهای مخرب روی ابزار اپتیکی و نیز نمونه بیولوژیک جلوگیری شود.

نیز در سال ۲۰۱۸ از سوسپانسیون نانوکلوئیدی طلا به‌عنوان ماده 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 به دست آورد.

اما، با توجه به هزینه بالای اهداف طلا یافتن راه‌هایی برای افزایش شدت تابش ایکس از اهداف ارزان‌تر بسیار مطلوب است. بدین منظور باید جذب انرژی لیزر در ماده هدف و نیز میزان تبدیل انرژی جذب‌شده به اشعه ایکس را افزایش داد. تحقیقات در این زمینه نشان داده است که با ایجاد برخی تغییرات ساختاری در ماده هدف می‌توان شدت تابش ایکس را بهبود داد. استفاده از اهداف ساختاری مانند گریتنینگ یا ساختار سطحی توری‌مانند [۲۱]، نانوذرات [۲۷ و ۱۹]، آرایش نانولوله‌ها یا نانو سیم‌های فلزی [۲۲، ۲۹ و ۳۰]، اهداف گازی [۳۱-۳۳] و اهداف با چگالی کاهش‌یافته (متخلخل یا فوم‌مانند) [۲۰ و ۳۴-۳۶] می‌تواند باعث افزایش تابش اشعه ایکس شود. استفاده از پیش‌پالس لیزری یا تکنیک دوپالسی نیز برای افزایش اشعه ایکس پیشنهاد شده است [۱۷ و ۱۸]. در این میان نشان داده شده است که هدف‌های گازی می‌توانند به‌طور قابل توجهی بازده تبدیل انرژی لیزر به اشعه 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 طول موجی 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 اشعه ایکس می‌شوند [۳۷-۳۴]. چنین اهدافی می‌توانند جایگزینی مناسب برای مواد گازی باشند. همچنین ساخت و استفاده 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 $7/5$ درصد استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که اشعه ایکس حاصل از تابش‌دهی لیزری این هدف در ناحیه پنجره آب نسبت به هدف با چگالی عادی بیشتر است. دنگ و همکاران نیز در سال ۲۰۱۸ تابش اشعه 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 نانو ثانیه با انرژی 500 ژول برای تابش‌دهی اهداف استفاده کردند. نتایج نشان داد که با استفاده از هدف با چگالی اولیه کاهش‌یافته، تابش اشعه ایکس حدود 21 درصد نسبت به هدف با چگالی عادی افزایش می‌یابد.

در مطالعه حاضر هدف این است که نشان دهیم از طریق کاهش چگالی اولیه یک هدف کم‌هزینه مانند سرب (نسبت به طلا) می‌توان تابش اشعه 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 اشعه ایکس از پلاسمای حاصل از تابش‌دهی لیزری طلا و سرب به‌منظور

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, Guttman 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, Wouterghem 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 Hohlräume. *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 Hohlräume 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, Mahdih 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

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 nanoporous targets. *Phys Lett A.* 2017; 381(5): 467-71.