

mahdm@iust.ac.ir :

(دریافت مقاله: ۱۳۸۷/۱۱/۶؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۸۹/۱/۲۳)

$(10^{12} \text{ W/cm}^2)$

مورد استفاده قرار گیرند [۱ - ۴]. در سال‌های اخیر با روی کار آمدن لیزرهای سریع و پرتوان بر اهمیت این موضوع افزوده شده است. در کاربردهای عملی افزایش میزان تبدیل انرژی لیزر به پرتو ایکس بسیار مفید و ضروری است. برای تحقق این امر، میزان جذب نور در ماده هدف باید افزایش یابد. یکی از روش‌های افزایش میزان جذب لیزر، استفاده از پیش پالس است که باعث تولید یک پلاسماهای گازی روی سطح هدف قبل از رسیدن پالس پرشدت اصلی می‌شود [۵]. دیدگاه دیگر تأثیر ساختار سطحی هدف‌های تحت تابش است که بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۶]. در این مقاله برهم‌کنش لیزر پالسی پرتوان با هدف فلزی شبیه سازی شده و تأثیر به کارگیری یک هدف فلزی با سطح نانو ساختار به

از زمانی که اولین آزمایش‌ها در زمینه برهم‌کنش لیزر با ماده انجام شد، مشخص شد که پلاسماهای تولید شده به وسیله لیزر منبع بسیار خوبی برای تابش الکترومغناطیسی در ناحیه طیف پرتو ایکس است. پالس‌های اشعه ایکس که از این طریق تولید می‌شوند می‌توانند دارای انرژی تا حدود چند ژول و توانی به بزرگی چندین TW باشند. مشخصات این پالس‌ها از جمله شدت و طول پالس را می‌توان با استفاده از پارامترهای لیزر و هدف کنترل نمود. چنین خواصی سبب شد که این منابع به طور گسترده در بخش‌های پیشرفته علمی و فنی نظیر لیتوگرافی، ICF<sup>۱</sup>، لیزرهای پرتو X، پرتو پزشکی و علم مواد

۱. Inertial Confinement Fusion

هستند. حال می‌توان فرض کرد که در هر لایه از پلاسما شرایط تعادلی موضعی برقرار بوده و در نتیجه پارامترهای پلاسما در هر لایه ثابت هستند.

مقدار کل تابش ترمزی در بازه فرکانسی  $\nu_1$  و  $\nu_2$  برای تمام لایه‌های پلاسما با انتگرال‌گیری از رابطه (۱) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$w_i = \int_{\nu_1}^{\nu_2} \int_{x_1}^{x_2} \frac{\Lambda}{3} \left( \frac{\nu\pi}{3} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{Z^2 e^6}{m^2 c^3} \left( \frac{m}{kT_e} \right)^{\frac{1}{2}} \times n_i n_e g(\nu, T_e) \exp\left(\frac{h\nu}{kT_e}\right) d\nu dx. \quad (2)$$

در این مقاله از کد هیدرودینامیکی EHYBRID [۹]، پس از اصلاح به منظور شبیه‌سازی برهم‌کنش لیزر-فلز و تشکیل پلاسما استفاده شده است. این کد مجموعه‌ای کامل از معادلات حاکم بر پلاسما شامل معادلات ماکسول، حرکت سیال، پیوستگی و معادله حالت را با توجه به شرایط مرزی حل نموده و پارامترهای پلاسما را بر حسب زمان می‌دهد. کد EHYBRID برای هندسه دو بعدی طراحی شده و برای شبیه‌سازی اثرات پالس‌های نانو ثانیه و پیکو ثانیه (بزرگتر از ۱۰ ps) مناسب است. در این کد برای ماده هدف، نود و هشت لایه موازی در نظر گرفته شده است که لیزر از لایه نودو هشتم به صورت عمود بر سطح لایه وارد ماده هدف می‌شود. پلاسما نخست در لایه نودو هشتم تشکیل می‌شود و به طرف داخل ماده هدف پیش می‌رود. در این کد فرض شده که پلاسما تشکیل شده در هر لایه هم‌دما باشد. ورودی این کد طوری طراحی شده است که قابلیت اعمال دو پالس لیزری و نیز شبیه‌سازی اهداف دو لایه را نیز دارد. زمان محاسبه کد بسته به طول پالس و شدت لیزر می‌تواند از ۱۰ ثانیه تا ۲ دقیقه باشد. با اعمال شرایط مختلف تابش و هدف در کد EHYBRID، پارامترهای پلاسما ایجاد شده از جمله دما و چگالی مشخص می‌شوند. پس از آن با استفاده از برنامه‌های کامپیوتری نوشته شده و با استفاده از رابطه (۲)، میزان تابش پرتو ایکس محاسبه می‌شود. هدف نانو ساختار به منظور مطالعه تأثیر آن بر میزان تابش، به صورت یک هدف دولایه متشکل از یک زیر لایه با چگالی طبیعی  $N_s$  و یک لایه نانوئی از جنس زیر

همراه استفاده از پیش پالس لیزری بر میزان افزایش تابش پرتو ایکس بررسی می‌شود.

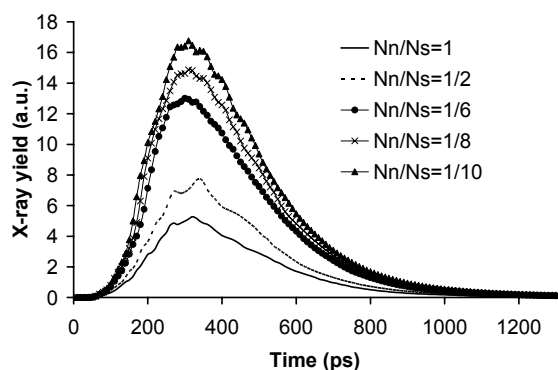
اساساً پرتو ایکس در تابش دهی فلزات با لیزر از طریق مکانیزم‌های مختلفی تولید می‌گردد که مهم‌ترین آنها تابش ترمزی، تابش خط و تابش باز ترکیب می‌باشد [۷]. در این تحقیق به طور خاص گسیل پرتو ایکس از طریق تابش ترمزی در نظر گرفته شده است. محاسبه تابش‌های خط و باز ترکیب مستلزم در نظر گرفتن مکانیزم‌های مختلف یونش (برخوردی و تابشی) و محاسبه جمعیت ترازهای انرژی در هر لحظه از زمان است که بسیار پیچیده و طولانی است. به همین دلیل این دو فرآیند در تحقیق جداگانه‌ای بررسی خواهند شد. البته باید توجه داشت که قسمت عمده تابش ایکس در محدوده طول موجی مورد نظر (۲۰-۱ nm) مربوط به تابش ترمزی می‌باشد. این فرآیند در اثر پراکندگی الکترون‌های آزاد پلاسما در میدان الکتریکی یون‌های پلاسما حاصل می‌شود. با فرض یک توزیع ماکسولی برای الکترون‌ها و یون‌ها، مقدار تابش ترمزی در فرکانس  $\nu$  برای یک لایه پلاسما به ضخامت  $dx$  که در شرایط تعادلی است از رابطه زیر به دست می‌آید [۸]:

$$w(x) dx = \frac{\Lambda}{3} \left( \frac{\nu\pi}{3} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{Z^2 e^6}{m^2 c^3} \left( \frac{m}{kT_e} \right)^{\frac{1}{2}} \times n_i n_e g(\nu, T_e) \exp\left(\frac{h\nu}{kT_e}\right) dx, \quad (1)$$

که در آن  $T_e$ ،  $n_e$ ،  $m_e$  و  $e$  به ترتیب جرم، چگالی، دما و بار الکترون می‌باشند.  $Z$ ،  $n_i$ ،  $c$ ،  $\epsilon_0$  و  $k$  نیز به ترتیب گذردهی خلا، سرعت نور در خلا، چگالی یونی، درجه یونیزاسیون و ثابت بولتزمن هستند. همچنین  $g(\nu, T_e)$  عامل گانت<sup>۱</sup> نامیده می‌شود که در محاسبات با تقریب خوبی برابر یک فرض شده است.

پلاسما به صورت لایه لایه و یک بعدی در راستای تابش لیزر در نظر گرفته می‌شود که پارامترهای توصیف کننده آن، از جمله دما و چگالی الکترونی ( $n_e$ ،  $T_e$ ) در این راستا متفاوت

۱. Gaunt factor



شکل ۲. میزان پرتو x تولید شده بر حسب زمان برای هدف دولایه (نانوساختار). شدت لیزر  $10^{15} \text{ W/cm}^2$  و طول پالس  $50 \text{ ps}$  است.

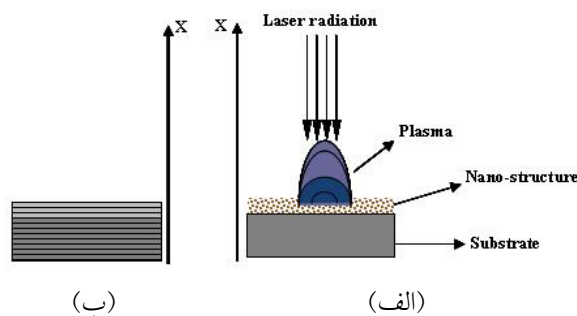
افزایش می یابد. برای  $\frac{1}{4} = \frac{N_n}{N_s}$  افزایش قابل توجهی دیده نمی شود اما برای حالاتی که نسبت چگالی ها به  $\frac{1}{6}$ ،  $\frac{1}{8}$  و  $\frac{1}{10}$  کاهش می یابد، افزایش قابل توجهی به وجود می آید.

در واقع پرتو لیزر در برهم کنش با لایه نانویی نفوذ بیشتری نسبت به هدف معمولی خواهد داشت و سهم بیشتری از انرژی لیزر جذب می شود و در نتیجه تشعشع ایکس در این شرایط افزایش خواهد یافت.

نمودار انرژی تابش پرتو ایکس بر حسب نسبت چگالی ها برای دو شدت لیزری در شکل ۳ نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می شود با کاهش این نسبت به  $\frac{1}{4} = \frac{N_n}{N_s}$  تغییر چندانی در انرژی کل تابش دیده نمی شود ولی با کاهش بیشتر نسبت به  $\frac{1}{10} = \frac{N_n}{N_s}$  افزایشی تا حدود ۳ برابر به وجود می آید. همچنین مشاهده می شود که روند افزایش تابش اشعه برای هر دو شدت تقریباً یکسان است.

حال تأثیر استفاده از پیش پالس بر میزان تابش پرتو ایکس از یک هدف نانو ساختار بررسی می شود.

به این منظور با در نظر گرفتن یک نسبت چگالی مشخص (در اینجا  $\frac{1}{6} = \frac{N_n}{N_s}$ )، یک پیش پالس لیزری با همان طول پالس اصلی ولی با شدت متفاوت و در فواصل زمانی مختلف، قبل از پالس اصلی به هدف تابیده می شود. شکل ۴ انرژی کل تابش شده را برای زمان های تأخیری مختلف نمایش می دهد.

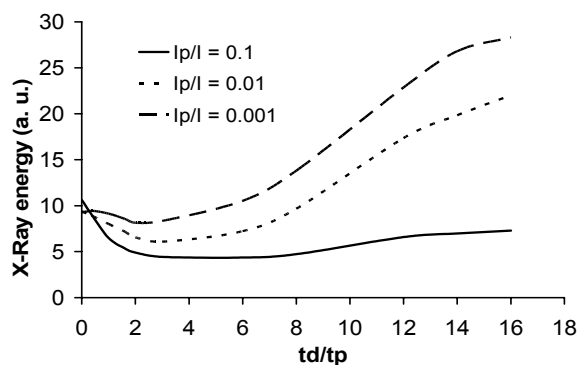


شکل ۱. الف) هدف نانو ساختار تحت تابش لیزر که تشکیل و انبساط پلاسما در راستای x را نشان می دهد. ب) هدف نانو ساختار مدل سازی شده به صورت دو لایه.

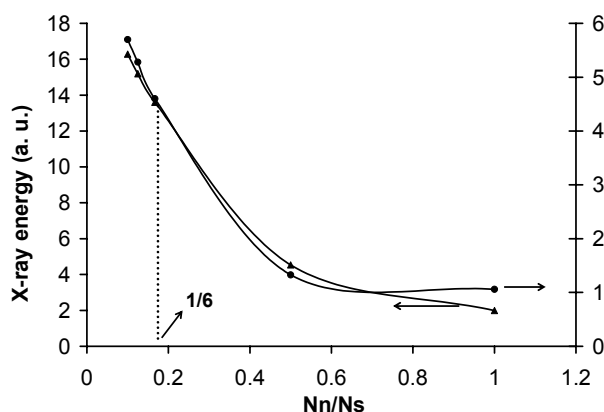
لایه اما با چگالی کمتر  $N_n$  مدل سازی شده است (شکل ۱). به طور معمول لایه های نانو ساختار متشکل از تعداد زیادی نانو-ذره هستند که ضخامتی در مقیاس نانومتر را ایجاد می کنند. به همین دلیل با در نظر گرفتن هدف به صورت دو لایه با شرایط ذکر شده می توان تجمع نانوذرات روی سطح هدف را به وسیله نسبت  $\frac{N_n}{N_s}$  مشخص نمود. در این محاسبات، فلز مس به عنوان هدف فلزی انتخاب شده است. ضخامت هدف  $6 \mu\text{m}$  انتخاب شده که شامل یک زیر لایه مسی به ضخامت  $5/5 \mu\text{m}$  و یک لایه نانویی از جنس مس به ضخامت  $50 \text{ nm}$  است.

پیش پالس لیزری نیز با فواصل زمانی مختلف نسبت به پالس اصلی و نیز با شدت های مختلف قبل از پالس اصلی به سطح نانو ساختار تابیده می شود. پالس لیزر اصلی در محاسبات دارای طول  $50 \text{ ps}$ ، شدت  $10^{15} \text{ W/cm}^2$  و طول موج  $1/06 \mu\text{m}$  است. نتایج حاصل از محاسبات شرایط بهینه برای تولید بیشترین مقدار اشعه ایکس را به دست خواهد داد.

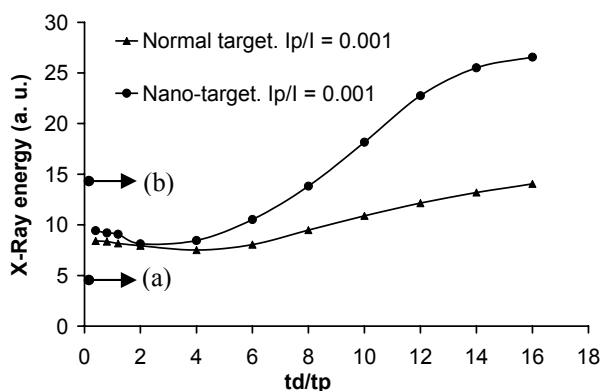
ابتدا تأثیر چگالی لایه نانویی (در واقع تأثیر تجمع نانو ذرات روی هدف) بدون در نظر گرفتن پیش پالس بررسی می شود. یک پالس لیزری پرتوان با مشخصات گفته شده به هدفی با سطح نانو ساختار تابیده می شود. شکل ۲ نتایج حاصل را در بازه طول موجی  $20 \text{ nm}$  -  $1 \text{ nm}$  نشان می دهد. مشاهده می شود که با کاهش نسبت چگالی های لایه نانویی به زیر لایه، میزان تشعشع



شکل ۴. انرژی تابش پرتو X بر حسب نسبت  $td/tp$  که  $tp$  طول پالس و  $td$  فاصله زمانی یا زمان تأخیری بین پیش پالس و پالس اصلی است. شدت پالس اصلی  $10^{15} \text{ W/cm}^2$  و طول هر دو پالس  $500 \text{ ps}$  می‌باشد.



شکل ۳. انرژی تابش پرتو X بر حسب نسبت چگالی‌های لایه نانوئی به زیرلایه. شدت لیزر برای منحنی با نقاط دایره‌ای  $10^{15} \text{ W/cm}^2$  و برای منحنی با نقاط مثلثی برابر  $10^{14} \text{ W/cm}^2$  است.



شکل ۵. انرژی تابش پرتو X بر حسب نسبت  $td/tp$  که  $tp$  همان طول پالس و  $td$  فاصله زمانی یا زمان تأخیری بین پیش پالس و پالس اصلی است. شدت پالس اصلی  $10^{15} \text{ W/cm}^2$  می‌باشد.

انتخاب شده است. نقاط (a) و (b) نیز به ترتیب مقادیر مربوط به حالات هدف معمولی و نانو ساختار را بدون استفاده از پیش پالس نمایش می‌دهند. مقایسه منحنی مربوط به هدف معمولی و نقطه a نشان می‌دهد که استفاده از پیش پالس با هر مقدار فاصله زمانی  $td$  موجب افزایش تابش ایکس می‌شود و این افزایش برای مقادیر بزرگتر  $td$  بیشتر است. در مورد هدف نانو ساختار نیز با مقایسه منحنی مربوط به آن و نقطه b مشاهده می‌شود که استفاده از پیش پالس با فواصل زمانی کوتاه (تا حدود ۸ برابر طول پالس) می‌تواند موجب کاهش تابش پرتو ایکس از آن شود ولی با افزایش بیشتر فاصله زمانی میزان تابش تا حدود ۲ برابر افزایش می‌یابد.

شدت پالس اصلی و پیش پالس به ترتیب  $I$  و  $I_p$  است. نمودارها برای سه مقدار مختلف از نسبت شدت‌ها ( $I_p/I$ ) رسم شده‌اند. مشاهده می‌شود هنگامی که نسبت شدت‌ها برابر ۰/۱ باشد انرژی تابش شده روند کاهشی خواهد داشت. اما با کاهش این نسبت تا ۰/۰۰۱ می‌توان میزان تابش اشعه را تا حد قابل توجهی افزایش داد. محاسبات نشان می‌دهند که اگر نسبت شدت‌ها بیشتر از ۰/۱ شود میزان افزایش به صفر می‌رسد.

در نهایت شکل ۵ مقایسه‌ای بین انرژی کل تابش شده از اهداف معمولی و نانو ساختار را نشان می‌دهد. منحنی‌ها مربوط به مقادیر به دست آمده با به‌کارگیری پیش پالس هستند. نسبت شدت پیش پالس به پالس اصلی در هر دو حالت برابر ۰/۰۰۱

مناسب نسبت به پالس اصلی می‌تواند افزایش گسیل پرتو از هدف نانو ساختار را به میزان قابل توجهی تقویت کند. هنگامی که شدت پیش پالس بیشتر از  $10^{14} \text{ W/cm}^2$  شود، فرآیند افزایش تضعیف شده و به صفر می‌رسد. فاصله زمانی نیز برای حصول مقدار بهینه پرتو ایکس نباید از حدود ۱۰ برابر طول پالس کمتر شود.

تأثیر استفاده از پیش پالس لیزری بر میزان افزایش پرتو ایکس ترمزی از اهداف فلزی نانو ساختار تحت تابش پالس لیزری پر شدت بررسی شد. ابتدا نشان داده شد که استفاده از هدف نانو ساختار (با یک چگالی مناسب برای لایه نانویی) به جای هدف معمولی تولید پرتو ایکس را افزایش می‌دهد. سپس مشاهده شد که استفاده از یک پیش پالس لیزری با شدت و فاصله زمانی

- Nakano, *Appl. Phys. B* **78** (2004) 885.
7. I C F Turcu, *X-Rays from Laser Plasmas, Generation and Application*, John Wiley & Sons, New York (1999).
  8. S Ichimaru, *Basic Principles of Plasmas Physics: A Statistical Approach. J. Plasma Physics*, **13** (1975).
  9. J Pert, *J. Fluid Mech.* **131** (1983) 401.

1. S Sailaja et al., *Meas. Sci. Technol.* **9** (1998) 1462.
2. P Gibbon, E Forster, *Plasma Phys. Control. Fusion* **38** (1996) 769.
3. J Lindl, *Phys. Plasmas* **2** (1995) 3933.
4. H Diado, *Rep. Prog. Phys.* **65** (2002) 1513.
5. J F Pelletier, M Chaker, and J C Kieffer, *J. Appl. Phys.* **81** (1997) 5980.
6. T Nishikawa, S Suzuki, Y Watanabe, O Zhou, and H