

شبیه سازی تابش اشعه ایکس از پلاسماهای لیزری و تاثیر استفاده از پیش پالس لیزری بر میزان تابش

رضا فاضلی*

گروه فیزیک، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران

حنیف هادی پور

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۸۸/۸/۲۸

تاریخ دریافت: ۸۸/۲/۱۱

چکیده

مقدمه: در اثر برهمکنش پالسهای لیزری پرتوان با اهداف فلزی، پلاسمایی با دمای بسیار بالا (چند صد eV تا چندین keV) تولید می شود که منبع بسیار مناسبی برای تابش اشعه ایکس است. اشعه ایکس تولید شده از پلاسما در بخشهای مهمی نظیر لیتوگرافی، پزشکی، بیولوژی، (ICF (Inertial Confinement Fusion) و علوم فضائی اهمیت ویژه ای دارد. در تمام این کاربردها هرچه شدت اشعه ایکس تولید شده بیشتر باشد یا به طور دقیقتر هر چه میزان تبدیل انرژی پالس لیزر به اشعه ایکس بیشتر باشد از نظر عملی مطلوب تر خواهد بود. به همین دلیل در سالهای اخیر تولید اشعه ایکس از پلاسما و بررسی روشهای افزایش تولید آن بسیار مورد توجه قرار گرفته است. **هدف:** شبیه سازی تابش اشعه ایکس از پلاسماهای لیزری و بررسی تاثیر استفاده از پیش پالس لیزری بر میزان تابش.

روش بررسی: روش انجام تحقیق بر پایه شبیه سازیهای اتمی است. ابتدا پلاسماهای حاصل از برهمکنش پالس لیزری پرتوان با یک هدف فلزی شبیه سازی می شود. آنگاه پس از به دست آمدن مشخصات پلاسما به خصوص دما و دانسیته الکترونی، تابش اشعه ایکس با استفاده از معادلات مربوط به مکانیزم های مختلف شبیه

* عهده دار مکاتبات: rfazeli@iust.ac.ir، تلفن: ۰۲۱-۷۷۲۴۰۵۴۰، فکس: ۰۲۱-۷۷۲۴۰۴۹۷

سازی می شود. در نهایت تاثیر استفاده از یک پیش پالس لیزری با اصلاح برنامه های کامپیوتری مورد استفاده بررسی خواهد شد.

نتایج: مشاهده گردید که لایه های عمیق تر هدف، در زمان های بزرگتر، تحت تاثیر برهم کنش لیزر قرار گرفته، دما و دانسیته الکترونی آنها افزایش می یابد. برای یک پالس لیزری به طول 50 ps و شدت 10^{15} W/cm^2 دما از مرتبه چند صد eV و دانسیته الکترونی از مرتبه 10^{23} cm^{-3} در عرض هدف حاصل شد. در لایه هایی که دانسیته الکترونی و به خصوص دما مقادیر قابل توجهی دارند، تولید اشعه ایکس بیشتر است. همچنین، پهنای پالس (FWHM) اشعه ایکس تولید شده در حدود همان پالس لیزر استفاده شده یعنی 50 ps است. مشاهده شد که به هنگام استفاده از پیش پالس لیزری، یک مقدار بهینه برای تاخیر زمانی (فاصله زمانی بین پیش پالس و پالس اصلی) وجود دارد که در آن بیشترین مقدار اشعه ایکس تولید می شود. این مقدار بهینه هنگامیکه نسبت شدت پیش پالس به پالس اصلی برابر 0.01 و 0.001 باشد به ترتیب حدود 400 ps و 1700 ps بدست آمد. همچنین محاسبات نشان دادند که میزان افزایش اشعه ایکس با کاهش شدت پیش پالس، بیشتر می شود.

نتیجه گیری: پهنای پالس اشعه ایکس گسیل شده از پلاسماهای لیزری در حدود همان پالس لیزر استفاده شده است. سپس نشان داده شد که استفاده از یک پیش پالس لیزری با شدت و فاصله زمانی مناسب نسبت به پالس اصلی می تواند گسیل اشعه ایکس را به میزان قابل توجهی تقویت کند. مشاهده شد که یک مقدار بهینه برای تاخیر زمانی وجود دارد که در آن بیشترین مقدار اشعه ایکس تولید می شود. این مقدار بهینه به شدت پیش پالس استفاده شده بستگی دارد.

واژه های کلیدی: برهمکنش لیزر- پلاسما، پلاسماهای لیزری، تابش اشعه ایکس، پیش پالس لیزری.

مقدمه

از زمانیکه اولین آزمایشات در زمینه برهمکنش لیزر با ماده انجام شد (اوایل دهه ۸۰)، مشخص شد که پلاسماهای تولید شده به وسیله لیزر منابع بسیار خوبی برای تابش الکترومغناطیسی در ناحیه طیف اشعه ایکس هستند. پالسهای اشعه ایکس تولید شده از این طریق می توانند دارای انرژی تا حدود چند ژول و توانی به بزرگی چندین TW باشند. مشخصات این پالسها از جمله شدت و طول پالس را می توان 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*، لیزرهای X-ray، پرتو پزشکی و علم مواد مورد استفاده قرار گیرند.^(۱-۴) در سالهای اخیر با روی کار آمدن لیزرهای سریع و پرتوان بر اهمیت این موضوع افزوده شده است. افزایش میزان تبدیل انرژی لیزر به اشعه ایکس در کاربردهای عملی بسیار مطلوب و ضروری است. به همین دلیل تحقیق در مورد روشهای افزایش میزان تابش اشعه ایکس از پلاسما و تاثیر شرایط مختلف لیزر و هدف اهمیت خاصی پیدا کرده است. تاثیر ساختار سطحی هدفهای تحت تابش و استفاده از پیش پالس لیزری از روشهایی هستند که بسیار مورد توجه قرار گرفته اند.^(۵-۸) در این مقاله ابتدا برهمکنش لیزر- فلز و تشکیل پلاسما به وسیله یک کد هیدرودینامیکی شبیه سازی

* Inertial Confinement Fusion.

شده و سپس از اطلاعات به دست آمده برای محاسبه میزان تابش اشعه ایکس از پلاسما استفاده شده است. سپس تاثیر استفاده از یک پیش پالس لیزری با شرایط مختلف بر میزان تابش ایکس بررسی شده است.

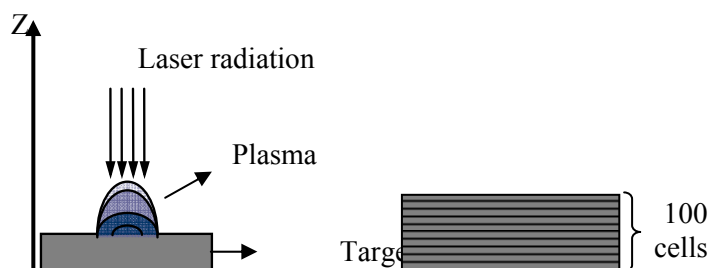
مواد و روشها

تئوری و محاسبات

برهمکنش لیزر-هدف

متمرکز کردن لیزرهای پرتوان بر روی سطح مواد یکی از روشهایی است که از آن برای تولید پلاسما استفاده می‌شود. این پلاسما با استفاده از لیزرهای پالس کوتاه یا لیزرهای پالس بلند قابل تولید می‌باشد. در فلزات مورد تابش لیزرهای پالس بلند، به دلیل وجود الکترونهاي آزاد، فرایند جذب لیزر عمدتاً با مکانیزم جذب برخوردی (Collisional Absorption) صورت می‌گیرد. با جذب پرتو لیزر در سطح ماده، دمای سطحی ماده افزایش یافته و شرایط ایجاد پلاسما فراهم می‌گردد. معمولاً ایجاد پلاسما به همراه تبخیر و جابجایی مواد از سطح ماده می‌باشد. خصوصیت این پلاسما با پارامترهای وابسته به لیزر نظیر شدت قابل کنترل می‌باشد. پلاسماي ایجاد شده به همراه گسیل‌های مختلفی نظیر: ذرات یونی، ذرات الکترونی، تابش الکترومغناطیس (در ناحیه مادون قرمز، قابل رویت، ماورای بنفش و X-ray) و همچنین ذرات خنثی می‌باشد. تولید اشعه X توسط برهمکنش لیزر و پلاسما از نظر میزان درخشش، نرخ تکرار و قابلیت اعتماد نسبت به سایر روشها مزیت دارد و پهنای پالس آن نیز کمتر است.

قبل از وقوع هر نوع برهمکنشی میان پرتو لیزر و هدف، شرایط کاملاً مشخص است: یک پرتو پراثری و یک نمونه جامد در اختیار داریم. پس از وقوع برهمکنش و پایان آن نیز همه چیز مشخص است: درصدی از پرتو فرودی منعکس شده و بخش دیگر آن توسط هدف جذب و منتقل می‌شود. ماده هدف نیز کم و بیش تخریب شده و بخشی از آن، به شکل ذرات خنثی یا باردار به طرف خارج گسیل می‌شود. به منظور توصیف فیزیکی پدیده و پیش بینی نتایج حاصل از آن، باید دید که بین حالات اولیه و نهایی چه رویدادهایی اتفاق می‌افتد.



شکل ۱- الف) هدف فلزی تحت تابش لیزر که تشکیل و انبساط پلاسما در راستای Z را نشان می‌دهد. ب) هدف فلزی در مقیاس بزرگتر که در کد EHYBRID شامل ۱۰۰ سلول در نظر گرفته می‌شود.

در این مقاله شبیه سازی برهمکنش لیزر با هدف بوسیله کد هیدرودینامیکی EHYBRID^(۹) انجام شده است. این کد مجموعه ای کامل از معادلات حاکم بر پلاسما شامل معادلات ماکسول، حرکت سیال، پیوستگی و معادله حالت را با توجه به شرایط مرزی به صورت یک بعدی حل نموده و پارامترهای پلاسما را بر حسب زمان بدست می دهد. در این کد صد لایه موازی برای ماده هدف در نظر گرفته می شود که لیزر از لایه صدم به صورت عمود بر سطح لایه وارد ماده هدف می شود طوری که پلاسما نخست در لایه صدم تشکیل می شود. شکل (۱) طرحی شماتیک از شرایط لیزر و هدف را نمایش می دهد.

تابش اشعه ایکس از پلاسما

تابش اشعه ایکس از پلاسما از طریق مکانیزم های مختلفی صورت می گیرد که مهمترین آنها تابش ترمزی (Bremsstrahlung Emission)، تابش بازترکیب (Recombination emission) و تابش خط (Line Emission) می باشند^(۱۰). طیف الکترومغناطیسی تابشهای ترمزی و بازترکیب که بیشترین سهم را در اشعه ایکس گسیل شده از پلاسما دارند، به صورت پیوسته و طیف تابش خط به صورت گسسته است. در این مقاله اشعه ایکس حاصل از مکانیزم های پیوسته ترمزی و بازترکیب مورد مطالعه قرار گرفته است. تابش ترمزی در اثر پراکندگی الکترونیهای آزاد پلاسما در میدان الکتریکی یونهای پلاسما حاصل می شود. انرژی جنبشی الکترون هنگام عبور از کنار یک یون کاهش می یابد و این کاهش انرژی بصورت اشعه ایکس نمایان می شود. مولفه دیگر اشعه ایکس، تابش بازترکیب می باشد. هنگامی که یک الکترون توسط یک یون تسخیر می شود، انرژی جنبشی الکترون بصورت تابش گسیل می شود. این نوع تابش از آنجا که از ترکیب الکترون با یون حاصل می شود، تابش باز ترکیب نامیده می شود. از آنجا که پلاسما تولید شده در امتداد محور تابش غیر یکنواخت می باشد و پارامترهای توصیف کننده آن، از جمله دما و دانسیته الکترونی (n_e, T_e) در این راستا متفاوت هستند، در نتیجه می توان پلاسما را به صورت چندلایه در نظر گرفت. در چنین شرایطی می توان فرض کرد که در هر لایه از پلاسما شرایط تعادلی موضعی (Local Thermal Equilibrium) برقرار بوده و در نتیجه پارامترهای پلاسما در هر لایه ثابت فرض می شوند. با در نظر گرفتن یک توزیع ماکسولی برای الکترونها و یونها، مقدار تابشهای Bremsstrahlung و Recombination در بازه فرکانسی ν_1 و ν_2 برای یک لایه پلاسما به ضخامت dz و سطح مقطع da که در شرایط تعادلی است عبارت خواهد بود از^(۱۱،۱۲):

$$dj_{(B-R)} = \int_{\nu_1}^{\nu_2} 4\pi \times 5.4 \times 10^{-40} \frac{n_e \sum_{i=1}^Z n_i Z_i^2}{\sqrt{T_e}} \exp\left(-\frac{h\nu}{kT_e}\right) \left[1 + G_n \frac{\xi}{n^3} \frac{X_i}{kT_e} \exp\left(\frac{X_i}{kT_e}\right) + \sum_{m=n+1}^{\infty} G_m \frac{2Z_i^2 R_y}{m^3 kT_e} \exp\left(\frac{Z_i^2 R_y}{m^2 kT_e}\right) \right] dv da dz \quad (1)$$

که بر حسب erg s^{-1} بدست « آید. در این معادله جمله اول نشان دهنده تابش Bremsstrahlung و جملات سوم و چهارم نشان دهنده تابش Recombination هستند. این روابط در مراجع (۱۱) و (۱۲) به تفصیل بدست آمده و

توصیف شده اند. پارامترهای T_e, n_e, m_e و e به ترتیب جرم، چگالی عددی، دما و بار الکترون می باشند. همچنین h, n_i, c, ϵ_0 و k نیز به ترتیب گذردهی خلا، سرعت نور در خلا، چگالی عددی یونهای با درجه یونیزاسیون Z_i ثابت پلانک و ثابت بولتزمن هستند. ثابت R_y, ξ, X_i, n و $G_{n,m}$ به ترتیب عبارتند از ثابت ریذبرگ، تعداد الکترونها در حالت پایه کوانتومی، عدد کوانتومی اصلی، پتانسیل یونش و ضرایب گانت (Gaunt factors). ضرایب گانت با تقریب خوبی در محاسبات برابر یک فرض شده اند.^(۱۲) پارامترهای T_e, n_e و Z_i از خروجی کد EHYBRID استخراج می شوند و نیز پارامترهای ξ, n و X_i با توجه به ماده ای که به عنوان هدف استفاده می شود تعیین می شوند.

پارامتر بسیار مهم و نهائی که در روابط فوق باید تعیین شود چگالی عددی یونها با یونیزاسیون مشخص Z_i در هر تراز است. این مشخصه را می توان با فرض تعادل گرمایی موضعی (LTE) و در نتیجه حل معادله ساها (Saha equation) در هر لحظه از زمان محاسبه نمود.^(۱۳) این روش در مورد پلاسماهایی با چگالی بالای الکترونی فرض درستی است و در نتیجه در محاسبات حاضر که چگالی الکترونی پلاسما از مرتبه 10^{23} cm^{-3} بدست آمده است معتبر خواهد بود. مقدار کل تابش ترمزی و بازترکیب در بازه فرکانسی ν_1 و ν_2 برای تمام لایه های پلاسما با انتگرال گیری از رابطه (۱) به صورت زیر بدست می آید:

$$j_t = \int_S \int_{z_i}^{z_f} \int_{\nu_1}^{\nu_2} 4\pi \times 5.4 \times 10^{-40} \frac{n_e \sum_{i=1}^Z n_i Z_i^2}{\sqrt{T_e}} \exp\left(-\frac{h\nu}{kT_e}\right) \left[1 + G_n \frac{\xi}{n^3} \frac{X_i}{kT_e} \exp\left(\frac{X_i}{kT_e}\right) + \sum_{m=n+1}^{\infty} G_m \frac{2Z_i^2 R_y}{m^3 kT_e} \exp\left(\frac{Z_i^2 R_y}{m^2 kT_e}\right) \right] d\nu da dz \quad (2)$$

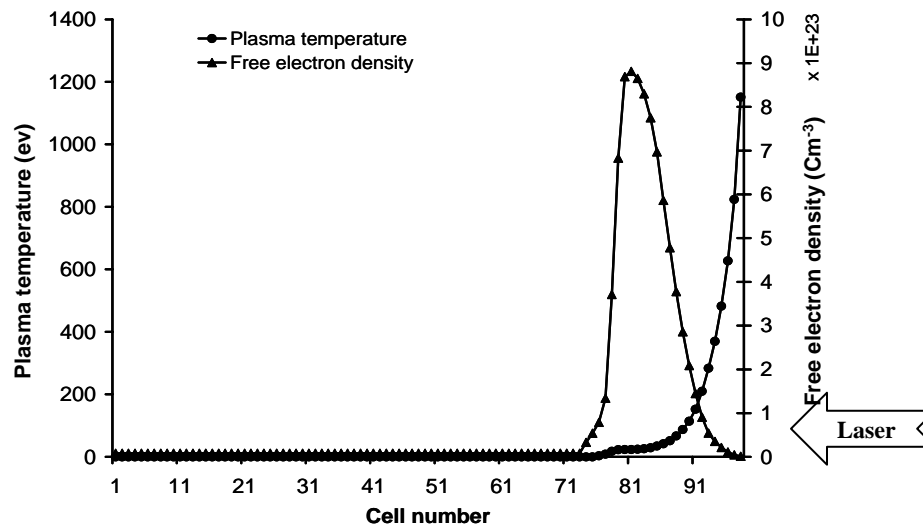
در این مطالعه اشعه ایکس در محدوده فرکانسی یا به عبارت دیگر محدوده طول موجی 12.6-14.6 nm محاسبه شده است که به طور خاص در کاربرد لیتوگرافی بسیار حائز اهمیت است. فلز مس با ضخامت 9 μm به عنوان هدف انتخاب شده و پالس لیزر اصلی در محاسبات دارای پهنای 50 psec، شدت 10^{15} W/cm^2 و طول موج 1.06 μm است. پیش پالس لیزری نیز با فواصل زمانی مختلف نسبت به پالس اصلی و نیز با شدتهای مختلف قبل از پالس اصلی به سطح هدف تابیده می شود. نتایج حاصل از محاسبات شرایط بهینه برای تولید بیشترین مقدار اشعه ایکس را به دست خواهد داد.

نتایج و بحث

دما و دانسیته پلاسما

شکل (۲) نتایج حاصل از شبیه سازی پلاسما توسط کد EHYBRID را برای یک پالس لیزری به طول 50 ps و شدت 10^{15} W/cm^2 به عنوان نمونه نشان می دهد. نمودار دما و دانسیته الکترونی بصورت یک بعدی و

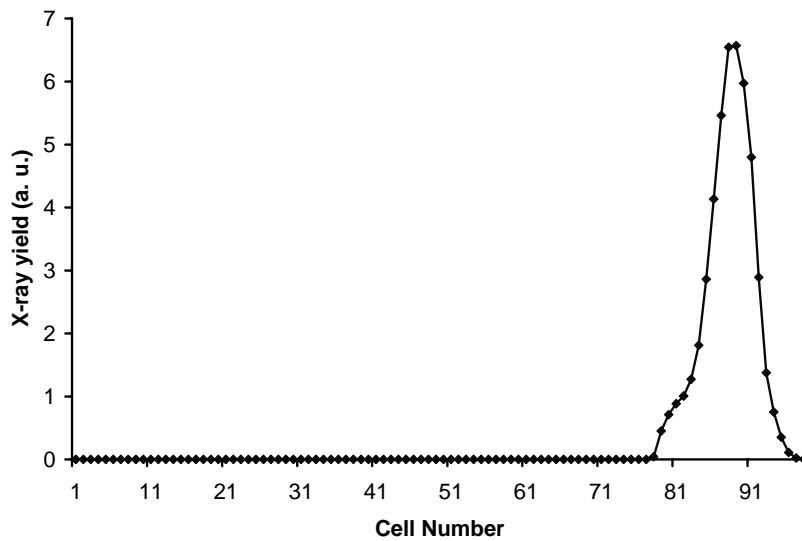
در طول لایه های مختلف پلاسما و هدف نمایش داده شده است. مشاهده می گردد که لایه های عمیق تر هدف، در زمان های بزرگتر، تحت تاثیر برهم کنش لیزر قرار گرفته، دما و دانسیته الکترونی آنها افزایش می یابد. در این نمودارها دما از مرتبه چند صد eV و دانسیته الکترونی از مرتبه 10^{23} cm^{-3} در عرض هدف حاصل شده است.



شکل ۲- نمودارهای دما و دانسیته الکترونی در لایه های مختلف و در زمان 25 ps پس از آغاز پالس لیزر. شدت لیزر 10^{15} W/cm^2 و طول پالس 50 ps است.

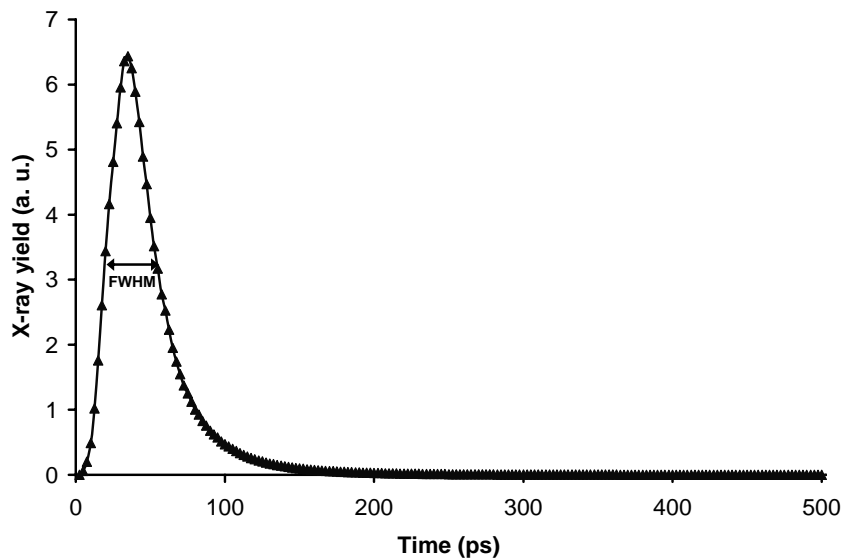
تابش x-ray از پلاسما

با در دست داشتن دما و دانسیته الکترونی می توان جمعیت یونها در ترازها را در هر لحظه از زمان در لایه های مختلف پلاسمایی با حل معادله ساها محاسبه نمود. در نهایت میزان تابش اشعه ایکس از طریق رابطه (۲) در بازه های زمانی مختلف محاسبه می شود. شکل (۳) میزان اشعه ایکس تولید شده در لایه های مختلف را در زمان 25 ps پس از آغاز پالس لیزر نشان میدهد. مشاهده می شود در لایه هایی که دانسیته الکترونی و به خصوص دما مقادیر قابل توجهی دارند، تولید اشعه ایکس بیشتر است.



شکل ۳- میزان X-ray تولید شده در لایه های مختلف در محدوده طول موجی 12.6-14.6 nm و در زمان 25 ps پس از آغاز پالس لیزر.

حال با انتگرال گیری روی تمام لایه ها در زمانهای مختلف میزان تابش نسبت به زمان محاسبه می شود. شکل (۴) نمودار تابش اشعه ایکس نسبت به زمان را در طول تابشدهی و پس از آن تا زمان 500 ps نشان می دهد.

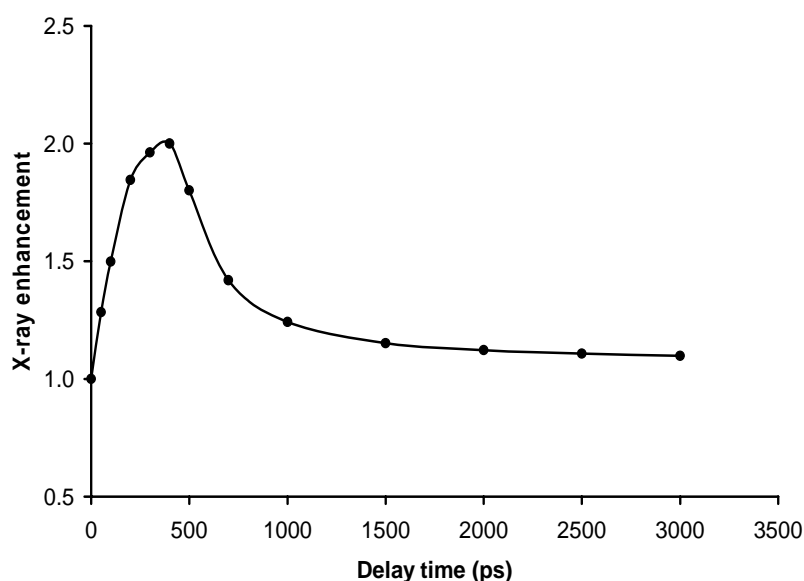


شکل ۴- میزان X-ray تولید شده بر حسب زمان. شدت لیزر 10^{15} W/cm^2 و طول پالس 50 ps است.

مشاهده می شود که پهنای پالس^۱ (FWHM) اشعه ایکس تولید شده در حدود همان پالس لیزر استفاده شده یعنی 50 ps است. در واقع آنچه که زمان صعود و سقوط پالس ایکس را تعیین می کند، گرم شدن پلاسما به هنگام افزایش شدت لیزر (در نیمه اول پالس لیزر) و سرد شدن آن به هنگام کاهش شدت لیزر (در نیمه دوم پالس لیزر) است.

تاثیر استفاده از پیش پالس لیزری

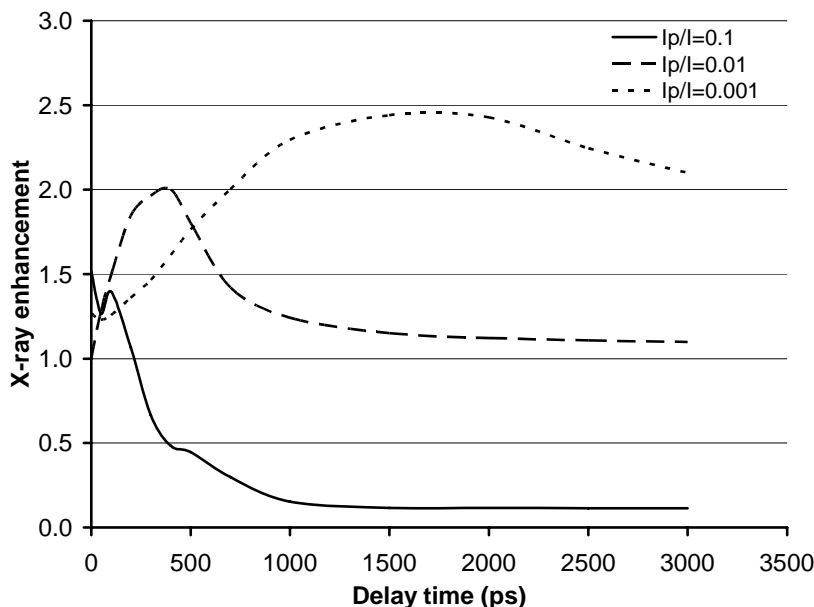
اکنون می توان تاثیر استفاده از یک پیش پالس لیزری قبل از پالس اصلی را مورد بررسی قرار داد. پیش پالس را می توان با شدتهای متفاوت و نیز فواصل زمانی مختلف نسبت به پالس اصلی اعمال کرد. در این مقاله تاثیر این دو عامل به دقت بررسی شده است.



شکل ۵- میزان افزایش تابش X-ray بر حسب فاصله زمانی یا زمان تاخیری بین پالس اصلی و پیش پالس. شدت پالس اصلی 10^{15} W/cm^2 و شدت پیش پالس 10^{13} W/cm^2 است.

با انتگرال گیری از منحنی تابش ایکس نسبت به زمان می توان انرژی کل تاییده شده در یک پالس را محاسبه نمود. شکل (۵) میزان افزایش انرژی کل اشعه ایکس گسیل شده را به صورت تابعی از فاصله زمانی بین پالس اصلی و پیش پالس (تأخیر زمانی) نشان می دهد. میزان افزایش انرژی، نسبت به حالت عادی (بدون استفاده از پیش پالس) انتخاب شده 10^{13} W/cm^2 محاسبه شده است. شدت پیش پالس برای نمونه صد برابر کوچکتر از پالس اصلی یعنی است. مشاهده می شود که یک مقدار بهینه برای تأخیر زمانی وجود دارد که در آن بیشترین مقدار اشعه ایکس تولید می رسد تولید اشعه ایکس دو برابر می شود. در واقع 400 ps می شود. در این شرایط هنگامی که تأخیر زمانی به پیش پالس هنگامی که شدتی بالاتر از آستانه تشکیل پلاسما داشته باشد، باعث تشکیل یک پیش پلاسما روی سطح

هدف قبل از رسیدن پالس اصلی می شود. در نتیجه پالس لیزر اصلی به جای یک سطح فلزی، با یک حجم پلاسمایی روبرو می شود که باعث جذب بیشتر انرژی لیزر و در نهایت تولید بیشتر اشعه ایکس خواهد شد.



شکل ۶- میزان افزایش تابش X-ray بر حسب زمان تاخیری برای سه شدت مختلف پیش پالس (I_p). شدت پالس اصلی $I=10^{15} \text{ W/cm}^2$ است.

عامل دیگر در تاثیر پیش پالس لیزری، شدت آن (I_p) نسبت به پالس اصلی (I) است. شکل (۶) نتایج بدست آمده را برای سه شدت مختلف پیش پالس نشان می دهد. از روی شکل پیداست که مقدار بهینه تاخیر زمانی با کاهش شدت پیش پالس افزایش می یابد. این مقدار بهینه هنگامیکه نسبت شدت پیش پالس به پالس اصلی برابر 0.01 و 0.001 باشد به ترتیب حدود 400 ps و 1700 ps خواهد بود. همچنین میزان افزایش اشعه ایکس نیز با کاهش شدت پیش پالس، افزایش می یابد. مشاهده می شود هنگامی که نسبت شدتها برابر 0.1 باشد انرژی تابش شده روند کاهشی خواهد داشت. اما با کاهش این نسبت تا 0.001 می توان میزان تابش اشعه را به میزان قابل توجهی (حدود 2.5 برابر) افزایش داد. محاسبات نشان می دهند که اگر نسبت شدتها کمتر از 0.001 شود میزان افزایش تغییر چندانی نمی کند.

نتیجه گیری

تابش اشعه ایکس از یک پلاسمای لیزری شبیه سازی شد و پس از آن تاثیر به کار گیری یک پیش پالس لیزری قبل از پالس لیزر اصلی بر میزان تابش اشعه ایکس بررسی شد. ابتدا نشان داده شد که در لایه هایی که دانسیته الکترونی و به خصوص دما مقادیر قابل توجهی دارند، تولید اشعه ایکس بیشتر است. همچنین مشاهده شد که پهنای پالس اشعه ایکس تولید شده در حدود همان پالس لیزر استفاده شده است. سپس نشان داده شد که استفاده

از یک پیش پالس لیزری با شدت و فاصله زمانی مناسب نسبت به پالس اصلی می تواند گسیل اشعه ایکس را به میزان قابل توجهی تقویت کند. مشاهده شد که یک مقدار بهینه برای تاخیر زمانی وجود دارد که در آن بیشترین مقدار اشعه ایکس تولید می شود. این مقدار بهینه به شدت پیش پالس استفاده شده بستگی دارد. هنگامی که نسبت شدت پیش پالس به پالس اصلی برابر 0.1 و بیشتر از آن شود، فرایند افزایش تضعیف شده و تولید اشعه ایکس کاهش می یابد.

References:

1. Sailaja, Arora, S.V., Kumbhare, S.R., Naik, P.A., P. Gupta, D., Fedin, D.A., Rupasov, A.A., and Shikanov, A.S., *Meas. Sci. Technol.*, **9**, 1462 (1998).
2. Gibbon, P., Forster, E., *Plasma Phys. Control. Fusion*, **38**, 769 (1996).
3. Lindl, J., *Phys. Plasmas*, **2**, 3933 (1995).
4. Diado, H., *Rep. Prog. Phys.*, **65**, 1513 (2002).
5. Pelletier, J.F., Chaker, M., and Kieffer, J.C., *J. Appl. Phys.*, **81**, 5980 (1997); Nakano, H., Nishikawa, T., Ahn, H., and Uesugi, N., *Appl. Phys. Lett.*, **69**, 2992 (1996).
6. Murnane, M.M., Kapteyn, H.C., Gordon, S.P., Bokor, J., Glytsis, E.N., and Falcone, R.W., *Appl. Phys. Lett.*, **62**, 1068 (1993).
7. Nishikawa, T., Nakano, H., Uesugi, N., Nakao, M., and Masuda, H., *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 4079 (1999).
8. Nishikawa, T., Nakano, H., Ahn, H., and Uesugi, N., *Appl. Phys. Lett.*, **70**, 1653 (1997).
9. Kulcsar, G., AlMawlawi, D., Budnik, F.W., Herman, P.R., Moskovits, M., Zhao, L., and Marjoribanks, R.S., *Phys. Rev. Lett.*, **84**, 5149 (2000).
10. Pert, J., *J. Fluid Mech*, **131**, 401 (1983).
11. Turcu, I.C.F, *X-Rays from Laser Plasmas, Generation and Application*, John Wiley and Sons, New York (1999).
12. Ichimaru, S., *J. Plasma Physics*, **13** (1975).
13. Lang, K.R., *Astrophysical formulae: Radiation, Gas Processes, and High Energy Physics*, Springer, Enlarged 3rd edition (1999).
14. Fridman, A.A., Kennedy, L.A., *Plasma Physics and Engineering*, Taylor and Francis, New York (2004).