

مطالعه پلاسما سطحی حاصل از برخورد لیزر با ماده جامد و بررسی نظریه برخورد باطیف سنجی اشعه X

ملکی، محمد هادی^۱؛ امرالهی، رضا^۲؛ عباسی، سید پیمان^۳

۱- سازمان انرژی اتمی ایران - پژوهشکده لیزر و اپتیک

۲- دانشگاه صنعتی امیر کبیر - گروه مهندسی هسته‌ای

۳- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - گروه فیزیک

چکیده

اندرکنش لیزر با ماده می‌تواند یکی از مهمترین و اساسی‌ترین روشهای تولید پلاسما را فراهم کند. در این مقاله از لیزرهای CO_2 با توان ۵ J و لیزر $Nd:YAG$ با توان ۲۰ W بر روی فلزات آهن، مس، تیتانیوم، نیکل و برنج به دو روش عبوری و غیر عبوری آزمایش‌هایی انجام شده است. در این آزمایش‌ها از طیف سنج اشعه X با بلور خمیده که برای اولین بار در ایران ساخته شده است استفاده شده و پدیده برخورد با این پلاسماها و همچنین سطح مقطع برخورد الکترون - یون و اثرات برخورد الکترون - الکترون در این نوع پلاسما بررسی شده و تعداد برخوردها تخمین زده شده است.

مقدمه

برخورد فوتون لیزرهای توان بالا با سطح ماده جامد در سطح آن پلاسمایی تولید می‌کنند که دارای محدوده وسیعی از اطلاعات اتمی است و ویژگیهای اساسی این پلاسما در دو خاصیت زیر است:
الف: گستردگی محدوده دمای الکترون

ب: پلاسمای پر برخورد

در این رابطه پلاسمای تولیدی در اثر جدایی الکترونها از اتم در اثر برخورد لیزر ایجاد می‌شود فرکانس برخورد در پلاسمایی با سرعت الکترون v و چگالی n_e بصورت زیر است:

$$v_{ei} = \frac{Z n_e \pi e^4}{m^2 v^3} \quad (2)$$

سطح مقطع برخورد کولنی برای الکترونی با سرعت v که از کنار هسته‌ای با عدد اتمی Z می‌گذرد بصورت زیر است [۱]:

$$\bar{P} = \frac{Z^2 \pi e^4}{m^2 v^4} \quad (3)$$

^۱ - تهران - انتهای کارگر شمالی سازمان انرژی اتمی ایران پژوهشکده لیزر صندوق پستی ۸۴۸۶ - ۱۱۳۶۵ تلفن ۸۸۰۰۷۰۹۰

فکس ۸۸۰۰۹۱۸۸ نشانی پست الکترونیکی hadimaleki@yahoo.com

همچنین برای محاسبه آثار استتاری الکترونیهای مقید نسبت به انحراف ماکزیمم در جهت اولیه خواهیم داشت [۲] :

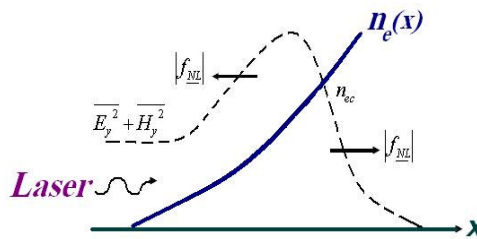
$$\theta_m = \frac{1}{6\pi n_e \lambda_{De}^3} = \frac{n^{\frac{1}{2}} e^3}{6\pi (\epsilon_0 k T_e)^{\frac{3}{2}}} = 1.6 \times 10^{-7} \frac{n^{\frac{1}{2}}}{T_e^{\frac{3}{2}}} \quad (۴)$$

در این محدوده اشعه X مورد بررسی در اثر برخورد لیزر و شتاب یافتن الکترونها بوسیله نیروی ponderomotive تولید می شود. این شتاب از رابطه زیر بدست می آید : (رابطه (۱) و شکل (۱))

$$a = -\frac{1}{2} \left(\frac{e}{m\omega} \right)^2 \nabla E^2 \quad (۱)$$

که E میدان الکتریکی موج و m, e جرم و بار الکترون و ω اندازه حرکت زاویه ای موج است و

$$n_{ec} = \frac{m\omega^2}{4\pi e^2} \quad [۱]$$



شکل (۱) : برخورد لیزر با سطح جامد و گسترش آن بر حسب چگالی

اشعه X به دو صورت مختلف تولید می شود:

الف: تابش ترمزی : الکترونها پس از برخورد لیزر در جهتی پیش می روند که چگالی پلاسما بیشتر شده و به سطح ماده جامد $n_e = 10^{23} \text{ cm}^{-3}$ می رسد (شکل ۱). بنا به الکترومدینامیک کلاسیک با عبور الکترون از کنار هسته ها امواج الکترو مغناطیسی تولید می شوند که در صورت عبور از نزدیکی هسته در محدوده اشعه X قرار خواهند داشت. [۱ و ۴]

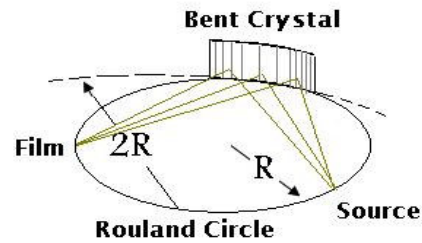
ب: طیف گسسته اشعه X : الکترونها در این پلاسما نوعاً دارای انرژیهای در حدود keV هستند که با برخورد مابین الکترونها آزاد پلاسما و الکترونها مقید آنها به تولید اشعه X منجر می شود. در این میان از پدیده باز ترکیب نیز می توان به عنوان یک منبع برای اشعه X نام برد [۱] .

آزمایش

مهمترین شناسایی در محدوده لیزر پلاسماها معمولاً توسط اسپکترومترهای از نوع بلور خمیده انجام میشود [۳] . اسپکترومتر مورد استفاده از نوع بلور خمیده طرح جوهان با بلور میکا می باشد .



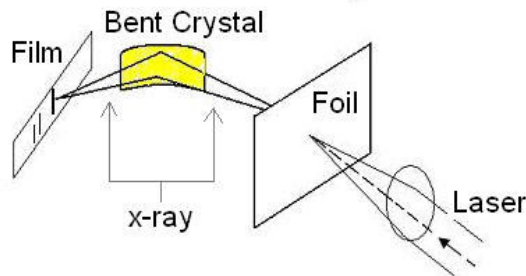
شکل (۳): نمایی از اسپکترومتر



شکل (۲): اسپکترومتر با طرح هندسی جوهان

الف: طیف سنجی اشعه X عبوری

در اینجا از ورقه های نازک فلزات استفاده شده است. شکل آزمایش در شکل (۴) آمده است.



شکل (۴): چیدمان برای طیف سنجی عبوری

لیزر پالسی CO_2 با فرکانس در حدود $f=1\text{Hz}$ به یکطرف از ورقه ها برخورد کرده اسپکترومتر در قسمت پشت ورقه قرار داده شده است. در اینجا نازک بودن ورقه ها نقش مهمی دارند. نتایج بدست آمده در این آزمایش در جدول (۱) نشان داده شده است:

جدول (۱): نتایج اشعه X عبوری

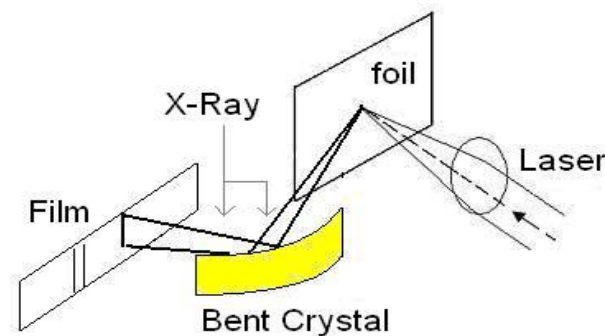
فلز	طول موج (آنگستروم)	گذار	v/c	سطح مقطع (m^2)
برنج	۱۴/۱۰	$M \rightarrow L$ (Cu)	۰/۰۸۹	$۳/۳۱ \times ۱۰^{-۲۲}$
برنج	۱۲/۵۰	$M \rightarrow L$ (Zn)	۰/۰۹۲	$۳/۱۰ \times ۱۰^{-۲۲}$
تیتانیوم	۲/۷۷	$L \rightarrow K$ (Ti)	۰/۱۳۳	$۳/۸۲ \times ۱۰^{-۲۳}$
نیکل	۱۵	$M \rightarrow L$ (Ni)	۰/۰۸۵	$۳/۷۱ \times ۱۰^{-۲۲}$
آهن	۱۷/۳۰	$M \rightarrow L$ (Fe)	۰/۰۷۹	$۳/۲۸ \times ۱۰^{-۲۲}$

همانطوریکه در جدول ۱ دیده میشود خطوط طیفی مربوط به عناصر تشکیل دهنده فلز و گذارهای مربوطه مشخص میشود. در ستون دیگر حداقل سرعت لازم برای الکترونهاي پلاسما که بتوانند این گذار

را ایجاد کنند محاسبه شده است . با توجه به عرض پالس در لیزر CO_2 استفاده شده که در حدود $S \times 10^{-9} \times 150$ است از رابطه (۲) تعداد برخورد در هر پالس در حدود 10^{12} می باشد. این تعداد برخورد خود نشانگر پر برخورد بودن پلاسما و توان تولید امواج الکترومغناطیسی زیادی را دارا می باشد . در ستون دیگر جدول شماره (۱) سطح مقطع کولنی برخورد بیش از 10^{-22}m^2 می باشد در این نوع آزمایش باید ضخامتهای بسیار نازک در حدود $20 \mu\text{m}$ بکار برده شود پدیده جذب در این آزمایش بسیار بالاست چرا که فوتونهای اشعه X تولیدی براحتی توسط اتمها جذب می شوند.

ب: اشعه X غیر عبوری

در اینجا چیدمانی مانند شکل (۵) استفاده می شود که اسپکترومتر و لیزر Nd:YAG در یکطرف قرار دارند. در اینجا عبور اشعه از ورقه مطرح نیست و اشعه براحتی بطرف اسپکترومتر گسیل می شود. نتایج حاصله در این مرحله در جدول (۲) آمده است.



شکل (۵): چیدمان برای طیف سنجی غیر عبوری

با مقایسه دو آزمایش دیده میشود که خطوط طیفی در قسمت دوم بمراتب بهتر از آزمایش اول است (شکل (۶)).



شکل (۶): نمونه ای از فیلم در آزمایش غیر عبوری نیکل

چرا که فوتونهای اشعه X تولیدی در آزمایش اول براحتی توسط اتمها جذب می شوند . در این آزمایش با توجه به شتابدار شدن الکترونها در جهت عمود بر سطح جامد فوتونهای ایجاد شده در اثر تابش ترمزی موازی با سطح جامد حرکت میکنند .

جدول (۲): نتایج اشعه X غیر عبوری

فلز	طول موج (آنگستروم)	گذار	v/c	سطح مقطع (m^2)
استیل	۱,۹۸	$L \rightarrow K$ (Fe)	۰/۱۶	$۲/۵۴ \times ۱۰^{-۲۳}$
تیتانیوم	۲,۷۸	$L \rightarrow K$ (Ti)	۰/۱۳۳	$۳/۸۲ \times ۱۰^{-۲۳}$
نیکل	۱۵	$M \rightarrow L$ (Ni)	۰/۰۸۵	$۳/۷۰ \times ۱۰^{-۲۳}$
مس	۱,۵۳	$L \rightarrow K$ (Cu)	۰/۱۸	$۱/۹۸ \times ۱۰^{-۲۳}$

با توجه به عرض پالس لیزر Nd:YAG که در حدود ۲۰۰×۱۰^{-۹} s است از رابطه (۲) تعداد برخورد در هر پالس در حدود $۱۰^{۱۲}$ می باشد. این تعداد برخورد بر برخورد بودن پلاسما را نشان می دهد و سطح مقطع برخورد بیش از $۱۰^{-۲۳} m^2$ می باشد.

نتیجه گیری

استفاده از طیف سنجی اشعه X گسیلی از ماده ی جامدی که مورد تابش لیزر قرار می گیرد می تواند روش مناسبی برای تولید پلاسما ی پر برخورد و تشخیص عناصر موجود در ماده باشد. اثری که الکترونیهای مقید لایه جامد در این پلاسما ایجاد میکنند بصورت انحراف مسیر الکترونیهای شتاب دار شده خود را نشان میدهد که در مورد این پلاسما چون الکترونها دارای انرژیهای در حدود keV می باشد این انحراف در حد $۰/۰۱$ rad می باشد که نشاندهنده قابل صرف نظر بودن اثر الکترونها می باشد. تعداد برخوردها در واحد زمان در این پلاسما می تواند نشانگر پر برخورد بودن پلاسما باشد. فرکانس برخورد در پلاسما ی تولیدی در حدود $۱۰^{۲۰}$ Hz می باشد که با توجه به لیزر CO_2 که عرض پالسی در حد ۱۵۰ ns دارد می توان گفت که تعداد برخورد در هر پالس در حدود $۱۰^{۱۲}$ می باشد. همچنین با توجه به لیزر Nd:YAG که عرض پالسی در حد ۲۰۰ ns دارد می توان گفت که تعداد برخورد در هر پالس در حدود $۱۰^{۱۲}$ می باشد. این مقدار برخورد در هر دو آزمایش نشانگر پر برخورد بودن پلاسماست.

سپاسگذاری

با تشکر از جناب آقای کاوه سیلا خوری مسئول آزمایشگاه لیزر CO_2 و جناب آقای عباس خدابخشی مسئول آزمایشگاه کنترل کیفی لیزر Nd:YAG از پژوهشکده لیزر و اپتیک سازمان انرژی اتمی ایران برای همکاری صمیمانه ای که داشتند.



مراجع

- [1] Heinrich Hora "*Laser Plasma Physics*" SPIE PRESS 2000
- [2] Peter A. Sturrock " *Plasma Physics : an introduction to the Theory of Astrophysical, Geophysical and Laboratory plasmas* . England :Cambridge university Press ,1994
- [3] L.LABATE M.GALIMBERTI A.GIULIETTI D. GIULIETTI F.A.GIZZI R.NUMICO A.SALVETTI "Line spectroscopy with spatial resolution of laser-Plasma X-Ray emission" *Laser and Particle Beams*(2001),VOL **19**,117-123
- [4] Z Andereic L Aschke H-J Kunze "A Spectroscopic study of Plasmas Produced by Laser ablation of hollow aluminium targets" *J.Phys. D:Appl.Phys.***31**(1998)
- [5] B.D.CULLITY "Elements of X-Ray Diffraction " 1978 Second Eddition Addison-Wesley Publishing Company