

مشخصه سنجی تابش EUV و ایکس نرم از پلاسما تولید شده در میدان لیزر نانوثانیه به وسیله آشکار ساز دیود نوری AXUV

امیرحسین فرهبد و نادر مرشدیان

پژوهشکده پلاسما و گداحت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای

پست الکترونیکی: nmorshed@aeoi.org.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۸/۱۳؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۸/۰۷/۲۲)

چکیده

نتایج تجربی به دست آمده از تابش ایکس نرم (SXR) و فرابنفش قوی یا EUV به وسیله آشکارساز دیود نوری AXUV حاصل از برهم‌کنش میدان لیزر نانوثانیه برای اولین بار در ایران مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته‌اند. تابش فرابنفش قوی و ایکس نرم از پلاسما تولید شده با هدف فلزی استیل - ۳۱۶، گسیل می‌شود. سامانه لیزری، پالسی با انرژی ۲۵۰ میلی ژول، با پهنای زمانی ۱۰ - ۳۰ نانوثانیه در طول موج ۱۰۶۴ نانومتر تولید می‌کند. نتایج در محدوده طول موج تابشی یک رابطه خطی بین انرژی پالس لیزر و انرژی تابش از پلاسما را نشان می‌دهد. پالس‌های تابش پلاسما در این محدوده با قله مشخص و بلند در سیگنال حاصل از آشکارساز AXUV با پهنای زمانی حدود ۱۰ - ۱۵ نانوثانیه و با تأخیر حدود ۲۰ نانوثانیه نسبت به پالس لیزر مشاهده و ثبت شد. همچنین میانگین بازدهی تبدیل انرژی لیزر به تابش پلاسما در گستره بینایی ایکس نرم و فرابنفش قوی حدود ۲٪ محاسبه شده است.

واژه‌های کلیدی: آشکارساز دیود نوری AXUV، پلاسما لیزری، تابش ایکس نرم، تابش فرابنفش قوی، بهره تبدیل انرژی

۱. مقدمه

از رفتار زمانی و مکانی تابش ایکس، این آشکارساز را در گستره وسیعی از کاربرد آزمایشگاهی قرار داده است. به عنوان مثال استفاده از آشکارساز AXUV برای اندازه‌گیری دقیق توان جمعی اتلافی تابشی پلاسما در دستگاه‌های گداحت، از جمله توکامک EAST [۳] و توکامک M11 [۴]. آشکارساز AXUV همچنین برای مطالعه بازسازی توموگرافی در دستگاه‌های ماریپج بزرگ (LHD) [۵] و گسیل ناخالصی در دستگاه‌های ماریپج فشرده (CHS) استفاده می‌شود [۶]. همچنین اندازه‌گیری تابش

یکی از روش‌های تشخیصی اصلی در فراهم آوردن دانش پایه از مشخصه سنجی پلاسماهای لیزری همانا اندازه‌گیری تابش گسیل شده از پلاسماست. نمونه‌های مختلفی از آشکارسازی ایکس از قبیل: فیلم‌های پرتونگاری^۱، دایودها، فوتو مولتی پلایرها و دوربین‌های CCD وجود دارد [۱ و ۲]. در دو دهه اخیر قابلیت استفاده از آشکارساز AXUV در یک آرایه ساده برای تحلیل جزئی

۱. Photography

پالسی به پهنای ۱۰-۳۰ نانوثانیه و شدتی در حدود 10^{11} وات بر سانتی متر مربع، با کانونی شدن روی هدف ایجاد می کند. آشکارساز AXUV با زاویه ۴۵ درجه نسبت به عمود بر سطح هدف استیل - ۳۱۶ و در فاصله ۱۴ سانتی متری از هدف قرار دارد. این زاویه و فاصله به عنوان زاویه و فاصله بهینه با فرض همسانگرد بودن تابش پلاسمایی، برای دور ماندن از آسیب پلاسما یا بازتاب پالس لیزر و نیز عملکرد خطی AXUV، در نظر گرفته شده است؛ زیرا احتمال حالت اشباع برای دیود نوری در اثر شدت پرتوی پراکنده شده لیزر وجود دارد. باریکه لیزر به وسیله یک عدسی با فاصله کانونی مشخص صرفاً با تعیین ماکروسکوپی فاصله، روی هدف متمرکز و کانونی می شود و پس از هر پالس لیزر، محل هدف برای تابش روی نقطه جدید روی سطح با تنظیم نگهدارنده هدف جابه جا می شود. از یک فیلتر نازک آلومینیومی به ضخامت ۲۰۰ نانومتر استفاده شده که می تواند از ورود الکترون هایی تا انرژی ۴ کیلو الکترون ولت به داخل آشکارساز AXUV جلوگیری کند [۱۹]. فشار محفظه برهم کنش با دو پمپ چرخشی و توربومولکولار تا 10^{-6} میلی بار تخلیه می شود. اما با کاهش فشار تا این حد، سیگنال هایی با تأخیر میکروثانیه، ناشی از رسیدن جریان یونی پلاسما و یا تابش فلئورسانس، روی AXUV اضافه شده این افزایش تحلیل درست و دقیق سیگنال مربوط به ایکس نرم و یا فرابنفش قوی را، که با تأخیر نانو ثانیه ای در زمان برهم کنش لیزر گسیل می شود و منظور نظر مقاله حاضر است را، مشکل می سازد. لازم است اشاره داشته باشیم که یون ها با داشتن جرم بیشتر و در نتیجه سرعت کمتر و در فشار پایین تر که از برخوردهای اتلافی جلوگیری می کند، طبعاً در زمان دیرتر نسبت به تابش ایکس نرم و EUV مورد نظر می توانند خود را به فوتو دیود رسانده و سیگنال هایی در مرتبه میکروثانیه پس از پالس لیزر ایجاد کنند. این سیگنال ها همچنین می تواند ناشی از تابش فلئورسانسی اتم های تحریک شده در واکنش های تحریکی برخوردی الکترون- یون و یا یون- یون باشد. سیگنال های مربوط به جریان یونی و تابش فلئورسانسی نیز در جای خود اهمیت دارند و به طور مجزا و دقیق به وسیله آشکارساز AXUV ثبت شده اند.

سینکروترونی در کاربردهای پزشکی با استفاده از این دیودهای نوری گزارش شده است [۷]. به علاوه از این دیود نوری ها در مشخصه سنجی تابش فرابنفش قوی گسیل شده از پلاسمای لیزری در کاربردهای لیتوگرافی نیز استفاده شده است [۸]. شایان ذکر است، قابلیت استفاده از این دیودهای نوری در دیگر دستگاه های پلاسمای تخلیه الکتریکی مانند تخلیه حجمی تکراری نانوثانیه [۹] و "تراستر هال" [۱۰-۱۲] مورد مطالعه قرار گرفته است. مطالعات بسیاری در زمینه برهم کنش لیزر با ماده جامد، به تابش فوتون های ایکس و ذرات پر انرژی گسیل شده از پلاسما متمرکز است [۱۳-۱۶]. مشخصه سنجی چنین چشمه های تابشی درخشان و پر انرژی ضرورت استفاده از آشکارساز حساس و دقیق را طلب می کند.

نکته های اساسی در به کارگیری AXUV عبارتند از: اشباع، رفتار غیرخطی، بار اضافه روی دیود نوری، تأثیر نوفه الکترومغناطیسی و همچنین نبود توانایی آن در تفکیک بین آشکارسازی پرتو ایکس ناشی از تابش فلورسانس و یا تابش های ناشی از برهم کنش فرایندهای بازترکیب و یونش در پلاسما دو خاصیت منحصر در آشکارساز AXUV وجود دارد: الف) در ناحیه ناخالصی n بازترکیب حامل های تولید شده از برهم کنش فوتون، وجود ندارد. بنابراین بهره کوانتومی لایه اکسید سیلیکون میانی بالاست. ب) همچنین لایه اکسید سیلیکون مانند یک پنجره نازک به ضخامت ۳ تا ۷ میلی متر روی سطح آن به عنوان یک لایه محافظ، کمترین شفافیت را برای فوتون هایی در گستره انرژی ۷ تا ۱۰۰ الکترون ولت دارد [۱۷ و ۱۸].

در گزارش حاضر، نتایج تجربی تابش پلاسمایی حاصل در ناحیه تابش ایکس نرم و فرابنفش قوی و بهره تبدیل انرژی تابش لیزر نانوثانیه به تابش پلاسمایی در این ناحیه ناشی از برهم کنش لیزر با هدف فلزی، ارائه شده است. همچنین به نوعی درجه بندی AXUV در محدوده شدت لیزر و فشار گاز محیطی مورد آزمایش قرار گرفته است.

۲. شرح آزمایش

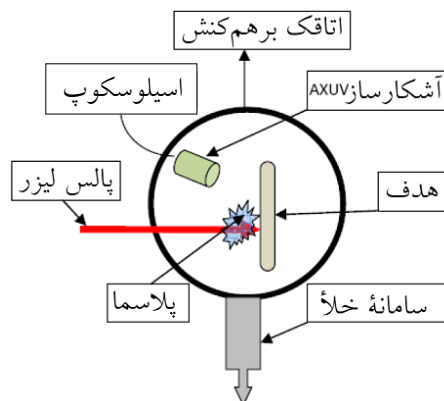
لیزر نئودیمیم- یگ در طول موج ۱۰۶۴ نانومتر با سویچ Q

۳. نتایج و تحلیل داده‌ها

در محدوده زمانی برهم‌کنش لیزر و تشکیل پلاسمای، سهمی از انرژی لیزر به وسیله پلاسمای تولید شده روی سطح هدف در محدوده چگالی بحرانی یعنی: $\omega_L^2 \sim (n_c e^2) / (\epsilon_0 m_e)$ ، به طوری که ω_L ، بسامد لیزر، n_c و m_e به ترتیب بار، چگالی بحرانی و جرم الکترون و ϵ_0 ضریب گذردهی خلأ هستند جذب می‌شود. البته با توجه به شدت لیزر یون‌هایی با درجه یونش متفاوت ایجاد می‌شود. تابش پیوسته ایکس نرم هم ناشی از فرایند تابش ترمزی یا بر مشترالانگی به طور غالب در آن محدوده طول موجی و هم ناشی از تابش خطی فروافت ترازهای انرژی تحریکی بالاتر یون‌های برانگیخته است. همچنین تابش EUV نیز از فروافت ترازهای تحریکی داخلی یون‌ها در محدوده طول موجی فرابنفش قوی گسیل می‌شود. با توجه به جمع جریان‌های تولید شده به وسیله آشکارساز از گسیل‌های متفاوت و در نظر گرفتن تأخیر زمانی، این جریان‌های ادغام و جمع شده و در سیگنال‌های مشخصی ظاهر می‌شود. با بالا رفتن شدت لیزر درجه یونش، چگالی پلاسمای و دمای الکترون‌ها نیز بالاتر رفته و تابش‌ها حتی می‌توانند در محدوده ایکس سخت نیز باشند. با داشتن آشکارساز بیناب نما می‌توان شدت هر یک از تابش‌ها را بر اساس تفکیک طول موجی به دست آورد.

با فرود آمدن تابش پلاسمایی در محدوده طول موجی مورد نظر، روی سطح AXUV جریان الکتریکی متناسب با توان تابشی در مدار آشکارساز به وجود می‌آید. با تعریف حساسیت نوری به شکل $R(\lambda)$ در واحد آمپر بر وات (A/W) و ضریب عبور $\beta(\lambda)$ (λ طول موج فوتون گسیلی از پلاسمای)، جمع توان تابشی در محدوده طول موجی مورد نظر قابل اندازه‌گیری خواهد بود. با تعریف $R(\lambda)$ به عنوان حساسیت نوری AXUV، رفتار آن بر حسب طول موج از طریق نقطه‌یابی از روی داده‌های مشخص توسط شرکت سازنده و نوع AXUV طبق نمودار شکل ۲ به دست می‌آید. همچنین ضریب عبور به شکل رابطه (۱) تعریف می‌شود [۱۷ و ۱۸]:

$$\beta(\lambda) = Q_{\text{filter}} / Q_{\text{AXUV}}, \quad (1)$$

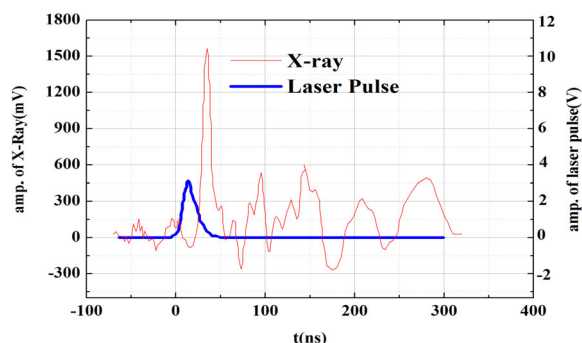


شکل ۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) محفظه برهم‌کنش و اجزای آزمایش.

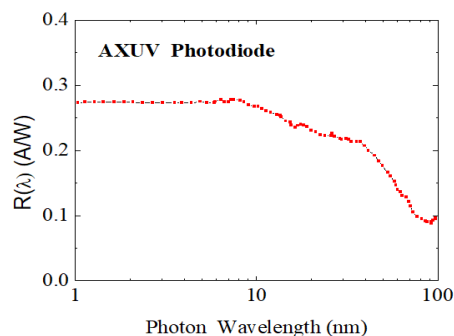
این داده‌ها خود نتایج مستقل و جدیدی به شمار می‌روند که توسط نویسندگان این مقاله در دست بررسی، تهیه و در مقاله دیگر ارائه خواهد شد. برای دوری جستن از سیگنال‌های یونی یا تابش فلئورسانسی در مرتبه زمانی میکروثانیه، با افزایش فشار تا ۹ میلی بار این سیگنال‌های مجزا حذف شده و سیگنال اصلی مربوط به تابش پلاسمایی در محدوده زمانی برهم‌کنش لیزر، یعنی ایکس نرم و فرابنفش قوی با تأخیر حدود ۲۰ نانوثانیه بعد از پالس لیزر، مورد توجه قرار می‌گیرد. شکل ۱، نمایی از چیدمان آزمایش را به شکل طرح‌واره نشان می‌دهد.

پالس تابش لیزر به وسیله یک پین دیود معمولی (APD) و پالس تابش پلاسمایی از ایکس نرم و فرابنفش قوی به وسیله AXUV مستقیماً و بدون مدار واسط و در صورت لزوم با خود تضعیف کننده اهمی دستگاه اسپکروسکوپ تکترونیکس^۱ ۳۰۵۲B ۵۰۰ MHz-GS/s-TDS به شکل سیگنال‌های مشخصی ثبت می‌شود. قبلاً با شرایط مشابه آزمایشگاهی در میدان لیزر نانوثانیه و شدت مشابه، مشخصه سنجی پلاسمای حاصل، مانند دمای الکترون‌ها، چگالی یونی و سرعت ذرات باردار بر اساس زمان پرواز (TOF) در فشارهای پایین اتمسفر به وسیله ردیاب لانگمیر به عنوان یک ردیاب فعال انجام شده است [۲۰]. اما در مقاله حاضر از دیود نوری AXUV به عنوان یک ردیاب غیر فعال، تابش از ناحیه پلاسمای در محدوده ایکس نرم و EUV اندازه‌گیری و ضریب تبدیل انرژی محاسبه شده است.

۱. Tektronix



شکل ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) سیگنال پالس لیزر از یک دیود نوری APD (آبی-کوچکتر) و سیگنال دیود نوری AXUV (قرمز-بزرگتر) بر حسب طول موج.



شکل ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودار حساسیت نوری فوتو دیود بر حسب طول موج.

جدول ۱. ستون سمت چپ انرژی پالس لیزر و ستون سمت راست توان تابشی پلاسما.

$E_L(\text{mJ})$	$P_{X\text{-ray}}(\text{mW})$
۶۴	۶۰٫۶
۹۳	۹۵٫۶
۱۲۳	۱۱۴
۱۵۰	۱۳۷٫۴
۱۸۶	۱۷۰٫۶
۲۳۹	۱۹۵٫۶

X-ray (استفاده شده) بر حسب انرژی‌های مختلف پالس لیزر آمده است.

مقدار کل توان تابشی برای زاویه فضایی تابشی نیم‌کره رویی (نیم‌کره پستی، داخل هدف است) با فرض همسانگرد بودن تابش پلاسمایی، طبق رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$P_{total} = \frac{1}{2} \int (P / \Delta\Omega) d\Omega, \quad (3)$$

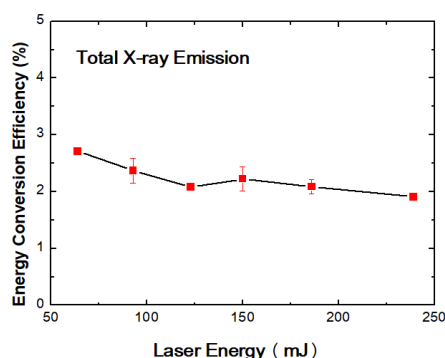
سطح مؤثر تابشی آشکارساز $A = 0.5 \text{ mm}$ و فاصله از هدف تابشی $r = 140 \text{ mm}$ است، بنابراین المان زاویه فضایی تابش به صورت $(sr) = 2/5 \times 10^{-6}$ خواهد بود. بدین ترتیب کل توان تابشی برای زاویه فضایی نیم‌کره رویی هدف به مقدار $P_{total} = 104.7 \text{ mW}$ از رابطه (۳) محاسبه می‌شود. مطابق نتیجه به دست آمده و داده‌های جدول ۱، با احتساب پهنای زمانی سیگنال پالس تابشی مورد نظر، انرژی آن

به طوری که Q_{AXUV} و Q_{filter} به ترتیب بهره کوانتومی AXUV با بدون فیلتر هستند و از مشخصات کارخانه‌ای آن قابل استخراج هستند. بدین ترتیب برای محاسبه دقیق‌تر حساسیت نوری AXUV رابطه (۲) را در محدوده طول موجی $1 - 100 \text{ nm}$ نانومتر و احتساب ضریب کوانتومی تعریف می‌کنیم [۲۱]،

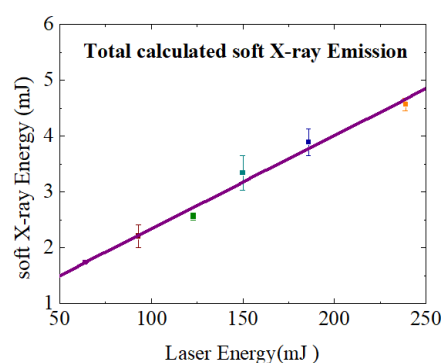
$$R_{mean} = \frac{1}{\lambda_{max} - \lambda_{min}} \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \beta(\lambda) R(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

حساسیت نوری میانگین برای آشکارساز $R_{mean} = 0.217 \text{ (A/W)}$ بر حسب آمپر بر وات به دست می‌آید. حال با دانستن جریان الکتریکی در AXUV و مقاومت 26.4Ω برای خروجی ولتاژ حاصل از سیگنال AXUV، توان تابشی از پلاسما روی آشکارساز قابل محاسبه است. در شکل ۳ سیگنال‌های مربوط به پالس لیزر از یک دیود نوری معمولی و آشکارساز AXUV (تابش آن در شکل برای خلاصه فقط با X-Ray نمایش داده شده) را با تأخیر حدود ۲۰ نانوثانیه نسبت به لیزر نشان می‌دهد.

با محاسبه ولتاژ سیگنال AXUV (فقط اولین و بلندترین سیگنال)، جریان الکتریکی در مدار آشکارساز به مقدار $I_{AXUV} = 72/22 \text{ (A)}$ به دست می‌آید. با داشتن حساسیت نوری میانگین آشکارساز ($0.217 \text{ آمپر بر وات}$)، توان تابشی مورد نظر برای زاویه فضایی تابشی آشکارساز به مقدار $P \approx I_{AXUV} / R_{mean} = 104.7 \text{ (W)}$ به دست می‌آید. در جدول ۱ توان تابشی از پلاسما (برای خلاصه فقط از



شکل ۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) رفتار بهره تبدیل انرژی بر حسب انرژی لیزر.



شکل ۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) رفتار خطی انرژی محاسبه شده تابش ایکس نرم و فرابنفش پلاسما بر حسب انرژی لیزر (خط، نمایش برازش خطی به نقاط اندازه‌گیری شده از داده‌های آزمایش).

در حدود 10^{11} وات بر سانتی‌متر مربع و پهنای زمانی ۱۰-۳۰ نانوثانیه و اندازه‌گیری در زاویه ۴۵ درجه نسبت به عمود بر سطح، در کار معتبر دیگر با مشخصات لیزر تقریباً مشابه، ناهمسانگردی تابش پلاسمایی در ناحیه EUV از دیگر پژوهشگران گزارش شده و بیشینه آن در راستای عمود بر هدف و نزدیک به راستای باریکه لیزر برهم‌کنشی بوده است [۲۱].

۴. نتیجه‌گیری

برای اولین بار در داخل کشور پالس تابش ایکس نرم و فرابنفش قوی از پلاسمای تولید شده در میدان لیزر نانوثانیه به وسیله آشکارساز دیود نوری AXUV ثبت شد. این پالس دارای پهنای حدود ۱۵ نانوثانیه و تأخیر زمانی حدود ۲۰ نانوثانیه نسبت به پالس لیزر اندازه‌گیری شد. بیشینه انرژی پالس تابشی از پلاسما در محدوده طول موجی ایکس نرم و فرابنفش قوی حدود ۱۰ میلی ژول و نسبت به بیشینه پالس لیزر در حدود ۲۵۰ میلی ژول، یک ضریب بهره تبدیل انرژی به مقدار ۲/۵ درصد را در طول موج ۱۰۶۴ نانومتر برای پالس لیزر و هدف برهم‌کنشی از فلز استیل - ۳۱۶ پیش‌بینی می‌کند. رفتار انرژی پالس تابشی پلاسما نسبت به انرژی لیزر در محدوده طول موجی یاد شده تقریباً خطی و رفتار ضریب بهره تبدیل انرژی با کاهشی آرام نسبت به افزایش انرژی لیزر همراه است.

نمودار شکل ۴، یک رفتار خطی را نشان می‌دهد.

ضریب بهره تبدیل انرژی از انرژی لیزر به انرژی تابشی پلاسما (برای سادگی در فرمول فقط از شاخص X-ray استفاده شده) در ناحیه داده شده با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\eta_{X-ray} = (E_{X-ray} / E_{laser}) \times 100. \quad (4)$$

بدین ترتیب ضریب بهره تبدیل انرژی، مطابق شکل ۵ تقریباً یک رفتار خطی، با کاهشی آرام نسبت به افزایش انرژی لیزر، دارد. میانگین بهره تبدیل انرژی، حدود ۲/۵ درصد محاسبه شده است [۲۱]. البته انتظار می‌رود که با بالا رفتن انرژی لیزر، الکترون‌های پلاسما گرم‌تر و چگال‌تر شود و توان تابشی گسیل ایکس نرم و EUV بیشتر شود. اما با چگالش بیشتر پلاسما با توجه به فشار هوای محیط (۹ میلی بار)، سهمی از تابش‌های پلاسما در خود شعله پلاسمایی مخلوط شده در گاز محیطی، جذب شده و نرخ برخوردی اتلافی در پلاسمای چگال‌تر نیز افزایش می‌یابد و نسبت را دوباره کاهش می‌دهد. همان‌طور که در بالا اشاره شد با توجه به فشار هوای محیطی محفظه برهم‌کنشی حدود ۹ میلی بار، سهم قابل توجهی از تابش ایکس و EUV نیز خارج از محیط پلاسما تا رسیدن به آشکارساز AXUV در هوای محیط جذب شده و سهم ضریب بهره تبدیل انرژی را کاهش می‌دهد.

البته با توجه به شرایط حاضر در این مقاله یعنی شدت لیزر

مراجع

14. P R Willmott and J R Huber, *Rev. Mod. Phys.* **72** (2000) 315.
15. E Woryna, *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **71** (2000) 949.
16. L Torrisi, *et al.*, *Appl. Surf. Sci.* **217** (2003) 319.
17. "Opto Diode Optoelectronics Data Book", Innovators in Optoelectronics, http://optodiode.com/pdf/Opto_Diode_an_ITW_Company.pdf, an ITW Company, www.irdinc.com (2015).
18. A Saxena *et al.*, *Applied Physics* **2**, 2 (2010) 176.
۱۹. ن. مرشدیان، ف. شاهوردی و ا. ح. فرهبد، *مجله پژوهش فیزیک ایران* **۱۵**، ۱ (۱۳۹۴) ۲۵.
19. N Morshedian, F Shahverdi, and A H Farahbod, *Iranian J. Phys. Res.* **15**, 1 (2015) 25.
۲۰. م. افشاری، "مطالعه پرتو X نرم حاصل از برهم‌کنش باریکه لیزر پرتوان با ماده"، دانشگاه امام حسین، اسفند (۱۳۸۹).
21. Y Tao, F Sohbatazadeh, A Sunahara and T Kawamura, *Appl. Phys. Lett.* **85**, 11 (2004) 1919.
1. A G Michette, "Optical systems for soft X-rays, Plenum Press", New York (1986).
2. E Spiller, "Soft X-ray Optics", SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, Washington (1994)
3. Y Duan *et al.*, *Plasma Science and Technology* **13**, 5 (2011) 546.
4. A S Prokhorov, *et al.*, *Plasma Physics Report* **30**, 2 (2004) 136.
5. Y Liu, *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **74**, 4 (2003) 2312.
6. C Suzuki, B J Peterson, and K Ida, *Rev. Sci. Instrum.* **75**, 10 (2004) 4142.
7. S Santosh, *et al.*, *X-Ray Spectrom.* **45** (2016) 185.
8. M Richardson, *et al.*, *J. Vac. Sci. Technol. B* **22**, 2 (2004) 785.
9. J Tang, *et al.*, *Plasma Science and Technology* **18**, 3 (2016) 273.
10. W Liqiu, *et al.*, *Journal of Applied Physics* **117** (2015) 053301.
11. W Liqiu, *et al.*, *Vacuum* **123** (2016) 126.
12. L Wenbo, *et al.*, *Vacuum* **136** (2017) 77.
13. L A Gizzi, *et al.*, *Phys. E* **49** (1994) 5628.