

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

امیرحسین فرهد و نادر مرشدیان

پژوهشکده پلاسما و گداخت 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 نانوثناییه برای اولین بار در ایران مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته‌اند. تابش فرابنفش قوی و ایکس نرم از پلاسمای تولید شده با هدف فلزی استیل - ۳۱۶، گسیل می‌شود. سامانه لیزری، پالسی با انرژی ۲۵۰ میلی ژول، با پهنای زمانی ۱۰ - ۳۰ نانوثناییه 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 نانوثناییه و با تأخیر حدود ۲۰ نانوثناییه 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، پلاسمای 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 گداخت، 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 می‌کند. 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 پلازما 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 می‌شود و پس از هر پالس لیزر، محل هدف برای تابش روی نقطه جدید روی سطح با تنظیم نگهدارنده هدف جابه‌جا می‌شود. از یک فیلتر نازک آلومینیومی به ضخامت ۲۰۰ نانومتر استفاده شده که می‌تواند از ورود الکترون‌هایی تا انرژی ۴ کیلو الکترون ولت به داخل آشکارساز AXUV جلوگیری کند [۱۹]. فشار محفظه برهم‌کنش با دو پمپ چرخشی و توربو مولکولار تا 10^{-6} میلی بار تخلیه می‌شود. اما با کاهش فشار تا این حد، سیگنال‌هایی با تأخیر میکروثانیه، ناشی از رسیدن جریان یونی پلازما 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 ثانیه‌ای در زمان برهم‌کنش لیزر گسیل می‌شود و منظور نظر مقاله حاضر است را، مشکل می‌سازد. لازم است اشاره داشته باشیم که یون‌ها با داشتن جرم بیشتر و در نتیجه سرعت کمتر و در فشار پایین‌تر که از برخوردهای اتلافی جلوگیری می‌کند، طبعاً در زمان دیرتر نسبت به تابش ایکس نرم و EUV مورد نظر می‌توانند خود را به فوتو دیود رسانده و سیگنال‌هایی در مرتبه میکروثانیه پس از پالس لیزر ایجاد کنند. این سیگنال‌ها همچنین می‌تواند ناشی از تابش فلئورسانسی اتم‌های تحریک شده در واکنش‌های تحریکی برخوردی الکترون-یون و یا یون-یون باشد. سیگنال‌های مربوط به جریان یونی و تابش فلئورسانسی نیز در جای خود اهمیت دارند و به طور مجزا و دقیق به وسیله آشکارساز AXUV ثبت شده‌اند.

سینکروترونی در کاربردهای پزشکی با استفاده از این دیودهای نوری گزارش شده است [۷]. به علاوه از این دیود نوری‌ها 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 دستگاه‌های پلاسمای تخلیه الکتریکی مانند تخلیه حجمی تکراری نانوثانیه [۹] و "تراستر هال" [۱۰-۱۲] مورد مطالعه قرار گرفته است. مطالعات بسیاری در زمینه برهم‌کنش لیزر با ماده جامد، به تابش فوتون‌های ایکس و ذرات پر انرژی گسیل شده از پلازما متمرکز است [۱۳-۱۶]. مشخصه سنجی چنین چشمه‌های تابشی درخشان و پر انرژی ضرورت استفاده از آشکارساز حساس و دقیق را طلب می‌کند.

نکته‌های 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 تابش‌های ناشی از برهم‌کنش فرایندهای بازترکیب و یونش در پلازما دو خاصیت منحصر در آشکارساز AXUV وجود دارد: الف) در ناحیه ناخالصی n_1 بازترکیب حامل‌های تولید شده از برهم‌کنش 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 فوتون‌هایی 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 برهم‌کنش لیزر با هدف فلزی، ارائه شده است. همچنین به نوعی درجه‌بندی AXUV در محدوده شدت لیزر و فشار گاز محیطی مورد آزمایش قرار گرفته است.

۲. شرح آزمایش

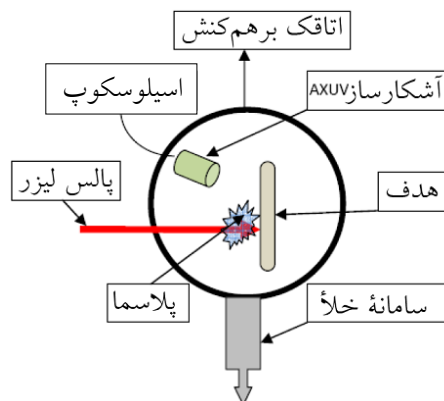
لیزر نئودیمیوم- یگ در طول موج ۱۰۶۴ نانومتر با سویچ Q

۳. نتایج و تحلیل داده‌ها

در محدوده زمانی برهم‌کنش لیزر و تشکیل پلازما، 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، ϵ ، 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 پلازما 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 پلازما)، 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]:

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

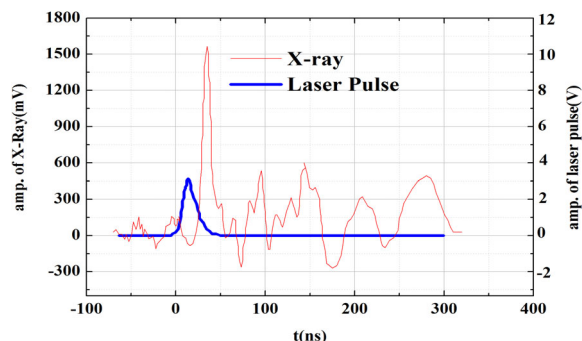


شکل ۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) محفظه برهم‌کنش و اجزای آزمایش.

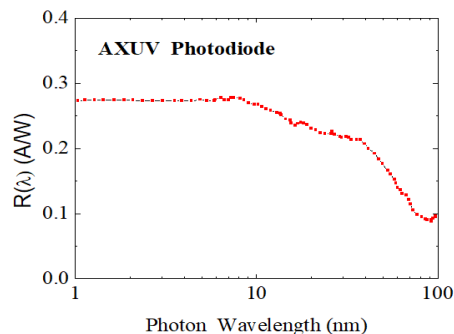
این داده‌ها خود نتایج مستقل و جدیدی به شمار می‌روند که توسط نویسندگان این مقاله در دست بررسی، تهیه و در مقاله دیگر ارائه خواهد شد. برای دوری جستن از سیگنال‌های یونی یا تابش فلئورسانسی در مرتبه زمانی میکروثانیه، با افزایش فشار تا ۹ میلی بار این سیگنال‌های مجزا حذف شده و سیگنال اصلی مربوط به تابش پلاسمایی 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 اسیلوسکوپ تک‌ترونیکس^۱ $3052B$ 500 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 پلازما 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 - کوچک تر) و سیگنال دیود نوری AXUV (قرمز - بزرگ تر) بر حسب طول موج.



شکل ۴. (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 (mJ)	P_{X-ray} (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 نیم کره رویی (نیم کره پشتی، داخل هدف است) با فرض همسانگرد بودن تابش پلاسمایی، طبق رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

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

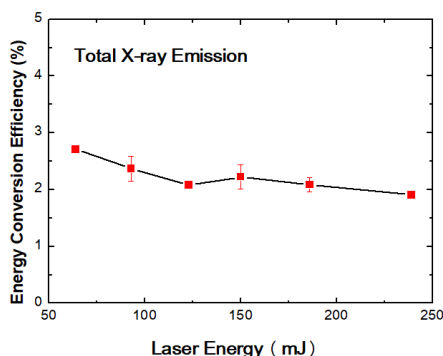
سطح مؤثر تابشی آشکارساز $A = 0.05 \text{ mm}^2$ و فاصله از هدف تابشی $r = 140 \text{ mm}$ است، بنابراین المان زاویه فضایی تابش به صورت $\Delta\Omega = A / r^2 = 2.5 \times 10^{-6} \text{ (sr)}$ خواهد بود. بدین ترتیب کل توان تابشی برای زاویه فضایی نیم کره رویی هدف به مقدار $P_{total} = 104.7 \text{ mW}$ 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 بهره کوانتمی Q_{AXUV} و Q_{filter} به ترتیب بهره کوانتمی 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 کوانتمی تعریف می‌کنیم [۲۱]:

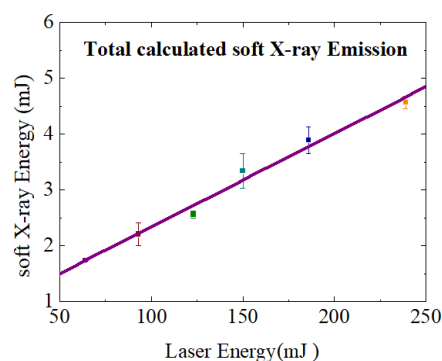
$$R_{mean} = \frac{1}{\lambda_{max} - \lambda_{min}} \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \beta(\lambda) R(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

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 (A/W) 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 $10-30$ نانوثانیه و اندازه‌گیری در زاویه 45° 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 پلاسما 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 1064 نانومتر برای پالس لیزر و هدف برهم‌کنشی از فلز استیل - 316 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 برخورد‌های اتلافی در پلاسما 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 نرم 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, 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 برهم کنش باریکه لیزر پرتوان با ماده"، دانشگاه امام حسین، اسفند (۱۳۸۹).
21. Y Tao, F Sohbatzadeh, 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.