



طیف‌سنجی پرتوهای ایکس نرم دستگاه پلاسمای کانونی صنعتی شریف با استفاده از طیف‌سنج ساخته شده با بلور خمیده‌ی استوانه‌ای

عبدالهادی حسین‌زاده*^۱، غلامرضا اطاعتی^۲، ناصر وثوقی^۱

۱. دانشکده‌ی مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، صندوق پستی: ۱۱۴-۱۴۵۶۵، تهران - ایران

۲. دانشکده‌ی مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵، تهران - ایران

چکیده: دستگاه پلاسمای کانونی قابلیت تولید الکترون، یون، نوترون و پرتو ایکس نرم و سخت را در گستره‌ای از طول موج‌ها و انرژی‌ها دارد. در این پروژه برای طیف‌نمایی پرتوهای ایکس نرم گسیلیده از دستگاه پلاسمای کانونی دانشگاه صنعتی شریف یک طیف‌سنج طراحی و ساخته شد. طرح کلی این طیف‌سنج طرح جوهان است که در آن از یک بلور خمیده‌ی استوانه‌ای استفاده شده است. نحوه‌ی عملکرد این طیف‌سنج براساس قانون براگ بوده و دلیل استفاده از بلور خمیده در آن، متمرکز کردن پرتوهای با طول موج یکسان در یک نقطه و بالا بردن شدت آن‌ها است. برای انجام آزمایش‌ها، شرایط بهینه‌ی دستگاه پلاسمای کانونی (فشار و ولتاژ) به وسیله‌ی آشکارسازهای دیود نوری و دوربین روزنه سوزنی بررسی و تعیین شد. با انتخاب چیدمان مناسب بین طیف‌سنج پرتو ایکس و دستگاه پلاسمای کانونی و تخلیه‌ی دستگاه در شرایط بهینه‌ی گسیل پرتو ایکس نرم، خطوط طیفی ثبت شده بر روی فیلم رادیوگرافی و گذارهای اتمی مربوط به آن‌ها تحلیل و اندازه‌گیری شد. نتیجه‌های آزمایش‌ها نشان داد که طول موج‌های پرتو ایکس نرم گسیلیده از پلاسمای آرگون یونیده شده، عمدتاً در بازه‌ی بین ۳ تا ۴ آنگستروم بوده و از این بین، گذار اتمی $1s^2-1s^2p$ مربوط به گسیل طول موج ۳۹۴۳ آنگستروم دارای بیش‌ترین شدت در بین سایر خطوط طیفی است.

کلیدواژه‌ها: پلاسمای کانونی، طیف‌سنج، پرتو ایکس، بلور خمیده

Design and construction of a bent crystal spectrometer for studying soft X-rays of Sharif Plasma Focus

A.H. Hosseinzadeh*¹, G.R. Etaati², N. Vosoughi¹

1. Department of Energy Engineering, Sharif University of Technology, P.O.Box: 14565-114, Tehran - Iran

2. Energy Engineering and Physics Department, Amir Kabir University of Technology, P.O.Box: 15875-4413, Tehran - Iran

Abstract: A soft X-ray spectrometer based on Johann's method and an embedded curved crystal which was designed and fabricated for the Sharif University of Technology's Plasma Focus (SUT-PF) is presented in this paper. Focusing rays with the same wavelength at a point to increase the ray intensity is a reason for choosing the cylindrical curved crystal spectrometer since its performance is inspired by Bragg's law. The optimal conditions for the SUT-PF (pressure and voltage) are determined and examined by a photodiode detector and a pinhole camera before the experiments. Under the optimal discharge condition for soft X-ray generation, the recorded spectral lines on the radiography film and the corresponding atomic transitions are measured and analyzed using a suitable arrangement of the spectrometer and PF device. Experimental results confirm that the wavelength of the emitted soft X-ray from the ionized argon plasma is mainly in the range of 3 to 4 angstrom, where the atomic transition of $1s^2-1s^2p$ at the emitted wavelength of 3.943 angstrom has the highest intensity compared to other spectral lines.

Keywords: Plasma focus, Spectrometer, X-ray, Pinhole camera, Curved crystal

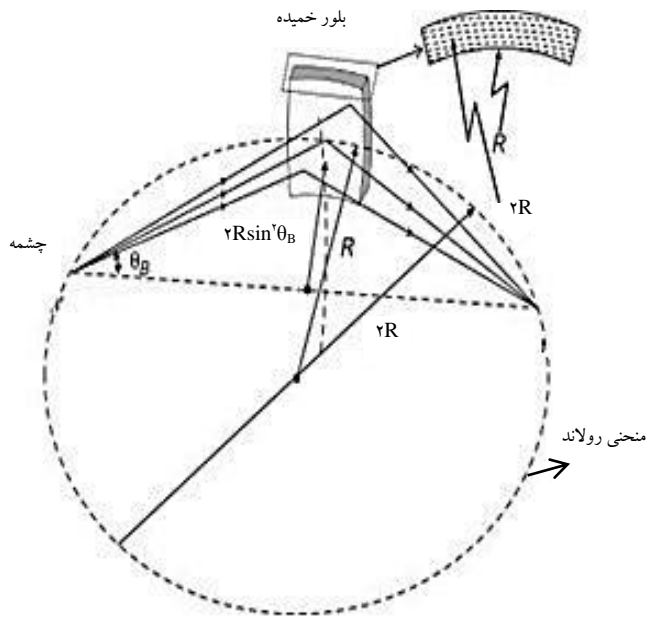


۱. مقدمه

پلاسمای شامل مجموعه‌ای از الکترون‌ها و یون‌ها است که می‌تواند در حالت به شدت یونیده‌ی ماده تشکیل شود. این فرایند یونش با افزایش دما تا مقادیر بالایی (حدود 5×10^5 تا 10^6 K) انجام می‌شود. چنین دمایی به طور طبیعی در اتمسفر کیهانی و یا در زمین در اثر انفجار هسته‌ای و هم‌چنین در روش‌های کنترل شده‌ای مانند دستگاه‌های توکامک، اسپارک‌ها و یا از طریق تمرکز پرتو لیزر تپی بر روی یک هدف جامد یا گازی به وجود می‌آید [۱، ۲]. یکی از دستگاه‌هایی که قادر به تولید پلاسمای چگال (چگالی بیش از 10^{19} cm^{-3}) و داغ (دمای بیش از ۱ keV) است، دستگاه پلاسمای کانونی^(۱) است. تابش الکترومغناطیسی در این دستگاه در نوار طیفی گسترده‌ای از امواج رادیویی تا پرتو ایکس سخت است و همین مسأله موجب کاربردی شدن این دستگاه نیز شده است [۳، ۴]. این دستگاه در اوایل دهه‌ی ۱۹۶۰ میلادی به طور مستقل توسط فیلیپوف در اتحاد جماهیر شوروی سابق [۵] و مدر در ایالت متحده‌ی آمریکا [۶] اختراع شد. اختلاف عمده‌ی این دو مدل در نسبت منظر (HARP)^(۲) (نسبت طول به قطر آند) است. طول عمر پلاسمای تنگیده‌ی تولید شده به نوع دستگاه و عامل‌های مختلف بستگی دارد ولی تا به حال، تقریباً بین ۴۰ تا ۲۰۰ نانو ثانیه در مقاله‌های مختلف گزارش شده است. دستگاه پلاسمای کانونی به خانواده‌ی زی-پینچ‌های پویا تعلق دارد که این دستگاه‌ها عمدتاً به صورت تپی کار می‌کنند. در دستگاه‌های پلاسمای کانونی که انرژی ذخیره شده‌ی آن‌ها بین ۱ kJ تا ۱ MJ و ولتاژ باردار کردن خازن در آن‌ها بین ۱۰ تا ۱۰۰ kV است، جریان الکترونی بین ۱ MA تا ۱۰۰ kA است [۷، ۸]. تغییرهای سریع شار مغناطیسی (که به طور القایی ایجاد می‌شود) و وقوع ناپایداری‌های سوسیسی ($m=0$) و کینک ($m=1$) موجب فروپاشی و تخریب پلاسمای تولید پرتو ایکس می‌شود [۹، ۱۰، ۱۱]. پرتوهای ایکس امواج پراثری الکترومغناطیسی هستند که از ساختار الکترونی بیرون هسته یا از شتاب‌گیری ذرات باردار گسیل می‌شوند. عموماً کلیه‌ی طیف‌های پرتو ایکس به دو دسته‌ی کلی تقسیم می‌شوند: آن‌هایی که در محدوده‌ی انرژی ۱۲۰ eV تا ۱۰ keV قرار دارند و به پرتو ایکس نرم معروفند و آن‌هایی که محدوده‌ی انرژی‌شان بین ۱۰ تا ۱۲۰ keV است و پرتو ایکس سخت نام دارند. طیف

خطی (مشخصه‌ی) یک ماده در بازه‌ی پرتو ایکس نرم قرار دارد. این طیف بر خلاف طیف پیوسته کاملاً به جنس ماده‌ی هدف بستگی دارد و انرژی خطوط اختصاصی با تغییر جنس هدف تغییر می‌کند. مثلاً در تنگستن ($Z=74$) انرژی خطوط k بین ۵۷ تا ۶۹ keV است و در سرب ($Z=82$) این بازه برابر با ۷۲ تا ۸۲ keV است [۳، ۱۲، ۱۳]. سه سازوکار در گسیل پرتو ایکس از دستگاه پلاسمای دخالت دارد که عبارت‌اند از: گذار آزاد-آزاد^(۳)، گذار آزاد-مقید^(۴) و گذار مقید-مقید^(۵) [۱۴]. دو گذار اول در بازه‌ی پرتو ایکس سخت قرار داشته و ناشی از برخورد الکترون با نوک الکتروند مرکزی (آند) و یا باز ترکیب الکترون آزاد با یون هستند و گذار سوم که منجر به تابش یک اتم یا مولکول برانگیخته به حالت پایه می‌شود، به تابش خطی یا مشخصه معروف است و در بازه‌ی پرتو ایکس نرم قرار دارد و به سری‌های K، L، M، N و غیره تقسیم‌بندی می‌شود. طیف‌نماهای مختلفی برای مطالعه‌ی طیف نشری عناصر و مولدهای مختلف پرتو ایکس، طراحی و ساخته شده‌اند. هیل و دیگران با پژوهش‌هایی که در دانشگاه کالیفرنیا با استفاده از یک طیف‌سنج با بلور خمیده بر روی یک توکامک انجام دادند توانستند طیف پرتو ایکس با طول موج بین ۴ تا ۲۵ آنگستروم را تحلیل کنند [۱۵]. در پروژه‌ی دیگری که توسط یوری در دانشگاه ام‌آی‌تی انجام شده است، با استفاده از یک بلور خمیده‌ی کرومی از جنس میکا به بررسی دوران پلاسمای دما و چگالی ناخالصی‌های پرتو ایکس نرم گسیلیده شده از یک توکامک با گاز کاری آرگون پرداخته شده است [۱۶]. در پروژه‌ای که توسط پیمان عباسی در سازمان انرژی اتمی ایران انجام شده است با استفاده از یک بلور خمیده از جنس میکا به بررسی طیف پرتو ایکس نرم گسیلیده از دستگاه پلاسمای کانونی نوع فیلیپوف و ناخالصی‌های آن پرداخته شده است. نتیجه‌های این پژوهش اختلاف قابل توجهی با مقادیرهای صحیح کمیت‌های مورد نظر داشتند [۱۷].

در این مقاله به طیف‌سنجی پرتوهای ایکس نرم گسیلیده از دستگاه پلاسمای کانونی دانشگاه صنعتی شریف پرداخته شده است. برای این کار طیف‌سنجی طراحی و ساخته شده است که طرح کلی آن براساس مدل جوهان^(۶) است و از یک بلور خمیده‌ی استوانه‌ای میکا در آن استفاده شده است. عملکرد این طیف‌سنج براساس قانون براگ است و دلیل استفاده از بلور



شکل ۱. طرحی از مدل جوهان. شعاع بلور خمیده دو برابر شعاع منحنی رولاند است [۱۸].

جدول ۱. مشخصه‌های بلور میکای مورد آزمایش [۱۷، ۱۸]

۹٫۸۲ Å	فاصله‌ی بلوری
۷۱۱-۲۶۰۰ eV (n=۱)	محدوده‌ی انرژی قابل اندازه‌گیری
۱۴۲۰-۵۲۳۰ eV (n=۲)	
۲٫۳۷-۱۸ Å	محدوده‌ی طول موجی قابل اندازه‌گیری

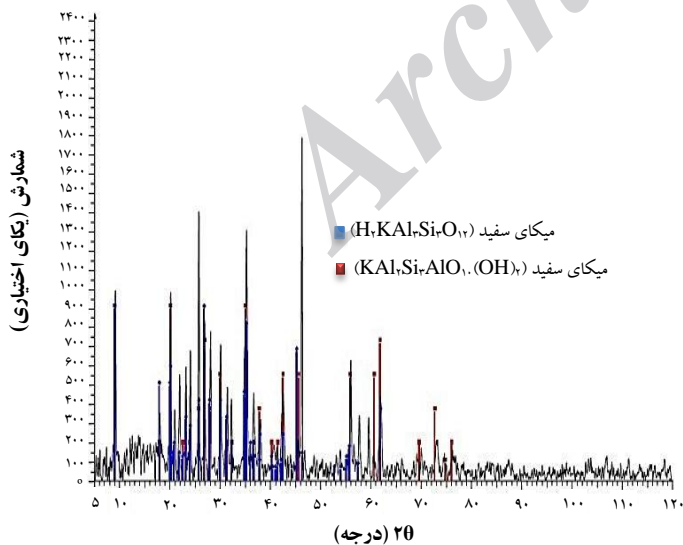
خمیده در این طیف‌سنج، همگرا کردن پرتوهای ایکس نرم با طول موج یکسان در یک نقطه و بالا بردن شدت آن‌ها است. در این مقاله شدت‌سنجی طیف‌های به دست آمده با روش ابتکاری قیاس نقطه به نقطه (مقایسه یک نقطه از طیف نسبت به یک نقطه از طیف زمینه و طیف‌های دیگر) انجام شده است. این کار توسط نرم‌افزار اوربجین‌پرو^(۷) انجام و درستی استفاده از این روش به وسیله‌ی نتیجه‌های به دست آمده از دوربین روزنه سوزنی^(۸) و آشکارساز دیود نوری بررسی شده است.

۲. روش ساخت طیف‌سنج و چیدمان آزمایش

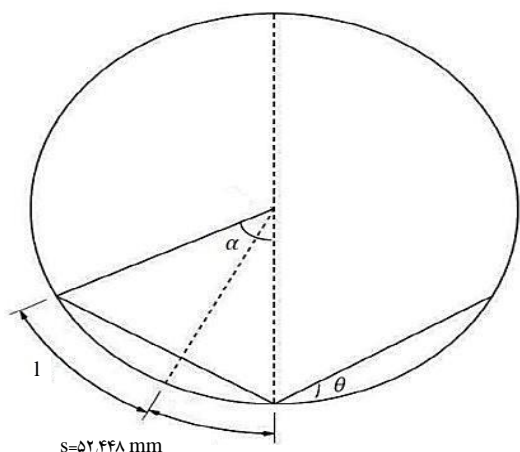
طیف‌سنج براساس طرح جوهان طراحی و ساخته شد. در این طراحی، چشمه، آشکارساز و مرکز انحنا بلور خمیده بر روی یک منحنی دایره‌ای شکل به نام منحنی رولاند قرار دارند. براساس مدل جوهان شعاع انحنا بلور خمیده، دو برابر شعاع منحنی رولاند است [۱۸]. در شکل ۱ این طرح نشان داده شده است.

طیف‌سنج به صورت استوانه‌ای به ارتفاع ۶۰ mm، قطر داخلی ۱۵۶ mm، قطر خارجی ۱۷۰ mm و از جنس آلومینیم طراحی و ساخته شد. در این طراحی، منحنی رولاند دایره‌ای به شعاع ۷۹٫۲ mm در نظر گرفته شد. بلور از جنس میکا، نوع مسکویت^(۹) و دارای ترکیب شیمیایی $H_7KAl_3Si_3O_{12}$ (نمونه‌ی خالص) و $KAl_7Si_7AlO_{10}(OH)_2$ (نمونه‌ی حرارت دیده) بود. مشخصه‌های این بلور در جدول ۱ درج شده است.

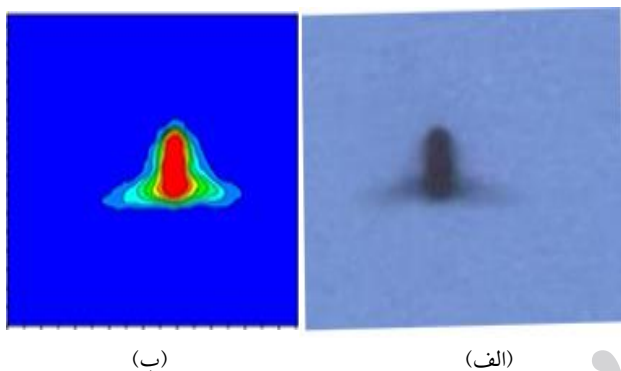
این بلور برای تعیین نوع ترکیب شیمیایی و سلامت چیدمان بلوری مورد آزمایش پراش پرتو ایکس (XRD) قرار گرفت و بعد از آن به وسیله‌ی نرم‌افزار اکسپرت^(۱۰) تحلیل شد. نمودار پراش پرتو ایکس این بلور در شکل ۲ نمونه شده است. همان‌گونه که مشخص است این طیف در شرایط کاری ۲۰ تا ۲۵ درجه‌ی سلسیوس از کیفیت نسبتاً مطلوبی برخوردار بوده و مبین این موضوع است که در زوایای بازه‌ی مورد نظر شاهد اثر پراش و به دنبال آن اندازه‌گیری طول موج مربوطه نخواهیم بود.



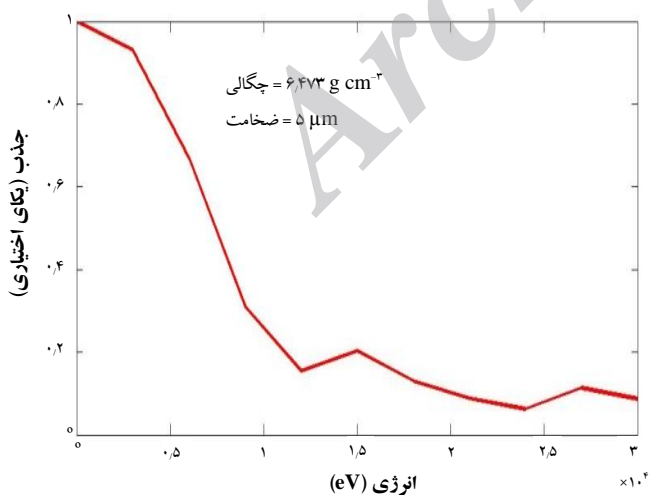
شکل ۲. الگوی پراش پرتو ایکس مربوط به بلور میکا.



شکل ۳. طرحی از روش محاسبه‌ی طول موج. l : فاصله‌ی خط طیفی ثبت شده تا سر برش داده شده‌ی فیلم، s : فاصله‌ی مرکز انحنای بلور خمیده تا سر برش داده شده‌ی فیلم.



شکل ۴. مرحله‌های شدت‌سنجی عکس‌های دوربین روزنه سوزنی (الف) تصویر ثبت شده از پلاسمای تشکیل شده توسط دوربین روزنه سوزنی، (ب) تحلیل تصویر با نرم‌افزار اوربجین پرو و شدت‌سنجی آن.



شکل ۵. منحنی جذب پرتو ایکس روی فیلم رادیوگرافی با پوشش بیرونی نقره برمید. همان‌گونه که مشخص است جذب پرتو ایکس در ناحیه‌ی ایکس سخت قابل مقایسه با ناحیه‌ی نرم اشعه ایکس نیست [۱۹].

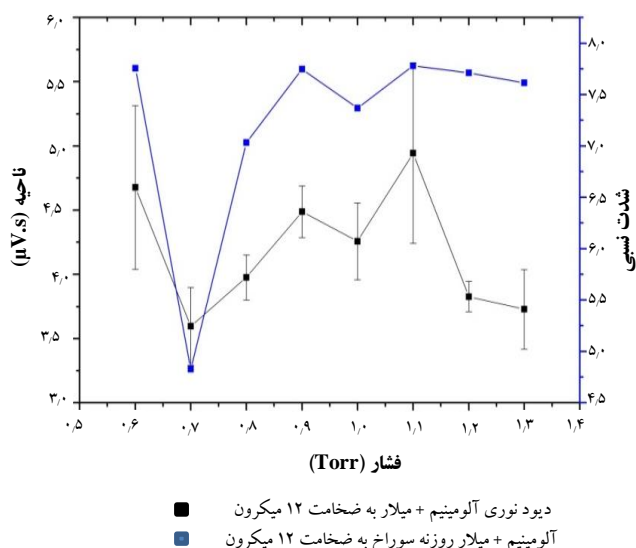
آشکارساز استفاده شده فیلم رادیوگرافی کوداک بود که به صورت مستطیلی به ابعاد $115\text{mm} \times 15\text{mm}$ برش داده شده بود. برای شناسایی و تحلیل گذارهای ثبت شده‌ی اتمی، یک سر فیلم برش داده شده بود و از رابطه‌ی براگ برای پیدا کردن طول موج مربوط به هر گذار اتمی استفاده شد. رابطه‌ی براگ برای طیف‌سنج طراحی شده، این است

$$n\lambda = 2d \sin\left(\frac{l+s}{2R_{\text{rowland}}}\right) \quad (1)$$

که در آن، $l(m)$ فاصله‌ی خط طیفی ثبت شده تا سر برش داده شده‌ی فیلم، $s(m)$ فاصله‌ی مرکز انحنای بلور خمیده تا سر برش داده شده‌ی فیلم، $d(m)$ فاصله‌ی بلوری شبکه، n مرتبه‌ی پراش پرتو ایکس (۱ یا ۲)، $R(m)$ شعاع مرکز انحنای بلور خمیده که برابر شعاع منحنی رولاند است و $\lambda(m)$ طول موج پرتو ایکس نرم پراش یافته از بلور خمیده است (شکل ۳).

برای به دست آوردن شرایط بهینه‌ی گسیل پرتو ایکس نرم، دستگاه پلاسمای کانونی از یک دوربین روزنه سوزنی به قطر روزنه‌ی $500 \mu\text{m}$ و صافی آلومینیم + مایلار به ضخامت $12 \mu\text{m}$ استفاده شد. این دستگاه از نوع میدر با مشخصات $C_0 = 39 \mu\text{F}$ ، $L_0 = 170 \text{nH}$ ، $I_{\text{max}} = 250 \text{kA}$ ، $V_0 = 20 \text{kV}$ و انرژی 45kJ ساخته شده است. تعداد میله‌های کاتد ۶ عدد و جنس آن کاتد از مس و جنس عایق از پیرکس است. آزمایش‌ها در فشارهای متفاوت ۰٫۵ تا $1/3 \text{ torr}$ و ولتاژهای مختلف ۱۶، ۱۷ و ۱۸ کیلوولت انجام شد. عکس‌های گرفته شده به وسیله دوربین روزنه سوزنی ابتدا از نگاتیو به پوزیتیو تبدیل و نهایتاً توسط نرم‌افزار اوربجین پرو به ماتریس تبدیل و برای شدت‌سنجی مورد تحلیل قرار گرفت. شکل ۴ این مرحله‌ها را نشان می‌دهد.

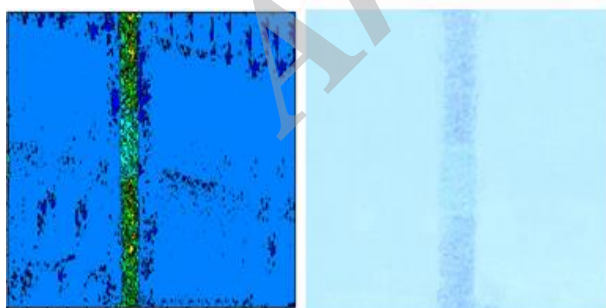
برای شدت‌سنجی فیلم‌های تهیه شده، از شیوه‌ی قیاس نقطه به نقطه استفاده شد. طبق این شیوه شدت یک نقطه از ستون پلاسمای تنگیده شده (ناحیه‌ی قرمز رنگ در شکل ۴ ب) نسبت به زمینه‌ی فیلم (وجه مشترک بین همه‌ی طیف‌ها) سنجیده و مقایسه می‌شود. از طرفی شکل ۵ نشان می‌دهد که یک فیلم رادیوگرافی اندوده شده با نقره برمید به ضخامت امولسیون $5 \mu\text{m}$ جذب ضعیف پرتو ایکس سخت است و این مقدار برای بازه‌ی انرژی پرتو ایکس نرم پلاسمای گاز آرگون (تقریباً $3000 - 4000 \text{ eV}$) به مقدار تقریبی بالای ۹۰ درصد می‌رسد.



شکل ۶. مقایسه‌ی نتایج شدت‌سنجی تصویرهای دوربین روزنه سوزنی و آشکارساز دیودنوری برای صافی به ضخامت $12 \mu\text{m}$ در ولتاژ 18 kV و فشارهای مختلف.



شکل ۷. چیدمان آزمایش و نحوه‌ی قرارگیری طیف‌سنج و دستگاه پلاسمای کانونی شریف.



شکل ۸. مرحله‌های طیف‌سنجی خطوط طیفی. (الف) گذار اتمی ثبت شده بر روی فیلم رادیوگرافی، (ب) تحلیل گذار اتمی و شدت‌سنجی آن به وسیله‌ی نرم‌افزار اورجین پرو.

نتیجه‌های آزمایش‌ها و تحلیل‌های شدت جذب پرتو ایکس به وسیله‌ی عکس‌های دوربین نشان داد که دستگاه پلاسمای کانونی در ولتاژ 18 kV و فشار 1.1 torr در شرایط بهینه‌ی گسیل پرتو ایکس نرم قرار دارد. درستی نتیجه‌های دوربین روزنه سوزنی به وسیله‌ی یک آشکارساز دیود نوری (BPX-65) با صافی آلومینیم و میلار به ضخامت $12 \mu\text{m}$ بررسی شد. همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، روند تغییرات برای هر دو آشکارساز مشابه هم است. این نتیجه نشان داد که شدت‌سنجی به شیوه‌ی مقایسه‌ی نقطه به نقطه و تحلیل به کمک نرم‌افزار اورجین پرو نتیجه‌های منطقی و قابل قبولی را ارائه می‌دهد. با استناد بر این نتیجه‌ها، در شدت‌سنجی خطوط طیفی مربوط به گذارهای اتمی ثبت شده، از این شیوه استفاده شد.

با انتخاب چیدمان مناسب بین طیف‌سنج و دستگاه پلاسمای کانونی و همچنین تخلیه‌ی دستگاه در شرایط بهینه‌ی گسیل پرتو ایکس نرم، آزمایش‌های مربوط به ثبت طول موج‌های طیف نشری گاز آرگون تنگیده شده انجام گرفت. این چیدمان در شکل ۷ نشان داده شده است.

۳. نتیجه‌های آزمایشگاهی

یکی از موضوع‌های مهم در حین انجام آزمایش‌ها، انتخاب چیدمان مناسب طیف‌سنج پرتو ایکس و دستگاه پلاسمای کانونی است. برای این کار، با چرخاندن طیف‌سنج بهترین چیدمان انتخاب شد. در تمام چیدمان‌ها، تعداد تخلیه‌های انجام شده بر روی دستگاه پلاسمای کانونی یکسان بوده و این تعداد تخلیه به صورتی انجام می‌شد که در صورت امکان، طیف ناشی از گذارهای با شدت پایین نیز قابل مشاهده باشد. مدت زمان قرارگیری فیلم‌های رادیوگرافی در محلول ظهور و ثبوت 70 ثانیه بود و بعد از پوییده شدن، به وسیله نرم‌افزار اورجین پرو مورد تحلیل قرار می‌گرفتند. مرحله‌های تحلیل خطوط طیفی ثبت شده، مشابه فرایند تحلیل فیلم‌های دوربین روزنه سوزنی بود. این مرحله‌ها در شکل ۸ نمونه شده‌اند. تحلیل شدت شش خط طیفی ثبت شده به وسیله نرم‌افزار اورجین پرو در شکل ۹ نشان داده شده است.

جدول ۲ نتیجه‌های کلی طیف‌سنجی پرتو ایکس نرم پلاسمای یونیده شده‌ی گاز آرگون را برحسب طول موج، انرژی، زاویه‌ی پراش و گذار اتمی نشان می‌دهد.

شدت‌سنجی خطوط طیف ثبت شده به صورت مقایسه‌ی نقطه به نقطه بوده است. در شکل ۱۰ تفاوت شدت به صورت نسبی برای طول موج‌های مختلف ثبت شده، نشان داده شده است.

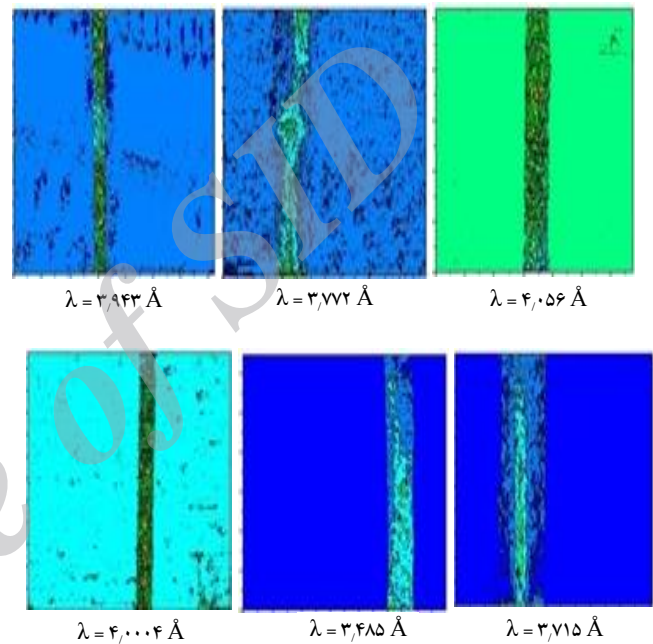


جدول ۲. نتیجه‌های کلی طیف‌سنجی برحسب پارامترهای مختلف

طول موج (آنگستروم)	انرژی فوتون (الکترون ولت)	گذار اتمی	یون‌ها	شدت نسبی	خطای نسبی	زاویه‌ی پراش (درجه)
۳۹۴۳۰	۳۱۴۴٫۸۱	$1s^2-1s^1P$	Ar XVIII	۱٫۵۸۷	۰٫۰۰۱۲	۲۳٫۶۷
۳۷۷۲۰	۳۲۸۷٫۳۸	$1s-2P$	Ar XVIII	۱٫۴۱۲	۰٫۰۰۹۳	۲۲٫۵۸
۴۰۵۶۰	۳۰۵۷٫۱۹	$1s^2 2P-1s^1 P^2$	Ar XVI	۱٫۱۴۳	۰٫۰۱۰۰	۲۴٫۳۹
۴۰۰۰۴	۳۰۹۹٫۶۹	$1s^2-1s^1 P$	Ar XVII	۱٫۴۸۸	۰٫۰۰۷۸	۲۴٫۰۳
۳۴۸۵۰	۳۵۵۸٫۱۰	$1s^1 2p-1s^2 p^2 P$	Ar XVI	۱٫۲۱۴	۰٫۰۱۶۰	۲۰٫۷۸
۳۷۱۵۰	۳۳۳۷٫۸۱	$1s-2P$	Ar XVIII	۱٫۲۶۴	۰٫۰۰۴۲	۲۲٫۲۲

۴. نتیجه‌گیری

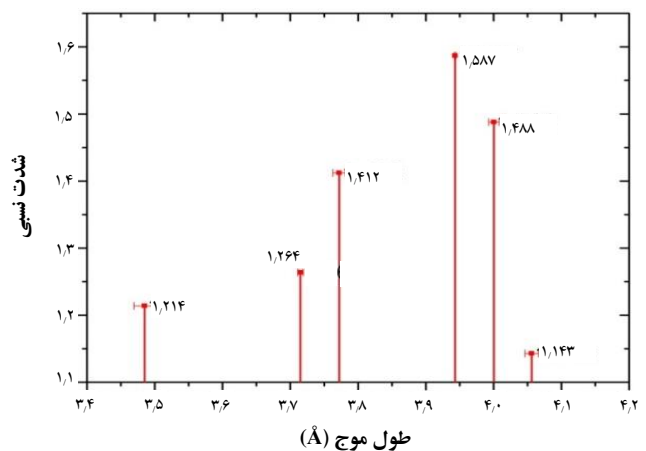
طیف‌سنجی نشان داد که طیف نشری پرتو ایکس نرم پلاسمای آرگون عمده‌تاً در محدوده‌ی طول موج ۳ تا $4A^0$ است که این با نتیجه‌های پیش از این گزارش شده [۲۰] هم‌خوانی دارد. گذار اتمی مربوط به نشر طول موج $3943A^0$ بیش‌ترین شدت را در بین سایر خطوط طیفی دارد. نابرابری در پهنا و طول خطوط طیف و همچنین نداشتن کیفیت واحد شدت در تمام نقاط خطوط طیف از دلایل اصلی استفاده از روش شدت‌سنجی به شیوه‌ی قیاس نقطه به نقطه بوده است. نتیجه‌های استفاده از این شیوه نشان داد که یک روش قابل قبول برای طیف‌هایی است که معیار شدت‌سنجی آن‌ها به صورت نسبی است و این شیوه برای گازی هم‌چون آرگون که پلاسمای یونیده شده‌ی آن دارای طیف نشری طول موج‌های بسیار نزدیک به هم است (زاویه‌ی پراش تقریباً ۲۰ تا ۲۵ درجه) به خوبی جواب‌گو بوده است.



شکل ۹. تحلیل شدت خطوط طیفی به وسیله‌ی نرم‌افزار اورجین پرو برای شش گذار اتمی ثبت شده.

پی‌نوشت‌ها

1. Plasma focus device
2. High aspect ratio pinches
3. Free-free transition
4. Free-bound transition
5. Bound-bound transition
6. Johann's method
7. Originpro
8. Pinhole camera
9. Muscovite
10. Expert



شکل ۱۰. رابطه‌ی بین شدت نسبی و طول موج شش گذار اتمی مختلف ثبت شده.



- [1] Y. Kato, I. Ochiai, Y. Watanabe, S. Murayama, Plasma focus X-ray source for lithography, *J. Vac. Sc. Technol. B* 6, (1988) 195-198.
- [2] W. Neff, J. Eberle, R. Holz, R. Lebert, F. Richter, *SPIE*, 1140 (1989) 1310.
- [3] N.A. Nyson, X-rays in Atomic and Nuclear Physics, University of Birmingham, 2nd Edition, (1990).
- [4] Alin Constantin Patran, PHD. Thesis, Nanyang Technological University, (2002).
- [5] N.V. Filippov, T.I. Filippov, V.P. Vinogradov, dense high temperature plasma in a noncylindrical Z-pinch compression, *Nuclear Fusion Suppl.*, 2 (1962) 577.
- [6] J.W. Mather, Investigation of the high energy acceleration mode in the coaxial gun, *phys. Fluid Suppl.*, 7 (1964) 5.
- [7] S. Hussain, S. Ahmad, M.Z. Khan, M. Zakauallah, A. Waheed, Plasma focus as a high intensity flash X-ray source for biological radiography, *J. Fusion Energ.*, 22 (2004) 3.
- [8] F.N. Beg, Sv. Lebedev, Sn. Bland, Jp. Chittenden, Ae. Dangor, Effect of discrete wires on the implosion dynamics of wire array Z pinches, *J. Appl. Phys.*, 88 (2000) 6.
- [9] T. Zhang, R.S. Rawat, S.M. Hassan, J.J. Lin, S. Mahmood, T.L. Tan, S.V. Springham, P. Lee, S. Lee, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 34 (2006) 5.
- [10] K. Behler, H. Bruhns, Three fluid magnetohydrodynamical simulation of plasma focus discharges, *Phys. Fluid*, 30 (1987) 12.
- [11] M. Scholz, B. Bienkowska, V.A. Gribkov, Plasma focus as a source of intense radiation and plasma streams for technological applications, *Acta Physica Slovaca*, 54(1), (2004) 35-42.
- [12] Gunter Zschornack, Handbook of X-Ray Data, ISBN 978-3-540-28618-9, Springer-Verlag Inc., (2007).
- [13] A. Authier, X-ray and neutron dynamical diffraction, theory and applications, Plenum Press, (1996).
- [14] R.S. Rawat, T. Zhang, G.J. Lim, W.H. Tan, S.J. Ng, A. Patran, S.M. Hassan, S. Lee, Soft x-ray imaging using a neon filled plasma focus x-ray source, *J. Fusion Energ.*, 23 (2004) 1.
- [15] P. Beiersdorfer, S. Von Goeler, M. Bitter, K.W. Hill, R.A. Hulse, Bent Crystal Spectrometer for the Ultra soft X-Ray Region, University of California, CA 94550, USA.
- [16] Yuri Anatoly Podpaly, Upgrade of the Neon Soft X-Ray Spectrometer for Alactor C-Mod, BSC Thesis, Department of Nuclear Engineering, MIT University, (2007).
- [17] S.P. Abbasi, X-Ray Spectroscopy of Dena Plasma Focus with bent Crystal Spectrometer, MSC Thesis, Physics Department, K.N.T University, Tehran, (2005).
- [18] Leonid Azaroff, X-Ray Diffraction, New York, McGraw-Hill, (1974).
- [19] [http://henke.lbl.gov/optical constants/](http://henke.lbl.gov/optical_constants/).
- [20] Shan Bing, Comparative Study of Dynamics and X-Ray Emission of Several Plasma Focus Devices, PHD. Thesis. Nanyang Technological University, (2010) 191-192.