

خطوط باریکه چشمه نور ایران

اعظم غلام پورآزیر، سمیه امیری، حسین خسروآبادی، جواد رحیقی و محمد لامعی رشتی

تهران، بزرگراه ارتش، پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، طرح چشمه نور ایران

پست الکترونیکی: azam.gholampowr@ipm.ir

چکیده

در این مقاله خطوط باریکه روز اول راه اندازی چشمه نور ایران و مشخصات آن‌ها معرفی می‌شوند. از میان این خطوط باریکه، طراحی مفهومی دو خط باریکه طیف سنجی میکروسکوپیکی، و پراش پودری، به عنوان پرکاربردترین خطوط باریکه، انجام شده است. در این مقاله به بررسی مشخصه‌های پرتو چشمه نور، طراحی اپتیکی، مشخصات قطعات و ردیابی پرتو فوتون در این خطوط باریکه پرداخته شده است. خط باریکه پراش پودری محدوده انرژی کارکردی ۳۰-۶ keV، شار فوتونی در مکان نمونه $(\text{ph/s/}\% \text{B.W.})$ 3×10^{15} ، سطح مقطع پرتو فوتونی در مکان نمونه $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ و قدرت تفکیک انرژی $\Delta E/E = 10^{-4}$ را دارد. محدوده انرژی خط باریکه طیف سنجی میکروسکوپیکی ۲۵۰۰-۹۰ eV است که از یک مغناطیس نوسان‌ساز خطی گسیل می‌شود. بیشینه شار فوتون گسیل شده در انرژی هارمونیک اصلی ۹۶ eV، برابر با $(\text{ph/s/}\% \text{B.W.})$ 3×10^{15} است. همچنین، در انرژی ۱۰۰۰ eV پرتو فوتونی با بیشینه توان تفکیک‌پذیری ۱۸۲۰ و سطح مقطع در محدوده $H \times V = 2 \times 2 - 27 \times 74 \mu\text{m}$ در مکان نمونه ایجاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: خط باریکه، پراش پودری، طیف سنجی میکروسکوپیکی، اپتیک پرتو x

۱. مقدمه

ساخت قسمت شتابگر الکترون‌ها برای تولید تابش سنکروترونی و طراحی و ساخت مسیر هدایت پرتو تابشی و قطعات اپتیکی (خطوط باریکه) و اتافک‌های پردازش اطلاعات تقسیم کرد. در جدول ۱، مشخصات هفت خط باریکه پیشنهادی کاربران ایرانی برای روز اول راه اندازی سنکروترون، جمع‌آوری شده‌اند.

خصوصیات منحصر به فرد تابش سنکروترون مانند شار فوتون بسیار زیاد، واگرایی بسیار کم، طیف تابشی پیوسته و با گستردگی زیاد، قطبش خطی و دایره‌ای امکان انجام

طرح چشمه نور ایران^۱ (ILSF) با هدف طراحی و ساخت یک شتاب‌دهنده سنکروترونی نسل سومی با انرژی ۳ GeV از سال ۱۳۸۹ آغاز شده و در حال انجام است [۱]. بهره‌برداری از این طرح می‌تواند به عنوان یکی از مهم‌ترین حوادث علمی منطقه محسوب شده و تحول قابل ملاحظه‌ای را در روند علمی، فناوری و صنعتی کشور و همکاری با کشورهای دیگر منطقه ایجاد کند. این پروژه را می‌توان به دو بخش اصلی طراحی و

۱. Iranian Light Source Facility

جدول ۱. خطوط باریکه روز اول راه‌اندازی چشمه نور ایران.

خط باریکه	چشمه تابش	گستره انرژی (eV)	شار فوتون (ph/s)	تفکیک‌پذیری (قدرت تفکیک)	اندازه باریکه (μm)
۱	پراش پودری	۶-۳۰k	۱۰ ^{۱۲}	۱۰ ^{-۴}	۱۰۰×۱۰۰
۲	پراش پرتو x از تک‌بلور	۷-۲۵ k	۱۰ ^{۱۳}	۱۰ ^{-۴}	
۳	EXAFS	۳-۴۰ k	۱۰ ^{۱۳}	۱۰ ^{-۴}	چند میکرون
۴	نورگسیل در فاز گازی (XPS, AES, ARPES)	۱۵-۱۰۰۰	۱۰ ^{۱۱}	۱۰۰۰۰	
۵	طیف‌سنجی الکترون‌ها در حالت جامد	۱۰-۱۵۰۰	۱۰ ^{۱۲}	۱۰۰۰۰	
۶	طیف‌سنجی میکروسکوپیکی	۱۰-۲۰۰۰	۱۰ ^{۱۳}	بیش از ۸۰۰۰	چند میکرون
۷	بلورنگاری مولکول‌های درشت	۳-۲۵ k	۱۰ ^{۱۲}		

آزمایش‌های بسیار دقیق و جدید که با ابزار معمولی قابل انجام نبودند را برای کاربران ایرانی و بین‌المللی فراهم خواهد کرد [۱-۳]. فوتون‌های تابش شده در مغناطیس خم‌کننده^۱ یا آدوات الحاقی^۲ وارد بخش ورودی^۳ و اتافک‌های اپتیکی شده و نهایتاً در اتافک آزمایش مورد استفاده کاربر قرار می‌گیرند. هدف طراحی خط باریکه، بهینه‌سازی پرتو تولید شده برای تأمین نظر کاربران برای انجام آزمایش‌هاست. خطوط باریکه پراش پودری و طیف‌سنجی میکروسکوپیکی، به علت کاربری بسیار زیاد در علوم مختلف، از اولویت‌های فاز اول این طرح هستند. این خطوط باریکه در تمام سنکروترون‌های فعال دنیا وجود داشته و دارای کاربران فراوانی هستند. بر اساس پیشنهاد کاربران ایرانی، چشمه نور خط باریکه پراش پودری مغناطیس خم‌کننده، بازه انرژی ۶-۳۰ keV، شار فوتونی در مکان نمونه 10^{12} ph/s/۰.۱٪ B.W.، تفکیک‌پذیری انرژی 10^{-4} و اندازه سطح مقطع پرتو در مکان نمونه $10 \times 10 \times 1 \text{ mm}^2$ می‌باشد. همچنین خط باریکه طیف‌سنجی میکروسکوپیکی با چشمه نوسان‌ساز و شار فوتونی بالا، $10^{15} \times 304 \text{ (ph/s/0.1\% BW @ 400 mA)}$ در

محدوده انرژی پرتو x نرم (۹۰-۲۵۰ eV) به تصویربرداری به روش میکروسکوپی فوتوالکترونی^۴ اختصاص یافته است و گروه زیادی از محققان در زمینه‌های مواد نانو، سیستم‌های الکترونی همبسته قوی و غیره را در بر می‌گیرد. در این خط باریکه در انرژی ۱۰۰۰ eV، پرتو فوتونی با بیشینه توان تفکیک‌پذیری ۱۸۲۰ و سطح مقطع در محدوده $27 \times 74 \mu\text{m} \times 2-4 \text{ H} \times \text{V}$ در مکان نمونه ایجاد می‌شود. در این مقاله محاسبات مربوط به چشمه نور و چینش اپتیکی و خصوصیات پرتو در مکان نمونه ارائه می‌شود.

۲. خط باریکه پراش پودری

۱.۲. چشمه نور

چشمه نور خط باریکه پراش پودری، مغناطیس خم‌کننده ILSF در نظر گرفته شده است. محاسبات مربوط به چشمه با استفاده از فرمول‌های تحلیلی [۳] و کد محاسباتی SPECTRA [۴] و مشخصات باریکه الکترونی حلقه انبارش [۵]، انجام شده است. در جدول ۲ خصوصیات مهم باریکه نوری که به عنوان چشمه در نظر گرفته شده، ارائه شده است. از جمله خصوصیات مهم

۱. Bending magnet

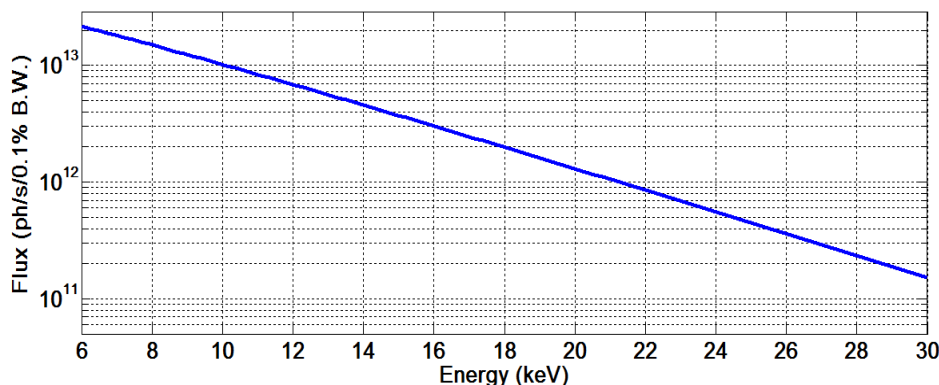
۲. Insertion device

۳. Front end

۴. Photoemission Electron Microscopy (PEEM)

جدول ۲. اندازه و واگرایی باریکه الکترونی و فوتونی در مکان چشمه نور ($B=0.72$ T).

$60 \times 34 \mu\text{m}^2$	$\sigma_{x,y}$	اندازه باریکه الکترونی
$103 \times 1.6 \text{ rad}^2$	$\sigma'_{x,y}$	واگرایی باریکه الکترونی
$60 \times 34 \mu\text{m}^2$	$\Sigma_{x,y}$	اندازه باریکه فوتونی
$1500 \times 196 \mu\text{rad}^2$	$\Sigma_{x,y}$	واگرایی باریکه فوتونی



شکل ۱. شار مغناطیس خم‌کننده ILSF بر حسب انرژی در جریان ۴۰۰ mA و میدان ۰٫۷۲ T، اندازه شکاف افقی ۱٫۵ mrad (با استفاده از SPECTRA).

موجود در سنکروترون ۴۰ m در نظر گرفته شده است.

آینه اول یک آینه استوانه‌ای - کروی است که برای موازی کردن نور در راستای عمودی استفاده می‌شود. این آینه در راستای حرکت باریکه^۱ خمیده شده و شعاع آن قابل تغییر می‌باشد. کانونی کردن نور در بی‌نهایت باعث کاهش واگرایی عمودی از $196 \mu\text{rad}$ به کمتر از پهنای داروین بلور می‌شود و به تکفام‌کنندگی مناسب که در این خط باریکه مدنظر است کمک می‌کند. برای بیشینه کردن مقدار بازتاب در بازه ۶-۲۰ keV این آینه با فلز رودیوم پوشش داده می‌شود. محاسبات بازتاب نشان می‌دهد که زاویه تابش مناسب برای بازتاب بیش از ۹۰٪، 3 mrad است. با روبش مکانی آینه اول از ۸-۲۲ m نسبت به مکان مغناطیس خم‌کننده و انجام محاسبات ردگیری پرتو با نرم‌افزار shadow [۷]، و در نظر گرفتن تغییرات سطح مقطع پرتو فوتونی روی آینه اول از ۶۱-۱۶۷ cm و اندازه بخش ورودی خطوط باریکه سنکروترون ایران و اندازه استاندارد آینه (۱۲۰ cm)، مکان مناسب آینه نسبت به چشمه ۱۵ m تعیین

چشمه نور مقدار شار تولیدی آن است. در شکل ۱ شار فوتونی مغناطیس خم‌کننده بر حسب انرژی در بازه ۶-۳۰ keV رسم شده است.

با فرض اتلاف ۴۰ درصد شار فوتونی در سیستم اپتیکی [۶] و با توجه به شکل ۱ و اینکه نیاز کاربران ایرانی به شار $10^{11} \text{ ph/s/0.1\% B.W.}$ در مکان نمونه است، چشمه نور مغناطیس خم‌کننده با مشخصات ارائه شده تا انرژی ۲۰ keV را پوشش می‌دهد. در انرژی‌های بالاتر، مقدار شار کاهش می‌یابد و در مکان چشمه تقریباً به $10^{11} \text{ ph/s/0.1\% B.W.}$ می‌رسد. بنابراین، طراحی برای بازه انرژی ۶-۲۰ keV انجام و بهینه می‌شود.

۲.۲ طراحی اپتیکی

شکل ۲ نحوه چینش قطعات اپتیکی خط باریکه پراش پودری، شامل یک آینه موازی‌کننده، یک تکفام‌کننده دو بلوری Si(۱۱۱) و یک آینه کانونی‌کننده را نشان می‌دهد. باریکه فوتونی توسط بلور دوم و آینه کانونی‌کننده به ترتیب در راستای افقی و عمودی کانونی می‌شود. طول کلی خط باریکه با توجه به فضای

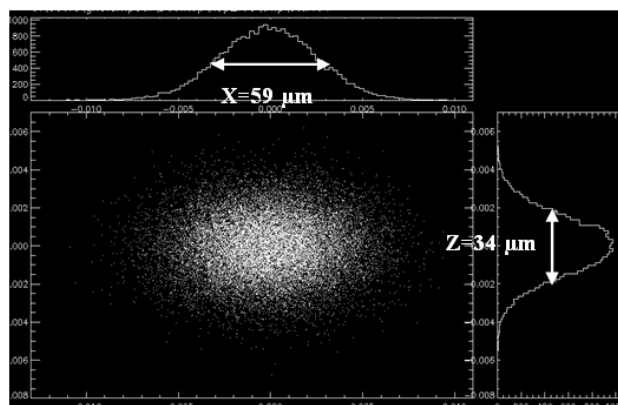
۱. Meridional

$$\frac{\Delta E}{E} = \sqrt{\Delta\theta_{inc}^2 + \Sigma_z'^2} \cot \theta. \quad (2)$$

به طور مثال برای انرژی ۸ keV با $\Delta\theta_{inc}$ برابر $37 \mu\text{rad}$ ، Σ_z' برابر $3 \mu\text{rad}$ و θ برابر 14.31 درجه، مقدار تفکیک‌دهی $10^{-4} \times 1/4$ می‌شود. برای مکان فرارگیری بلورها دو حالت وجود دارد: حالت شار بالا و حالت ابیراهی کم. برای خط باریکه پراش پودری حالت ابیراهی کم در نظر گرفته شده است تا پرتویی با سطح مقطع مناسب در محل نمونه داشته باشیم. در این حالت بلور در مرکز خط باریکه قرار می‌گیرد. محاسبه تفکیک پذیری انرژی در بازه $20-6$ keV نشان می‌دهد که مقدار $\Delta E/E$ در کل بازه انرژی تغییرات چندانی ندارد. آخرین قطعه اپتیکی، یک آینه استونه‌ای-کروی است که پرتو تکفام شده را در راستای عمودی کانونی می‌کند. جنس و زاویه تابش این آینه مانند آینه اول است. شعاع خمش آن قابل تغییر است به طوری که می‌توان اندازه باریکه در مکان نمونه را تغییر داد. برای دستیابی به تقارن ۱:۱ در خط باریکه و کمترین ابیراهی و با توجه به اینکه بلورها در فاصله 5 m از آینه اول قرار دارند، مکان آینه آخر در فاصله 5 m از بلورها و 15 m از مکان نمونه تعیین می‌شود (شعاع 10 km). در شکل ۲، سطح مقطع باریکه در مکان نمونه نشان داده شده است. می‌توان اندازه سطح مقطع را در مکان نمونه با تغییر شعاع آینه آخر و بلور دوم تغییر داد تا کاربر به سطح مقطع دلخواه خود دست یابد.

۳.۲. شار در مکان نمونه

پنجره بریلیومی و قطعات اپتیکی بر روی شار تولیدی چشمه تاثیر می‌گذارند. نتایج محاسبات شار فوتونی در شکل ۳ نشان می‌دهد که شکاف در انرژی $6-15$ keV، بین 65 تا 95 درصد شار را عبور می‌دهد. آینه‌ها بیش از 90 درصد پرتو را بازتاب می‌کنند و DCM نیز $13/5$ ٪ شار مربوط به هر انرژی را بازتاب می‌کند [۱۰]. بعد از محاسبات دیده می‌شود در بازه $6-10$ keV مقدار شار 10^11 ph/s/0.1٪ B.W. است. اما در انرژی‌های بالاتر شار کاهش یافته و به مقدار 10^{11} در انرژی 20 keV می‌رسد.



شکل ۲. اندازه و توزیع باریکه فوتونی در مکان نمونه با استفاده از Shadow (تعداد پرتوها 25000).

می‌شود (شعاع 10 km). با انجام محاسبات می‌توان نشان داد که زاویه پذیرش $(AA)^1$ خط باریکه از رابطه (۱) [۸] به دست می‌آید.

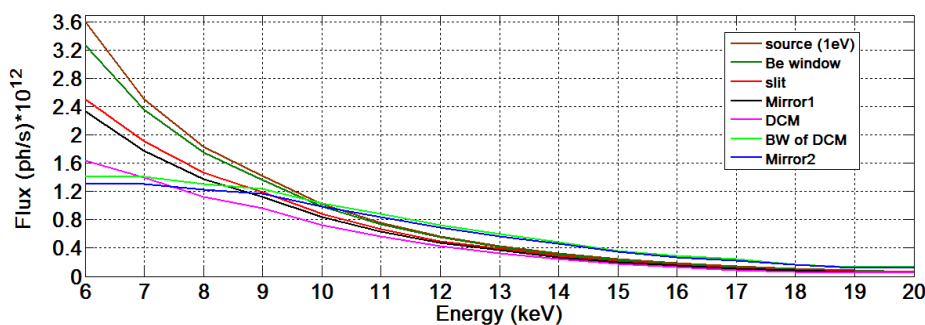
$$\sin \phi = \frac{L/2 \sin \theta}{\sqrt{d^2 + (d + L/2)^2 \tan^2 \theta}} \approx \frac{L}{2d} \theta, \quad AA = 2\phi, \quad (1)$$

L اندازه قسمت روشن آینه، d فاصله لبه روشن آینه تا چشمه نور و θ زاویه برخورد به آینه است. با $L=100$ cm و $\theta=3$ mrad و $d=1450$ cm اندازه افقی و عمودی شکافی که در 14 m از چشمه قرار دارد به ترتیب $2/10$ cm و $0/29$ cm محاسبه می‌شوند. قطعه اپتیکی بعدی تکفام کننده دو بلوری $(DCM)^2$ است. در این خط باریکه برای رسیدن به تفکیک دهی مناسب برای آزمایش‌های پراش پودری بلور $Si(111)$ متقارن، برای تکفام‌کننده انتخاب شده است [۶]. ساختار این تکفام‌کننده از دو بلور موازی تشکیل شده است. بلور اول مسطح بوده اما بلور دوم در جهت عمود بر حرکت باریکه^۳، خمیده شده و نور را از نظر افقی در مکان نمونه کانونی می‌کند. موازی شدن نور از نظر عمودی توسط آینه اول تفکیک‌دهی بلور را بسیار بهتر کرده و مقدار آن نزدیک تفکیک‌دهی ذاتی می‌شود. تفکیک‌دهی بلور از رابطه (۲) [۹] به دست می‌آید. که در آن ΔE پهنای انرژی عبوری حول انرژی E و θ_{inc} ، θ و Σ_z' به ترتیب زاویه براگ، پهنای داروین ذاتی بلور و اگرایی عمودی باریکه فرودی می‌باشد.

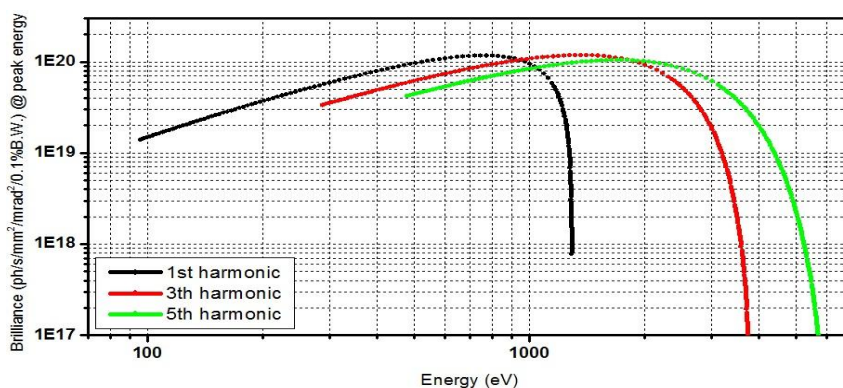
۱. Acceptance Angle

۲. Double Crystal Monochromator

۳. Saggital



شکل ۳. مقدار شار ورودی به خط باریکه از چشمه و بعد از پنجره بریلیومی ($200 \mu\text{m}$)، بعد از شکاف ($2.1 \times 0.29 \text{ cm}^2$) آینه اول، تکفام کننده و آینه دوم (محاسبات با نرم‌افزار SPECTRA و Shadow انجام شده است).



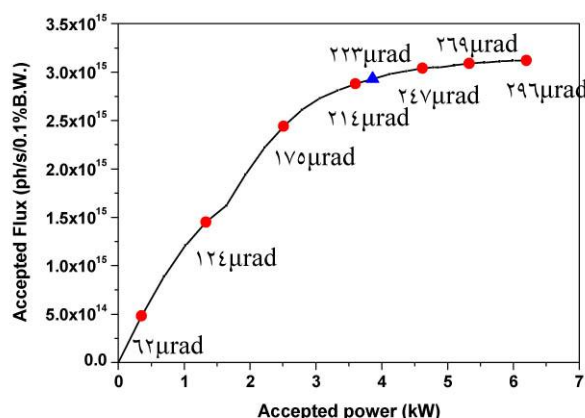
شکل ۴. طیف درخشندگی چشمه نوری نوسان‌ساز، پارامتر قدرت نوسان‌ساز $5 < K < 10$ تغییر می‌کند.

۳. خط باریکه طیف سنجی میکروسکوپیکی

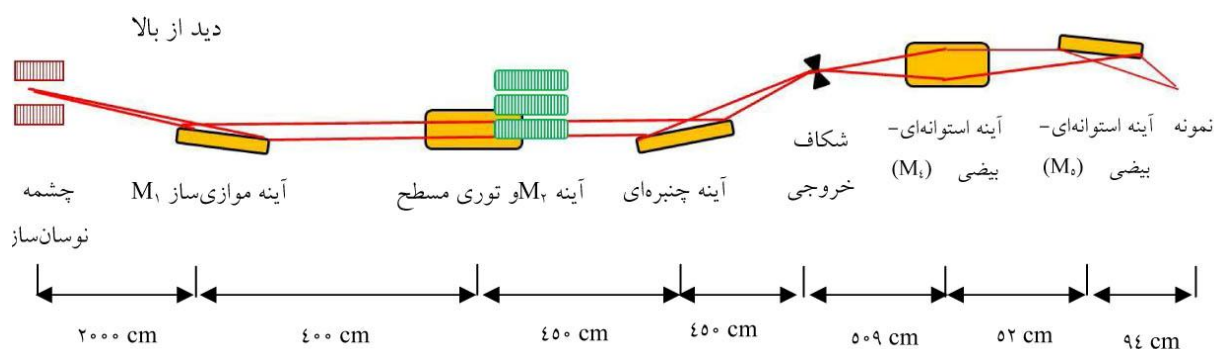
بررسی ویژگی‌های شیمیایی، الکترونیکی، و مغناطیسی نانو ساختارها و همچنین شکل و اندازه آنها مورد نظر علوم نانو می‌باشد. تکنیک‌های میکروسکوپیکی رایج با تفکیک‌پذیری بالا مانند AFM، TEM، و STM شامل اطلاعات طیف‌سنجی نمی‌باشند و از طرف دیگر تکنیک‌های طیف‌سنجی مانند FTIR و PES تفکیک‌پذیری فضایی ضعیفی را ایجاد می‌کنند. از این رو لازم است، تکنیک‌های میکروسکوپیکی بر اساس تکنیک‌های طیف‌سنجی همچون تصویربرداری به روش میکروسکوپی فوتوالکترونی و روبش میکروسکوپی برای دستیابی به تفکیک‌پذیری فضایی بالا و اطلاعات اسپکتروسکوپی مورد استفاده پژوهشگر قرار گیرد. یک شاخه از خط باریکه طیف سنجی میکروسکوپیکی با درخشندگی بالا در محدوده انرژی پرتو x نرم ($2500 - 90 \text{ eV}$) به تصویربرداری به روش میکروسکوپیکی فوتوالکترونی اختصاص داده شده است.

۴. چشمه نوری

چشمه خط باریکه نوسان‌ساز خطی با مغناطیس دائم، دوره تناوب 66 mm ، و تعداد تناوب 66 است. در بیشینه پارامتر قدرت نوسان‌ساز $K_{\text{Max}}=5$ شار فوتونی گسیل شده در انرژی هارمونیک اصلی 96 eV برابر با $10^{15} \times 3/04 \text{ (ph/s/0.1\%BW@400mA)}$ می‌باشد. در این خط باریکه به دلیل نیاز به سطح مقطع کوچک و شار فوتونی بالا در مکان نمونه، درخشندگی چشمه دارای اهمیت است. درخشندگی برابر با شدت فوتون‌ها بر روی فضای فاز عرضی در $0.1\% \text{ B.W.} = 0.1\% \Delta E/E$ است. درخشندگی چشمه در فاصله 10 m از چشمه در شرایطی که پارامتر قدرت نوسان‌ساز K در محدوده $5 < K < 10$ تغییر می‌کند، در شکل ۴ نشان داده شده است. در انرژی 773 eV بیشینه درخشندگی چشمه برابر با $10^{20} \times 1/2$ گسیل می‌شود. محاسبات انجام شده برای چشمه نوری با استفاده از فرمول‌های تحلیلی و کد محاسباتی اسپکترا



شکل ۵. مقدار شار و توان ورودی به خط باریکه در اندازه‌های مختلف روزنه. نقاط بر روی منحنی نمایانگر زاویه بازشدگی روزنه است.



شکل ۶. چیدمان قطعات اپتیکی خط باریکه طیف‌سنجی میکروسکوپیکی.

۵. چیدمان اپتیکی خط باریکه

در چیدمان قطعات اپتیکی خط باریکه شامل: ۱) ساختار تکفام‌کننده متشکل از آینه موازی‌ساز، آینه مسطح، سه عدد توری پراش مسطح و آینه چنبره‌ای که راستای عمودی و افقی پرتو فوتونی را بر روی شکاف خروجی تکفام‌کننده کانونی می‌کند [۱۲]، که در شکل ۶ نشان داده شده است. ۲) بخش کانونی‌کننده انتهایی خط باریکه، متشکل از دو آینه بیضی-استوانه‌ای خم‌شونده در هندسه آینه‌های KB (کانونی‌کننده پرتو x که شامل دو آینه بیضی-استوانه‌ای است، که به صورت عمود بر هم قرار دارند، و هر یک مستقل یک راستا از پرتو را کانونی می‌کند) ارائه شده است. طول خط باریکه از مکان چشمه تا محل نمونه ۴۰ m می‌باشد. تمام قطعات اپتیکی خط باریکه با طلا لایه‌نشانی شده‌اند. شبیه‌سازی قطعات اپتیکی و ردیابی پرتو فوتونی در خط باریکه با استفاده از نرم افزار Shadow می‌باشد.

(SPECTRA) انجام شده است.

توان کل گسیل شده توسط نوسان‌ساز تابعی از تعداد تناوب‌ها، K پارامتر قدرت، γ پارامتر نسبیتی، جریان حلقه انبارش (میلی آمپر) و دوره تناوب نوسان‌ساز می‌باشد [۱۱]. بیشینه توان گسیل شده از چشمه در $K_{Max}=5$ برابر با $6/43$ kW (جریان حلقه انبارش $I=400$ mA) است. در شکل ۵ مقدار شار و توان ورودی به بخش اپتیکی خط باریکه در اندازه‌های مختلف روزنه دایره‌ای که در فاصله ۱۰ m از چشمه نوری قرار گرفته است، نشان داده شده است. در بازشدگی زاویه‌ای روزنه برابر با $20=223 \mu rad$ در حالی که ۹۴٪ شار فوتونی در طول موج هارمونیک اصلی eV از روزنه عبور می‌کند، فقط ۰/۶ از کل توان (۳/۹ kW) از روزنه عبور و بقیه توان ۲/۵ kW توسط روزنه جذب می‌شود.

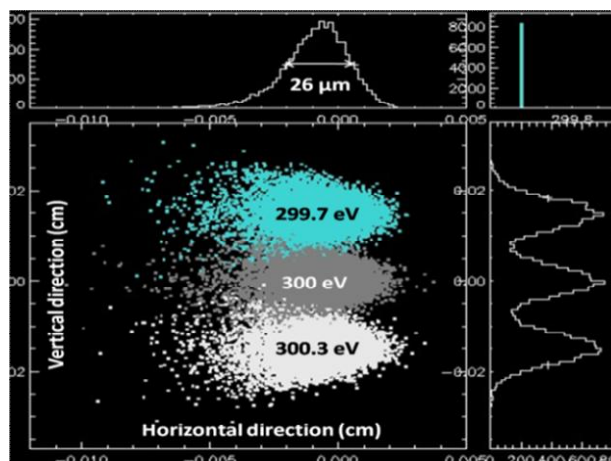
می‌شود. شعاع آینه در راستای مماس و عمود بر حرکت پرتو به ترتیب ۲۳km و $۰/۲۳\text{m}$ است. سطح مقطع پرتو فوتونی بر روی شکاف خروجی تکفام‌کننده، در شکل نشان داده شده است. در انرژی ۱۰۰۰eV توان تفکیک‌پذیری انرژی در مرتبه اول پراش برابر با $E/\Delta E=۱۸۲۰$ (اندازه شکاف $۲۰\mu\text{m}$ و $N=۹۰۰\text{mm}^{-۱}$) در شبیه‌سازی به دست آمده است.

۷. سیستم بازکانونی کننده

دو آینه بیضی-استوانه‌ای خم‌شونده (قابلیت تغییر شعاع دارند) در هندسه آینه‌های KB برای کانونی کردن پرتو فوتونی در مکان نمونه انتخاب شده‌اند. کوچک‌نمایی افقی و عمودی آینه‌ها به ترتیب ۶ و $۳/۵$ است. آینه $M_۵$ در فاصله $۵/۱\text{m}$ از شکاف خروجی تکفام‌کننده و آینه $M_۶$ ، $۰/۶\text{m}$ بعد از آینه $M_۵$ در فاصله $۰/۹۴\text{m}$ از مکان نمونه به ترتیب راستای عمودی و راستای افقی پرتو فوتونی را بر روی نمونه کانونی می‌کنند. در انرژی ۱۰۰۰eV سطح مقطع پرتو با تغییر در شعاع آینه‌ها در محدوده $۲۷ \times ۷۴ - ۴ \times ۲ = H \times V$ تغییر می‌کند.

۸. جمع بندی

بر اساس پیشنهاد کاربران ایرانی و رایزنی‌های انجام شده، خط باریکه به عنوان خطوط باریکه روز اول راه‌اندازی چشمه نور ایران انتخاب شده‌اند. از بین این خطوط، طراحی مفهومی خط باریکه پراش پودری و اسپکترومیکروسکوپی به علت کاربری زیاد در علوم مختلف صورت گرفته است. طراحی مفهومی این خطوط باریکه شامل محاسبات تابشی چشمه نوری، تعیین چیدمان و مشخصه‌های قطعه‌های اپتیکی، و ردیابی پرتو با استفاده از فرمول‌های تحلیلی و نرم‌افزارهای SPECTRA و Shadow انجام شده است. خط باریکه پراش پودری با چشمه نور مغناطیس خم‌کننده و چینش اپتیکی، یک آینه موازی کننده، تکفام‌کننده دو بلوری کانونی کننده $\text{Si}(۱۱۱)$ و آینه انتهایی عمودی-کانونی کننده ارائه شد. در مکان نمونه، باریکه‌ای با تفکیک‌پذیری انرژی $۱۰^{-۴}$ را خواهیم داشت. سطح مقطع پرتو در مکان نمونه می‌تواند از $۶۰ \times ۳۴\mu\text{m}^۲$ تا



شکل ۷. سطح مقطع پرتو فوتونی بر روی شکاف خروجی در شکل دیده می‌شود.

۶. تکفام‌کننده

تکفام‌کننده از نوع توری مسطح با مجموع زاویه تابش و پراش متغیر است، و شامل آینه موازی‌ساز استوانه‌ای-کروی است که در فاصله ۲۰m از چشمه به صورت عمودی قرار دارد و تحت تکفام‌کننده، در انرژی ۳۰۰eV تفکیک‌دهی $۰/۳\text{eV}$ زاویه $۸۸/۵^\circ$ مورد تابش قرار می‌گیرد. شعاع خمش آن در راستای عمود بر جهت حرکت پرتو ۱m است. آینه راستای عمودی پرتو فوتونی را موازی کرده و به سمت آینه مسطح هدایت می‌کند. در انرژی ۹۶eV آینه واگرایی $۳۸/۶\mu\text{rad}$ پرتو فوتونی را به $۱/۳۶\mu\text{rad}$ همگرایی تغییر می‌دهد و باعث افزایش توان تفکیک‌پذیری انرژی می‌شود. سپس آینه مسطح $M_۶$ پرتو فوتونی را به مرکز توری بازتاب می‌کند. برای دستیابی به توان تفکیک‌پذیری مورد نیاز از توری پراش مسطح در انرژی $۶۰۰-۹۹\text{eV}$ با چگالی شیار $N=۷۰۰\text{mm}^{-۱}$ ، در انرژی $۱۵۰۰-۵۰۰\text{eV}$ با چگالی شیار $N=۹۰۰\text{mm}^{-۱}$ ، و در انرژی $۲۵۰۰-۱۰۰۰\text{eV}$ با چگالی شیار $N=۱۲۰۰\text{mm}^{-۱}$ استفاده شده است.

تصویر مجازی توری مسطح با استفاده از آینه چنبره‌ای که در فاصله $۴/۵\text{m}$ بعد از توری با زاویه جهت‌گیری ۹۰° نسبت به توری قرار دارد، در هر دو راستای عمودی و افقی بر روی شکاف خروجی تکفام‌کننده که $۴/۵\text{m}$ بعد از آینه است، کانونی

متغیر و دو عدد آینه بیضی - استوانه‌ای بعد از تکفام‌کننده برای کانونی کردن پرتو فوتونی در مکان نمونه نیاز کاربران این خط باریکه را در محدوده انرژی $2500-90$ eV با بیشینه شار فوتونی گسیل شده از چشمه برابر با 3×10^{15} (ph/s/0.1%BW) فراهم می‌کند. در انرژی 1000 eV پرتو فوتونی با بیشینه توان تفکیک‌پذیری 1820 و سطح مقطع در محدوده $27 \times 74 \mu\text{m} - 4 \times 2$ در مکان نمونه ایجاد می‌شود.

1×1 mm^۲ با تغییر شعاع آینه و بلور تغییر کند. محاسبات شار در مکان نمونه نشان می‌دهند فقط بازه انرژی $6-10$ keV با چشمه مغناطیس خم‌کننده با شار 10^{11} ph/s/0.1% B.W. قابل پوشش است و برای داشتن شار فوتونی بالاتر باید از ابزار درون خطی استفاده کرد. چینش خط باریکه اسپکترومیکروسکوپی شامل چشمه نوسان‌ساز خطی، تکفام‌کننده از نوع توری مسطح با مجموع زاویه تابش و پراش

مراجع

1. ILSF CDR: <http://ilsf.ipm.ac.ir/Publications/ILSF-CDR.pdf>.
2. D M Paganin "Coherent X-ray Optics", Oxford University Press. (2006)136.
3. Helmut Wiedeman;"Synchrotron Radiation", Springer Press.(2002) 31.
4. T Tanaka and H Kitamura, J. Synchrotron Radiation **8** (2001) 1221.
5. H Ghasem, F Saeidiand, and E Ahmadi, JINT, **8** (2013) 1.
6. B D Patterson et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, **540**(2005)42.
7. <http://www.nanotech.wisc.edu/shadow/>.
8. H Khosroabadi, S Amiri, and A Gholampour, "X-ray powder Diffraction Beamline for Iranian Light Source Facility", internal report, June (2013).
9. H Khosroabadi, A Gholampour Azhir, S Amiri, and H Ghasem, "X-ray Powder Diffraction Beamline for Iranian Light Siurce Facility", Proceedings of IPAC, Shanghai, China (2013).
10. Manuel Sánchez del Ríoand Olivier Mathon; "A Simple Formula to Calculate the X-ray Flux After a Double-Crystal Monochromator"; Proc. SPIE, **5536** (2004) 157.
11. W B Peatman, "Gratings, Mirrors and Slits", Gordon and Breach Science Publishers (1997).
12. H A Padmore, Rev. Sci. Instrum., **60** (1989) 1608; doi: 10.1063/1.1141043.