

طراحی نمایشگر پروفایل برای باریکه پروتونی 200 keV شتابگر الکترواستاتیک پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای

علیرضا نجفیان^{۱*}، فریدون عباسی دوانی^۱، شاهین صنایع حجری^۲، فرشاد قاسمی^۲

۱. گروه کاربرد پرتو، دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲. پژوهشگاه فیزیک و شتابگرها، سازمان انرژی اتمی، تهران، ایران

چکیده

ابزارهای تشخیص باریکه از اجزای اصلی هر شتابگر می‌باشند. این سیستم‌های اندازه‌گیری امکان مشاهده‌ی پارامترهای مختلف باریکه به منظور ارزیابی نحوه‌ی کارکرد شتابگر را فراهم می‌کنند و به کمک آن می‌توان عملکرد و کیفیت یک شتابدهنده را از جهات گوناگون پایش کرد. پروفایل باریکه واسطه‌ای برای اندازه‌گیری کمیت‌های مختلف باریکه نظیر مکان، ابعاد عرضی و گسیلندگی باریکه است. بسته به نوع کاربرد و نیاز پژوهش، ابزارها و روش‌های مختلفی برای پایش پروفایل باریکه وجود دارد. یکی از این روش‌ها استفاده از صفحات نمایش سوسوزنی است که از قدیمی‌ترین و دقیق‌ترین روش‌های خوانش باریکه ذرات است. در این مقاله به بررسی نمایشگر پروفایل باریکه پرداخته شده و نقش عوامل موثر در پروفایل باریکه نظیر قدرت تفکیک نهایی تصویر، آسیب پرتویی سوسوزن، تاثیرات دمایی بر عملکرد سوسوزن و تجمع بار در آن شرح داده شده است. در نهایت با استفاده از کد مونت کارلوی Geant4 قدرت تفکیک نمایشگر سوسوزنی برآورد می‌شود.

کلیدواژه‌ها: پروفایل باریکه، نمایشگر سوسوزنی، شتاب دهنده، روش مونت کارلو، باریکه پروتون

Beam profile monitor design for the 200 keV electrostatic proton accelerator of Nuclear Science and Technology Research Institute

A.R. Najafiyan^{1*}, F. Abassi¹, Sh. Sanaye hajari², F. Ghasemi²

1. Application Radiation Group, Department of Nuclear Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

2. Physics and accelerator Research school, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Tehran, Iran.

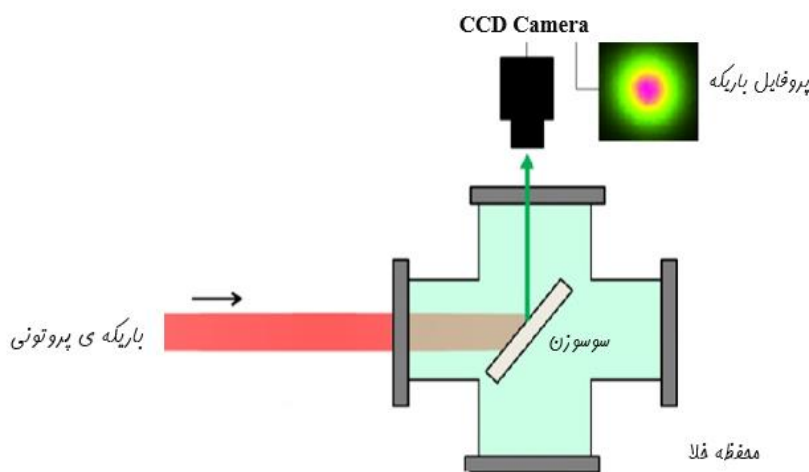
Abstract

Beam diagnostics instrumentations regarded as the main components of any accelerator. They provide a way to measure beam parameters in order to monitor the accelerator performance. Beam profile is a bridge to other beam parameters like as transverse position, size, divergence and emittance. There are several tools and methods for monitoring beam profiles. One of these methods is scintillation view screens, which is one of the oldest and most precise. In this paper, the concerning issues in the beam profile monitor design such as image resolution, radiation damage, temperature and charge accumulation on the scintillator have been discussed. At the end, using the Geant4 Monte Carlo code, we have estimated the resolution of the scintillator view screen.

Keywords: Beam Profile, Monte Carlo, Scintillator Screen, Proton, Accelerator

۱. مقدمه

امروزه شتاب دهنده های ذرات نقش مهمی را در گستره‌ی وسیعی از زمینه‌ها شامل تحقیقات فیزیک ذرات بنیادین، صنعت، پزشکی، محیط زیست و... ایفا می‌کنند. نقش ابزارهای تشخیصی از این جهت حائز اهمیت است که می‌توان به وسیله‌ی آن به اطلاعات مفیدی از عملکرد و کارایی شتاب دهنده پی برد. پروفایل باریکه نمودارهای هیستوگرام یک بعدی یا دو بعدی در فضای X-Y (صفحه عرضی) است. به بیان دیگر پروفایل باریکه چگالی عرضی ذرات در صفحه را نشان می‌دهد. روش‌ها و ابزارهای تشخیصی مختلفی برای خوانش پروفایل باریکه وجود دارد که معمولاً به دو گروه مخرب و غیر مخرب تقسیم می‌شوند. از گروه ابزارهای تشخیصی غیر مخرب می‌توان به نمایشگر یونش گاز باقیمانده، پوینده سیمی، تابش سینکروترون و نمایشگر الکترون ثانویه و همچنین از گروه ابزارهای تشخیصی مخرب می‌توان به صفحات سوسوزنی و OTR (تابش گذار نوری) اشاره کرد. هر کدام از این ابزارها معایب و مزایایی در ارائه پروفایل باریکه دارند. یک ابزار تشخیصی مناسب برای خوانش پروفایل دو بعدی باریکه با قدرت تفکیک بالا، صفحات نمایش سوسوزنی است که از مکانیزم پدیده‌ی سوسوزنی بهره می‌برند. در این روش نور تولیدی ناشی از برخورد باریکه با صفحه‌ی سوسوزنی توسط سیستم اپتیکی تعبیه شده در انتهای مسیر دریافت می‌شود و می‌تواند تصویری دو بعدی از پروفایل باریکه را ارائه دهد. اجزای این ابزار تشخیصی شامل صفحه‌ی سوسوزنی، پایه‌ی نگهدارنده سوسوزن، جمع کننده بار، محفظه‌ی خلا و همچنین ابزار اپتیکی نظیر آینه، مجموعه لنز و دوربین است. چیدمان این ابزار تشخیصی مطابق شکل ۱ به این صورت است که باریکه پروتونی به صفحه‌ی سوسوزنی برخورد کرده و نور تولیدی ناشی از آن به سمت سیستم اپتیکی هدایت می‌شود. در طراحی ابزار تشخیصی با چالش‌هایی نظیر قدرت تفکیک تصویر، اثر دما بر عملکرد سوسوزن، تجمع بار و آسیب پرتویی سوسوزن روبرو هستیم [۱]. همچنین در انتخاب نوع ماده‌ی سوسوزنی مناسب باید ملاحظات دمایی و بحث مربوط به آسیب پرتویی را در نظر گرفت [۲]. ماده‌ی ای می‌بایست انتخاب شود که بتواند علاوه بر این که بهره‌ی سوسوزنی خوبی دارد، مقاومت خوبی نیز در برابر شدت باریکه‌ی پروتونی نشان دهد. نکته حائز اهمیت دیگر در طراحی این ابزار تشخیصی بحث تجمع بار در سوسوزن است و باید بار جمعی در سوسوزن را به طریقی تخلیه نمود و از آسیب رسیدن به سوسوزن در اثر جرقه جلوگیری کرد. در این مقاله با استفاده از کد مونت کارلو Geant4 محدودیت قدرت تفکیک سوسوزن در اثر پدیده‌ی پراکندگی‌های چندگانه کلمبی را بررسی می‌کنیم.



شکل ۱. چیدمان سیستم تشخیصی پروفایل باریکه پروتونی با استفاده از صفحات سوسوزنی

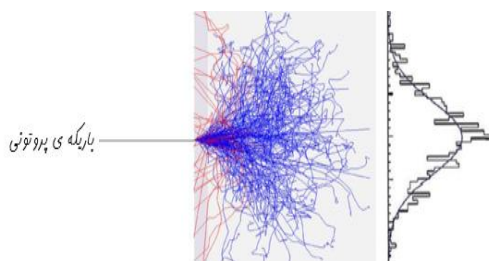
۲. روش کار

در طراحی و انتخاب ابزار تشخیصی مناسب به روش سوسوزنی می‌بایست هم عوامل موثر بر قدرت تفکیک تصویر را بررسی کرد و هم ماده‌ی ای را برای صفحه‌ی سوسوزنی انتخاب کرد که در برابر آسیب تابشی مقاوم باشد. از طرفی تأثیر دما بر بهره سوسوزنی و همچنین بحث تجمع بار سوسوزن نیز باید جداگانه مورد مطالعه قرار گیرد. در نهایت پس از

انتخاب و طراحی ابزار تشخیصی با استفاده از کد مونت کارلو Geant4 قدرت تفکیک صفحه نمایش سوسوزنی برآورد می‌شود.

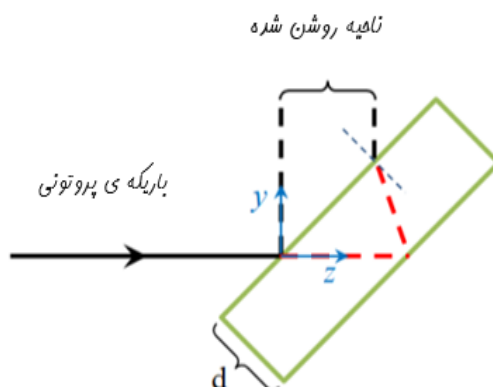
۱.۲. عوامل موثر بر قدرت تفکیک تصویر

انتظار داریم با برخورد باریکه‌ی پروتونی با ابعاد صفر به صفحه‌ی سوسوزنی تنها یک نقطه‌ی ریاضی از سوسوزن روشن شود ولی همانطور که در شکل ۲ مشخص است با ورود باریکه به ماده‌ی سوسوزنی، پرتو دچار پراکندگی‌های چندگانه می‌شود و پروتون مسیرهای متفاوتی را در ماده طی می‌کند و در نتیجه یک ناحیه‌ای از سوسوزن روشن می‌شود که این ابعاد معیاری از قدرت تفکیک سوسوزن است. باید توجه داشت که با کاهش ضخامت سوسوزن، شدت پراکندگی‌های چندگانه کاهش می‌یابد و منجر به قدرت تفکیک تصویر بهتری می‌شود [۲] اما از طرفی با کاهش ضخامت سوسوزنی بهره‌ی نور تولیدی در سوسوزن کاهش می‌یابد. در نتیجه باید به یک ضخامت بهینه دست یافت که هم بهره‌ی نور تولیدی کافی باشد و هم قدرت تفکیک تصویر حفظ شود.



شکل ۲. پراکندگی‌های چندگانه پروتون در سوسوزن

برای جلوگیری از تابش مستقیم باریکه و یا پرتوهای ثانویه به دوربین و آسیب دیدن آن لازم است صفحه‌ی سوسوزن نسبت به جهت باریکه ورودی زاویه داشته باشد. زاویه‌ی قرارگیری صفحه‌ی سوسوزنی نیز در قدرت تفکیک تصویر نهایی موثر است [۱]. در واقع اگر صفحه‌ی سوسوزنی مطابق شکل ۳ نسبت به جهت باریکه‌ی ورودی زاویه داشته باشند، به دلیل نفوذ باریکه به سوسوزن، انرژی باریکه در ابعاد بیشتری از سوسوزن بر جای گذاشته می‌شود و در نتیجه ناحیه‌ی بزرگتری از سوسوزن روشن می‌شود و قدرت تفکیک سوسوزن کاهش می‌یابد.

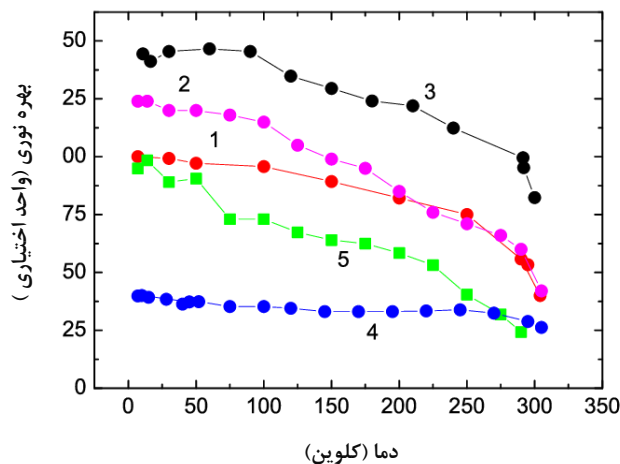


شکل ۳. تاثیر زاویه صفحه‌ی سوسوزن بر قدرت تفکیک تصویر

۲.۲. تاثیر دما بر بهره سوسوزنی

عامل موثر دیگری که باید در طراحی این ابزار تشخیصی باریکه به آن توجه داشت بحث دمای سوسوزن و وابستگی بهره‌ی سوسوزنی به آن است. با افزایش دما بهره سوسوزنی کاهش می‌یابد [۳]. در شکل ۴ بهره نوری چند نمونه سوسوزن

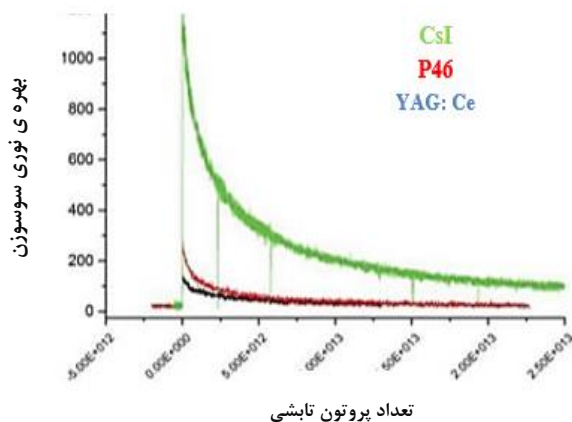
به عنوان تابعی از دما توسط گروهی از پژوهشگران NIM به سرپرستی آقای Tsuchida بررسی شده است [۳] که نشان می‌دهد با افزایش دما بهره سوسوزنی کاهش محسوسی می‌یابد. در این بین بهره سوسوزنی YAG:Ce با افزایش دما تغییر چندانی نکرده است و به نظر می‌رسد گزینه پایدارتری در برابر تغییر دما است.



شکل ۴. تاثیر دما بر بهره نوری سوسوزن های NaI (1), ZnWO (2), CdWO (3), YAG:Ce (4), CaMoO (5)

۳.۲. آسیب تابشی سوسوزن

شایع‌ترین پدیده‌ی آسیب تابشی، به وجود آمدن باندهای جذب ناشی از تشکیل مراکز رنگ است. نوارهای جذب باعث کاهش طول تضعیفی نور کریستال و در نتیجه باعث کاهش نور خروجی می‌شوند [۴]. تابش همچنین باعث فسفرسانس (پس درخشش) می‌شود که منجر به افزایش نویز می‌شود. همچنین ممکن است سبب کاهش بهره نوری ذاتی سوسوزن (آسیب مکانیزم سوسوزن) شود که به سبب آن نور خروجی کاهش یافته و موجب تغییر شکل یکنواختی پاسخ نور می‌شود. البته باید توجه داشت که معمولاً آسیب بعد از چند روز در دمای اتاق بهبود می‌یابد و یا با استفاده از باز پخت حرارتی می‌توان آن را برطرف کرد. شکل ۵ پاسخ نوری برخی از مقاوم‌ترین سوسوزن‌ها را در برابر آسیب تابشی نشان می‌دهد که در آن تغییرات بهره نوری را به عنوان تابعی از تعداد پروتون تابشی بررسی کرده است [۵]. انرژی باریکه برای همه موارد یکسان و در حدود ۳۵ کیلو الکترون ولت است. همانطور که طبق شکل ۵ مشخص است سوسوزن YAG:Ce انتخاب مناسبی برای مقاومت در برابر آسیب تابشی باریکه پروتونی است و افت بهره نوری آن چشمگیر نیست.



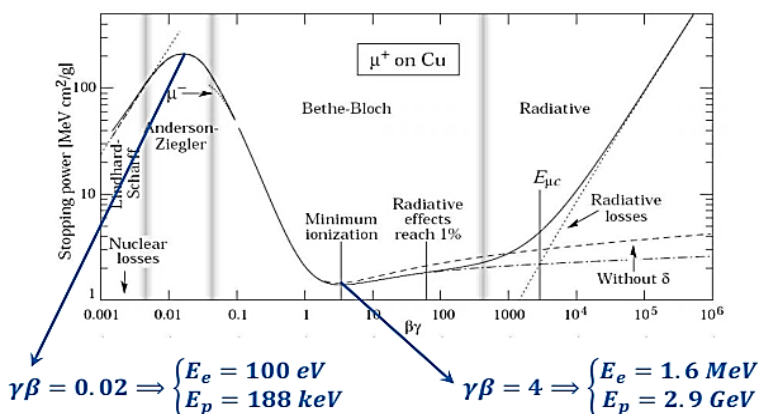
شکل ۵. تغییرات پاسخ نوری سوسوزن YAG و P46 و CsI در برابر آسیب تابشی ناشی از باریکه پروتونی 35 keV

۴.۲. تجمع بار سوسوزن

پوشش دهی بلور سوسوزن بر روی فلزاتی مانند آلومینیوم و زمین کردن آن کمک می‌کند تا هم تجمع بار در سوسوزن صورت نگیرد (بارها مدام تخلیه می‌شوند) و هم فلز به عنوان یک رسانا گرمایی دمایی سوسوزن را کنترل می‌کند و مانع از کاهش بهره نوری آن می‌شود [۶].

۵.۲. تاثیر انرژی باریکه در بهره سوسوزنی

بهره سوسوزن متناسب با انرژی بر جای گذاشته توسط باریکه در آن می‌باشد. ذره هنگام ورود به سوسوزن در اثر برهمکنش با ماده انرژی از دست می‌دهد. طبق رابطه ی Bethe-Bloch برای باریکه پروتون در انرژی های کمتر از ۱۸۸ کیلو الکترون ولت با افزایش انرژی، توان توقف ذره افزایش می‌یابد و ذره انرژی بیشتری در طول مسیر (dE/dx) از دست می‌دهد [۲]. مطابق شکل ۶ برای پروتون در بازه‌ی انرژی ۱۸۸ کیلو الکترون ولت تا ۲.۹ گیگا الکترون ولت، شرایط متفاوت است و با افزایش انرژی، توان توقف پروتون کاهش می‌یابد و ذره انرژی کمتری در طول واحد مسیر بر جای می‌گذارد.



شکل ۶. رابطه Bethe-Bloch (تغییرات توان توقف باریکه به عنوان تابعی از انرژی ذره)

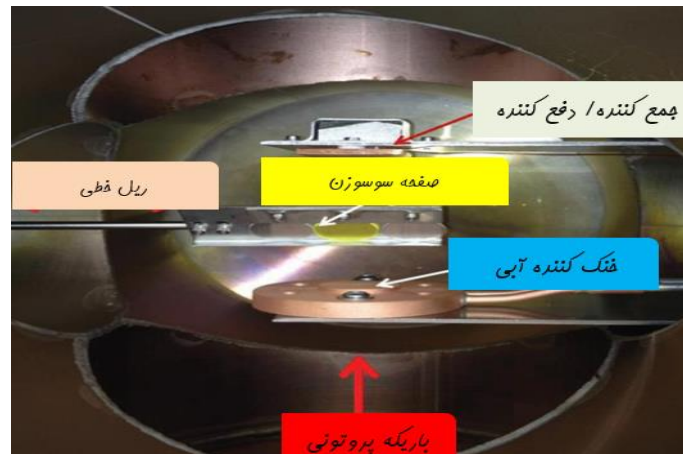
۳. طراحی نمایشگر پروفایل باریکه

۱.۳. انتخاب ماده سوسوزنی

از آنجایی که ماده‌ی سوسوزنی YAG:Ce مقاومت بسیار خوبی در برابر آسیب پرتویی نشان می‌دهد [۵] و از قدرت تفکیک فضایی خوبی نیز بهره می‌برد [۳]. به نظر می‌رسد کاندید مناسبی برای انتخاب ماده ی سوسوزنی باشد. همچنین این ماده‌ی سوسوزنی بهره نوری بالایی دارد و پاسخ نوری آن نیز خطی است. این ماده سوسوزنی سازگاری خوبی با خلا دارد و در برابر تاثیرات دمایی پاسخ پایدارتری نسبت به سایر صفحات سوسوزنی دارد [۶].

۲.۳. هندسه

با توجه به حداکثر ابعاد باریکه، صفحه‌ی سوسوزنی با ابعاد ۳۰ در ۳۰ میلی متر و ضخامت حداقلی ۵۰ میکرومتری را انتخاب می‌کنیم چرا که صفحه‌ی سوسوزنی باید تا حد امکان ضخامت کمی داشته باشد تا پراکندگی چندگانه داخل سوسوزن کاهش یابد و قدرت تفکیک تصویر حفظ شود. برای تخلیه بار الکتریکی سوسوزن از زیر لایه آلومینیومی در پشت سوسوزن بهره می‌گیریم. همچنین برای کاهش آسیب پرتویی و ملاحظات دمایی صفحه‌ی سوسوزنی نیز مطابق شکل ۷ از یک توری موسوم به توری پپرپات استفاده می‌کنیم. این توری تنها به درصد کوچکی از باریکه به عنوان یک نمونه آماری از آن اجازه عبور می‌دهد. از طرفی به منظور توانایی جا به جایی نقطه برخورد پرتو بر روی سطح سوسوزن، سوسوزن را باید روی یک ریل سوار کرد.



شکل ۷. چیدمان هندسه طراحی شده برای ابزار تشخیصی نمایشگر پروفایل باریکه

۴. شبیه سازی مونت کارلو

۱.۴. ضخامت بهینه

با استفاده از نرم افزار srIm برد پروتون 200 keV در سوسوزن YAG:Ce را حساب کردیم که مقدار آن 1.1 میکرومتر بدست آمد. در نتیجه برای توقف کامل باریکه پروتونی در سوسوزن باید صفحه‌ی سوسوزنی با ضخامت بیشتر از این مقدار انتخاب کرد. در ضخامت های کمتر از این مقدار بخشی از باریکه از صفحه‌ی سوسوزن عبور کرده و انرژی بر جای گذاشته و نور تولیدی کمتر می‌شود. به علت برد کم پروتون بحث پراکندگی های چندگانه در سوسوزن خیلی مطرح نیست و به طور خودکار قدرت تفکیک سوسوزن بالا است ولی برای تخلیه بار بهتر سوسوزن و ملاحظات دمایی بهتر است ضخامت سوسوزن تا حد ممکن نازک باشد. از آنجایی که سوسوزن های تجاری موجود در بازار حداقل ضخامت 50 میکرومتری دارند در نتیجه ناچار به انتخاب این ضخامت به عنوان ضخامت بهینه هستیم.

۲.۴. چیدمان و طراحی آزمایش

اجزای این ابزار تشخیصی شامل صفحه‌ی سوسوزنی، پایه‌ی نگهدارنده سوسوزن، جمع کننده بار، محفظه‌ی خلا و همچنین ابزار اپتیکی نظیر آینه، مجموعه لنز و دوربین است. باریکه‌ی پروتون 200 keV پس از برخورد با صفحه‌ی سوسوزن YAG:Ce به ابعاد 30 در 30 میلی متر و ضخامت 50 میکرومتر طی مکانیزم سوسوزنی نور تولید می‌کند و نور تولیدی به طرف سیستم اپتیکی که یک دوربین CCD Camera است هدایت می‌شود. در جدول ۱ مشخصات باریکه و در جدول ۲ مشخصات اجزای این ابزار تشخیصی آورده شده است.

جدول ۱. مشخصات باریکه

باریکه	انرژی	ابعاد	جریان
پروتون	200 keV	ابعاد صفر ریاضی برای بررسی قدرت تفکیک تصویر	1 میلی آمپر پالسی

جدول ۲. مشخصات اجزای نمایشگر پروفایل برای باریکه پروتونی 200 keV

عملکرد	مشخصات	اجزا
پدیده سوسوزنی (تولید نور)	YAG: Ce (۳۰ در ۳۰ میلی متر با ضخامت ۵۰ میکرومتر)	صفحه سوسوزن
جلوگیری از کاهش انرژی و تفرق باریکه	۱ نانو بار ابعاد ۱۰*۱۰*۱۰ سانتی متر	محفظه خلا
تشکیل تصویر در آن	دوربین (CCD Camera) آینه آلومینیومی مجموعه لنز	سیستم اپتیکی
کاهش آسیب پرتویی و ملاحظات دمایی صفحه‌ی سوسوزنی	دارای ۱۰۰ سوراخ جهت کاهش جریان باریکه به ۱ درصد مقدار	توری پیرپات
تخلیه بار الکتریکی سوسوزن	(۳۰ در ۳۰ میلی متر با ضخامت ۵ میلی‌متر)	زیر لایه آلومینیوم

همچنین همانطور که در شکل ۱ مشخص است صفحه‌ی سوسوزن نسبت به جهت باریکه فرودی ۴۵ درجه مایل شده است که این کمک می‌کند تا اثرات ناشی از تابش سینکروترونی به حداقل برسد و از انعکاس آن به طرف سیستم اپتیکی جلوگیری شود [۵]. از طرفی زاویه‌ی ۴۵ درجه برای بحث جانمایی دوربین و هدایت باریکه به سمت دوربین در بالای شکل ۱ زاویه‌ی مناسب تری است و دوربین در این حالت در راستای عمود قرار می‌گیرد.

۳.۴. شبیه سازی مونت کارلو

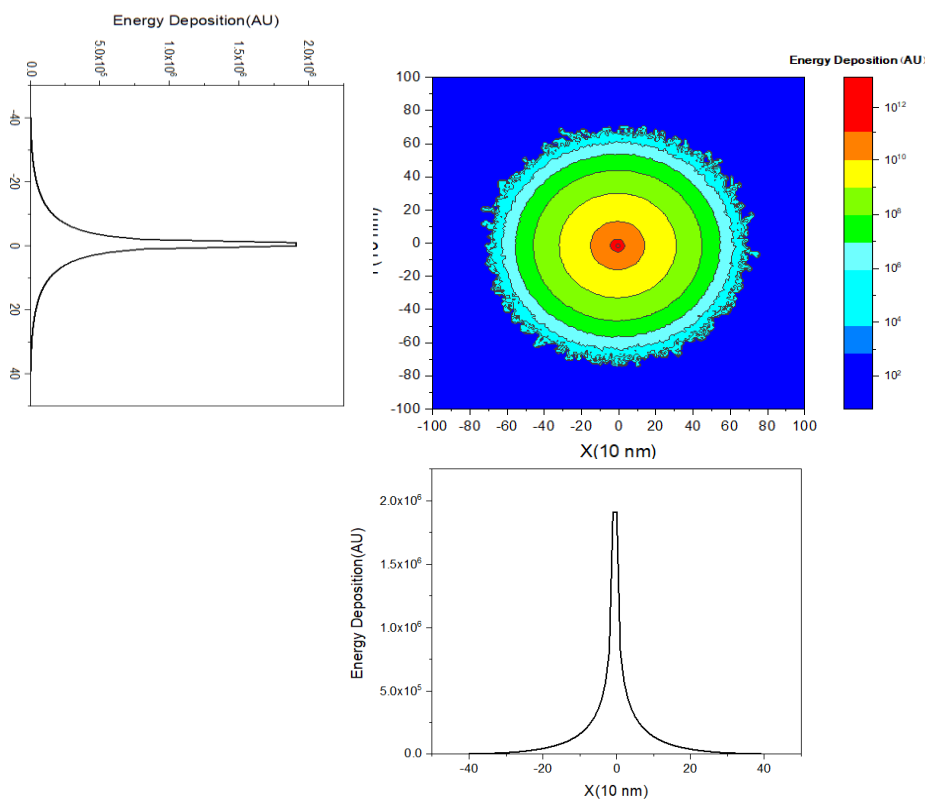
به منظور برآورد قدرت تفکیک صفحه نمایش با استفاده از کد مونت کارلوی Geant4 به شبیه سازی برخورد یک باریکه پروتون ۲۰۰ keV ایدئال با ابعاد عرضی صفر با صفحه سوسوزن YAG:Ce با ضخامت ۵۰ میکرومتری و ترابرد نور در سوسوزن می‌پردازیم. در حالت عادی انتظار داریم باریکه تنها یک نقطه‌ی ریاضی در سوسوزن را روشن کند ولی به علت پراکندگی‌های چندگانه داخل سوسوزن، یک ناحیه از سوسوزن روشن می‌شود. ابعاد این ناحیه معیاری از قدرت تفکیک سوسوزن است. در شکل ۸ توزیع عرضی پروفایل این باریکه ایدئال در دو جهت X و Y به همراه پروفایل دوبعدی آن رسم شده است. با محاسبه ی RMS (جذر میانگین مربعی) از پروفایل باریکه می‌توان معیاری از قدرت تفکیک سوسوزن را بدست آورد. برای بدست آوردن مقدار RMS با استفاده از شبیه سازی کد مونت کارلو Geant4 تعداد (شدت) فوتون‌های تولیدی در هر نقطه (Xi) از صفحه عرضی سوسوزن (ناشی از برخورد باریکه پروتون) را بدست می‌آوریم و طبق فرمول ۱ به محاسبه‌ی مقدار RMS می‌پردازیم.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i x_i^2} \quad (1)$$

که در آن n معرف تعداد کل فوتون‌های نور تولیدی ناشی از برخورد باریکه‌ی پروتونی با صفحه‌ی سوسوزنی است و Xi شدت فوتون‌های نور در هر مختصه مکانی را نشان می‌دهد.

در حالت ایده آل انتظار داشتیم که هیچگونه پخش شدگی در باریکه ذرات پروتونی مشاهده نشود و تنها در یک نقطه از ماده سوسوزنی نور تولید شود اما پراکندگی‌های چندگانه در سوسوزن منجر به افزایش پهنای باریکه شد و نور تولیدی به جای یک نقطه در ناحیه‌ای از صفحه سوسوزنی تولید شد. از آنجایی که تقارن سمتی در هندسه مسئله داریم، در نتیجه کافی است مقدار RMS را تنها برای محور X محاسبه کنیم [۷] که مقدار آن کمتر از ۰.۱ میکرومتر (RMS = 72)

(nm) با خطای کمتر از دو درصد (۱.۴۲۴ درصد) بدست آمد که نشان دهنده‌ی قدرت تفکیک بسیار بالای صفحه نمایش YAG:Ce است.



شکل ۸. توزیع عرضی باریکه در جهت محور X و Y (پروفاایل های یک بعدی باریکه) به همراه پروفاایل دوبعدی باریکه پروتون ۲۰۰ keV در صفحه سوسوزن YAG:Ce با ضخامت ۵۰ میکرومتری

۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق در ابتدا به مطالعه و بررسی عوامل موثر در طراحی ابزار تشخیصی نمایشگر سوسوزنی پروفاایل باریکه پروتون 200 keV پرداخته شده است و نقش هر کدام از این عوامل در بهره و کارایی نمایشگر سوسوزن تشریح شده است. در ادامه با بررسی پارامترهای موثر در قدرت تفکیک فضایی باریکه به طراحی و انتخاب ماده‌ی سوسوزنی و همچنین هندسه این ابزار تشخیصی پرداختیم. در نهایت با استفاده از کد مونت کارلوی Geant4 برخورد باریکه پروتون ۲۰۰ کیلو الکترون ولتی ایدئال با صفحه سوسوزن YAG:Ce را شبیه سازی کردیم و چگالی توزیع عرضی باریکه (پروفاایل باریکه) را بدست آوردیم. سپس با محاسبه ی RMS (جذر میانگین مربعی) پروفاایل باریکه معیاری از قدرت تفکیک سوسوزن YAG:Ce را بدست آوردیم که مقدار آن کمتر از ۰.۱ میکرون بدست آمد. از آنجایی که قدرت تفکیک تصویر ناشی از دو عامل سیستم اپتیکی و سوسوزن می باشد و خطای سیستم اپتیکی بسته به نوع چیدمان آن در حدود ۵۰ میکرومتر است [۸] لذا قدرت تفکیک بدست آمده برای سوسوزن در مقابل قدرت تفکیک سیستم اپتیکی بسیار مناسب است و گلوگاه ایجاد نمی‌کند و در واقع قدرت تفکیک مناسب سوسوزن YAG:Ce جهت استفاده به عنوان نمایشگر سوسوزنی این ابزار تشخیصی را تایید می‌کند.



۶. مراجع

1. G. Benedetti, U. Iriso and A. Olmos, Beam measurements at the ALBA Linac, Proc. of PAC'09, Vancouver (Canada) 2009.
2. E. Bravin, *Transverse Profiles*, CAS on Beam Diagnostics, May 2008, Dourdan (in France)
3. N. Tsuchida, Temperature dependence of gamma-ray excited scintillation time profile and light yield of GSO, YSO, YAP and BGO, NIM in Physics Research Section, Detectors Equipment 385.2 (1997)
4. Zhu, Ren-yuan, Radiation damage in scintillating crystals, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Detectors and Associated Equipment 413.2-3 (1998)
5. Simon, Claire, et al, Scintillating Screens Investigations with Proton Beams at 30 keV and 3 MeV, 5th Int Beam Instrumentation Conf. (IBIC'16), Barcelona, Spain, Sept 2016.
6. T. Naito and T. Mitsuhashi, YAG: Ce Screen Monitor using a gated CCD camera, IBIC14, TUPD08, 2014
7. C. Wiebers, M. Holz, G. Kube, D. Noelle, and G. Priebe, scintillating screen monitors for transverse electron beam profile diagnostics at the European XFEL, Proc, IBIC'13, 2013 Sep
8. D. W. Storey, "A View Screen beam profile monitor for the ARIEL e-Linac at TRIUMF", Master's thesis, University of Victoria, 2011