محاسبه ضخامت بهینه تارگت بور برای گداخت پروتون-بور۱۱ در دستگاه پلاسمای کانونی

امیر رئیس‌دانا[۱*]

[۱]پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۱۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۸/۱۰
تاریخ چاپ: ۱۴۰۵/۰۸/۱۳

شاپای چاپی: ۲۵۸۸-۴۹۲۱
شاپای الکترونیکی: ۲۵۸۸-۴۹۳x

* نویسنده مسئول:
araeisdana@aeoi.org.ir

Doi:
۱۰,۲۲۰۳٤/jmrph.۲۰۲٦,۱۲۲۹۰۹,۰

چکیده

گداخت پروتون-بور۱۱ یک واکنش گداخت غیرنوترونی است که ۳ ذره α تولید می¬کند. مزیت این واکنش نسبت به گداخت D-T آنست که نوترون تولید نمی¬شود و فعالسازی نوترونی و تولید پسماند وجود ندارد. انرژی گداخت پروتون-بور۱۱ پاک و اقتصادی است. با توجه به اینکه ۳ ذره آلفا تولید می¬شود و هر ذره آلفا دو بار مثبت دارد امکان تبدیل مستقیم به انرژی الکتریکی بدون نیاز به چرخه ترمودینامیک وجود دارد. این موضوع بازدهی تولید برق را بالا می¬برد. معایب گداخت p-^{11}B نسبت به گداخت D-T نیاز به انرژی بالاتر جهت شروع واکنش است. سطح مقطع این واکنش، دو پیک در انرژی ۱۶۰ keV و ۶۷۵ keV دارد. در این پژوهش، دستگاه پلاسمای کانونی جهت انجام واکنشهای گداخت p-^{11}B پیشنهاد شده است بطوریکه با روش پرتو-هدف و گسیل پروتونها به سمت تارگت بور بتوان به گداخت p-^{11}B دست یافت. به منظور آشکارسازی ذرات آلفای گسیل شده از آشکارساز ردپای هسته¬ای CR۳۹ و پلی کربنات استفاده می¬شود. برای آشکارسازی آلفای خالص بدون رد پروتونها، چیدمان آشکارسازهای ردپای هسته¬ای بسیار مهم است و نیاز به دقت بالایی دارد. با توجه به گسیل همزمان پروتونها و ذرات آلفا، چیدمان آشکارسازها و انتخاب ضخامت فویل بور بایستی به گونه¬ای باشد که بتوان تنها ذرات آلفا را آشکارسازی کرد. در این پژوهش، بهینه ضخامت تارگت بور به منظور آشکارسازی ذرات آلفا در پشت تارگت، با استفاده از کد SRIM محاسبه شده است. نوآوری این پژوهش، آرایش جدیدی برای قرارگیری آشکارسازها و کاهش سهم پروتونهای زمینه است.

واژگان کلیدی: گداخت p-^{11}B ، دستگاه پلاسمای کانونی، کد SRIM ، بهینه ضخامت بور ، آشکارسازی ذرات آلفا

مقدمه

نسل اول واکنشهای گداخت، واکنشهای D-T هستند که به علت سطح مقطع بالا و نیاز به انرژی پایینتر جهت اشتعال، در اولویت قرار دارند. با این حال واکنشهای گداخت p-^{11}B نیز به علت غیر نوترونی بودن و گسیل ۳ ذره آلفا مورد توجه بوده است. واکنش گداخت $^{1}p + {}^{11}B \rightarrow 3\alpha + 8.7\ MeV$ نوترون گسیل نمی-کند بنابراین مشکلات فعالسازی نوترونی و تولید پسماند را ندارد و علاوه بر آن به علت گسیل ۳ ذره آلفای با دو بار مثبت، امکان تبدیل مستقیم به انرژی الکتریکی وجود دارد. اسکولز[۱]

[۱] Scholze

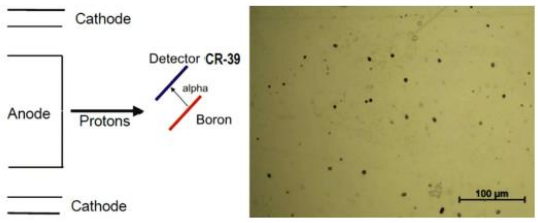
و همکارانش [۱] امکان انجام واکنش گداخت $p\text{-}^{11}B$ را با استفاده از دستگاه پلاسمای کانونی بررسی کردند. در این پژوهش کندگی از تارگت بور جامد با گسیل لیزر و شات گاز هیدروژن پیشنهاد شده است و بهره آلفای تولید شده برای دستگاه PF-۲۴ محاسبه شده است. ریبیره[۲] و همکارانش [۲] امکان انجام واکنش گداخت غیر نوترونی $p\text{-}^{11}B$ را با گسیل پرتو پرشدت لیزر به تارگت جامد پروتون-بور بررسی کردند. در این پژوهش شبیه سازی سه بعدی با روش PIC برای برهمکنش لیزر با پروتون-بور جامد انجام شده است. مارک آلادی[۳] و همکارانش [۳] واکنش گداخت پروتون-بور۱۱ را با استفاده از برهمکنش لیزر پالس کوتاه با تارگت بور بررسی کردند. برخورد لیزر با یک فویل پلیمری حاوی هیدروژن و گسیل پروتون به سمت فویل بور پیشنهاد شده است. در پیکربندی دیگر، پالس لیزر به فویل چندلایه حاوی هیدروژن و بور تابانده می‌شود و گداخت پروتون-بور۱۱ اتفاق می‌افتد. مالوی[۴] و همکارانش [۴] دو نوع چیدمان برای گسیل لیزر جهت گداخت $p\text{-}^{11}B$ پیشنهاد کردند. در نوع اول، لیزر به تارگت اول برخورد کرده و پروتونهای پرانرژی گسیل شده و به تارگت دوم که بور است برخورد می‌کنند و گداخت $p\text{-}^{11}B$ را موجب می‌شود[۵]. در نوع دوم یک تارگت وجود دارد که حاوی هیدروژن و بور است که مستقیماً لیزر به آن تابانده می‌شود[۶]. در پژوهش اریک لرنر[۷] و همکارانش [۵] با دستگاه پلاسمای کانونی Focus Fusion۱ با جریان ۲ MA تولید پلاسما با انرژی بالاتر از ۲۰۰ keV برای گداخت $p\text{-}^{11}B$ پیش بینی شده است. در این پژوهش دستیابی به معیار لاوسون $n\tau$ بزرگتر از 3.4×10^{20} $keV.s.m^{-3}$ با استفاده از پلاسمای کانونی Focus Fusion۱ بررسی شده است. در پژوهش پیچیوتو و همکارانش [۶] تولید آلفا برابر 10^{8} ذره آلفا در هر استرادیان گزارش شده است. انرژی ذرات آلفا برابر ۶-۲ MeV است. مطالعات تجربی نشان داده است فاکتور کلیدی برای بهبود بهره گداخت $p\text{-}^{11}B$ ترکیبات شیمیایی مواد بکار رفته در تارگت است که مهمتر از پالس لیزر، انرژی لیزر، پهنای پالس لیزر و شدت لیزر است. در پژوهش پیچیوتو مطالعه و بررسی تارگت آمونیابوران (NH_3BH_3) انجام شده است. آمونیابوران دارای ۱۹.۶ درصد وزنی هیدروژن است.

در پژوهش توسکا [۷] و همکارانش از لیزر پالس کوتاه برای گداخت پروتون-بور۱۱ استفاده شده است. مشخصات لیزر عبارتست از: انرژی ۱.۲-۱.۴ kJ ، مدت زمان پالس ۲.۷ ps و شدت لیزر $2\text{-}3\times10^{19}$ W/cm^2 . در این پژوهش بهره تولید آلفا برای تارگت با هندسه‌های مختلف شامل تارگت کروی، استوانه‌ای و تخت با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد بهره تولید آلفا برای تارگت کروی دو برابر تارگت صفحه‌ای است. در پژوهش توسکا و همکارانش برای آشکارسازی ذرات آلفا از آشکارساز CR۳۹ و طیف سنج تامسون[۸] استفاده شده است. در آزمایشهای بسیاری با استفاده از لیزر با انرژی محدوده کیلوژول، بهره آلفا برابر 10^{10} – 10^{11} ذره آلفا در هر شات لیزر گزارش شده است. در پژوهش مشابه توسط سادوفسکی[۹] [۸] و همکارانش از پلاسمای کانونی PF-۱۰۰۰ برای گداخت $p\text{-}^{11}B$ با روش پرتو-هدف استفاده شده است که در این روش مطابق شکل ۱ ، تارگت بور در زاویه ۴۵ نسبت به محور آند قرار داده شده است و آشکارساز CR۳۹ نیز در ناحیه مقابل تارگت قرار گرفته است. یونهای ثبت شده توسط آشکارساز CR۳۹ در شکل ۱ دیده می‌شود. در این مقاله آشکارسازی پروتونهای پراکنده شده گزارش شده است که آشکارسازی ذرات آلفای تولید شده در واکنش را دشوار می‌سازد.

در پژوهش آلادی و مالوی از باریکه لیزر برای گداخت پروتون-بور۱۱ استفاده شده است در حالیکه در پژوهش حاضر گسیل پروتونها به سمت تارگت بور با استفاده از دستگاه پلاسمای کانونی پیش بینی شده است. تفاوت پژوهش حاضر با مقاله سادوفسکی در آرایش و چیدمان تارگت بور و آشکارسازها و همچنین کاهش اثرات سهم پروتونهای زمینه است. در این پژوهش، امکان انجام واکنشهای گداخت $p\text{-}^{11}B$ با استفاده از دستگاه پلاسمای کانونی IR-MPF-۱۰۰ و با روش پرتو-هدف بررسی شده است. چیدمان جدیدی برای تارگت بور و آشکارسازها ارائه شده است و با استفاده از نرم افزار SRIM ضخامت بهینه تارگت بور به منظور آشکارسازی ذرات آلفای تولید شده در پشت تارگت محاسبه شده است. در این پژوهش، منظور از ضخامت بهینه تارگت بور، بهینه سازی شرایط آشکارسازی ذرات آلفا است و نه بیشینه سازی بازده واکنش گداخت. نوآوری این پژوهش عبارتست از آرایش جدید آشکارسازها و کاهش سهم پروتونهای زمینه.

---

[۲] Ribeyre
[۳] Mark Aladi
[۴] D. P. Molloy
[۵] Pitcher-Catcher method
[۶] In target method
[۷] Eric J Lerner
[۸] Thomson Parabola Spectrometer
[۹] Sadowski



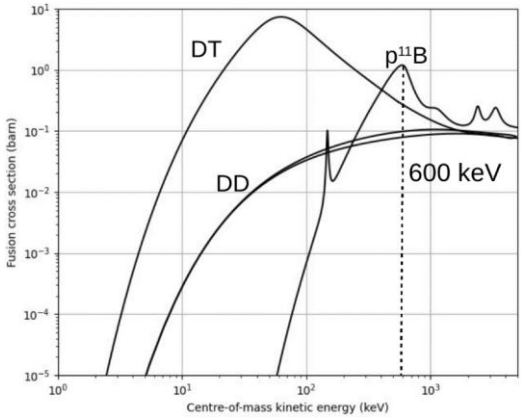
شکل ۱. طرح سادوفسکی برای آشکارسازی ذرات آلفا *[8]*

چیدمان آزمایشگاهی

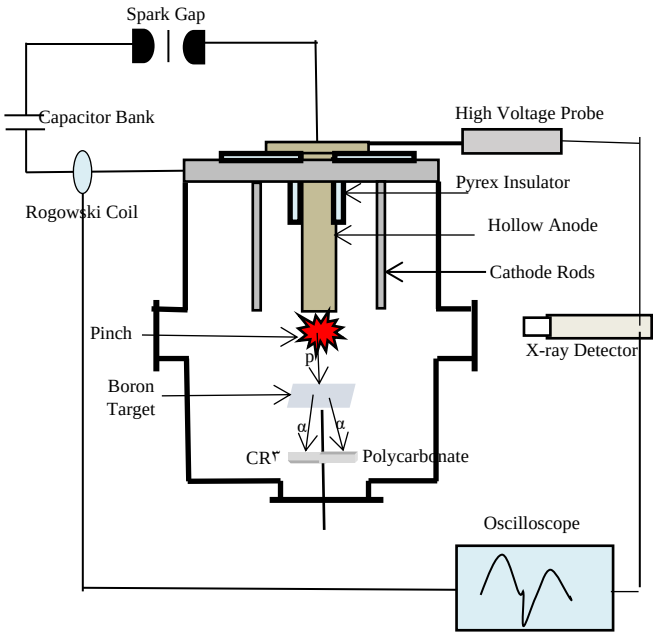
برای انجام واکنش گداخت $p + {}^{11}B \rightarrow 3\alpha + 8.7\ MeV$ نیاز است تا پروتونهای پرانرژی با هسته بور-۱۱ برخورد کنند. شکل ۲ سطح مقطع واکنش گداخت $p\text{-}{}^{11}B$ را نشان می‌دهد. نمودار سطح مقطع واکنش $p\text{-}{}^{11}B$ بر حسب انرژی پروتونها، دو پیک در انرژی ۱۶۰ keV و ۶۷۵ keV نشان می‌دهد که سطح مقطع مربوط به آنها به ترتیب برابر ۰.۱ Barn و ۱.۴ Barn است. انرژی پروتونهای گسیل شده در دستگاه پلاسمای کانونی در محدوده ۱۰۰ keV تا ۲ MeV قرار دارد [۹] بنابراین شرایط لازم برای انجام واکنشهای $p\text{-}{}^{11}B$ مهیاست.

ذرات آلفای گسیل شده دارای انرژی ۲.۴۶ MeV و ۳.۷۶ MeV هستند. به منظور انجام آزمایشها، تارگت از جنس بور در فاصله بهینه تا محل تشکیل پینچ قرار داده می‌شود. فاصله بهینه تارگت تا محل تشکیل پینچ برای دستگاه پلاسمای کانونی IR-MPF-۱۰۰ برابر ۳۰ cm است (شکل ۳). شات گاز هیدروژن موجب تشکیل پلاسمای پینچ می‌گردد و در مرحله فروپاشی پینچ، یونهای هیدروژن (پروتونها) به سمت تارگت بور شتاب می‌گیرند. پروتونهای پرشدت و پرانرژی با تارگت بور برخورد کرده و واکنش گداخت $p + {}^{11}B \rightarrow 3\alpha$ رخ می‌دهد. استفاده از فویل نازک بور این امکان را فراهم می‌سازد که ذرات α تولید شده هم در مقابل و هم در پشت فویل قابل آشکارسازی باشند. آشکارسازی دقیق α یکی از چالشهای این روش است بطوریکه بتوان ذرات آلفا را از پروتونها تفکیک کرد. روش آشکارسازی ذرات آلفا، استفاده از آشکارسازهای ردپای هسته‌ای پلی کربنات و CR^{39} است. در این چیدمان مطابق شکل ۳ ، تارگت بور در زاویه۹۰ درجه نسبت به گسیل پروتونها قرار گرفته است و آشکارسازهای پلی کربنات و CR^{39} در پشت تارگت بور قرار دارند (شکل ۳). با استفاده از کد SRIM ، بهینه ضخامت تارگت بور استخراج می‌شود بطوریکه پروتونها به طور کامل در تارگت جذب شوند و ذرات آلفا با تعداد بیشینه توان خروج از تارگت و برخورد با آشکارسازهای ردپای هسته‌ای را داشته باشند. با برخورد پروتونها با تارگت بور جامد، مقداری از انرژی پروتون فرودی در اثر تابش ترمزی تلف می‌شود و برخی از پروتونها با از دست دادن کامل انرژی خود در داخل تارگت متوقف می‌شوند و تنها کسری از پروتونها در گداخت $p\text{-}{}^{11}B$ مشارکت خواهند داشت.

تفاوت پژوهش حاضر با پژوهش سادوفسکی در آرایش تارگت بور و آشکارساز است که به وضوح در شکل ۱ و شکل ۳ این تفاوت دیده می‌شود.



شکل ۲. سطح مقطع واکنش $p\text{-}{}^{11}B$ دو پیک در انرژی‌های ۱۶۰ keV و ۶۷۵ keV نشان می‌دهد



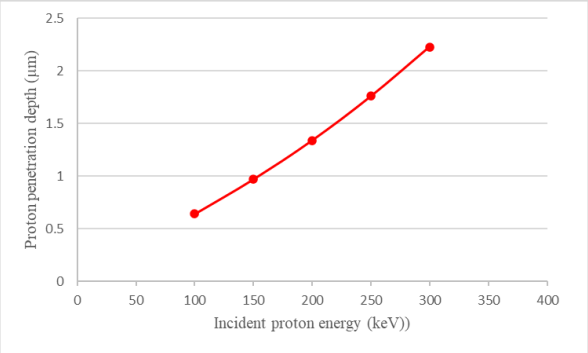
شکل ۳. چیدمان آزمایشگاهی به منظور آشکارسازی ذرات آلفا ناشی از گداخت $p\text{-}{}^{11}B$

نتایج

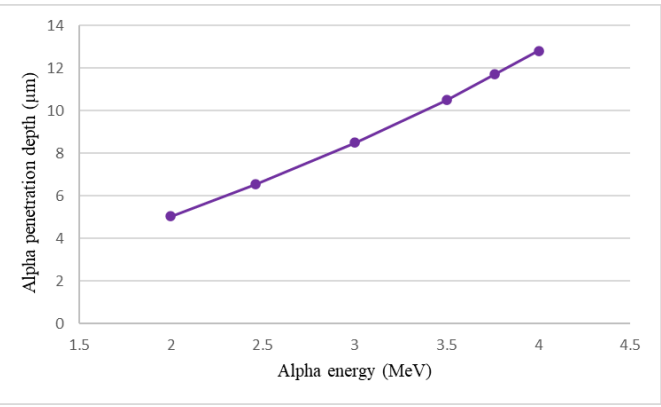
در دستگاه پلاسمای کانونی IR-MPF-۱۰۰ بیشینه تعداد پروتونها دارای انرژی در بازه ۱۰۰ keV – ۳۰۰ keV هستند. عمق نفوذ پروتونها در تارگت بور با استفاده از نرم افزار SRIM نسخه ۲۰۱۳ برای بازه انرژی ۱۰۰ keV – ۳۰۰ keV محاسبه شده است. تارگت، بور طبیعی با چگالی ۲.۳۵

g/cm^3 است که حاوی ۸۰ درصد بور۱۱ و ۲۰ درصد بور۱۰ است. هر اجرای کد SRIM به ازای ۵۰۰۰ پروتون فرودی انجام شده است. نتیجه محاسبه در شکل ۴ و جدول ۱ نشان داده شده است. مطابق شکل ۴ بیشترین عمق نفوذ در داخل تارگت بور مربوط به پروتونهای ۳۰۰ keV برابر ۲.۲۳ µm است. بنابراین با انتخاب ضخامت تارگت بور برابر ۲.۵ میکرون، می‌توان اطمینان حاصل کرد که نرخ پروتونهایی که به آشکارساز CR^{39} در پشت تارگت برخورد می‌کنند کمینه است و ردپاهای مشاهده شده بر روی آشکارساز CR^{39} مربوط به ذرات آلفا است. اگر ضخامت بور را برابر ۲.۵ میکرون در نظر بگیریم در قسمت پشت فویل بور، پروتونهای آشکارسازی شده کمینه خواهد بود. علاوه بر آن ضخامت تارگت بور بایستی طوری انتخاب شود که ذرات آلفای تولید شده توان عبور از تارگت را داشته باشند. ذرات آلفای تولید شده در اثر واکنش پروتون-بور۱۱ دارای انرژی ۲.۴۶ MeV و ۳.۷۶ MeV هستند. نمودار عمق نفوذ ذرات آلفا در داخل تارگت بور برای بازه انرژی ۲ MeV تا ۴ MeV در شکل ۵ و جدول ۱ نشان داده شده است. مطابق شکل ۵ عمق نفوذ ذرات آلفا با انرژی ۲.۴۶ MeV و ۳.۷۶ MeV در داخل تارگت بور به ترتیب برابر ۶.۵۳ µm و ۱۱.۷ µm است. بنابراین با انتخاب ضخامت ۲.۵ µm، ذرات آلفا توان عبور از تارگت و رسیدن به آشکارساز پلی کربنات و CR^{39} را دارند. محاسبات با استفاده از کد SRIM نشان می‌دهد ذرات آلفایی که انرژی بیشتر از ۱.۰۵ MeV دارند می‌توانند از فویل ۲.۵ میکرون بور عبور کرده و به آشکارساز برسند. عمق نفوذ پروتونهای با انرژی ۳۰۰ keV و ذرات آلفای با انرژی ۲.۴۶ MeV در شکل ۶ و شکل ۷ نشان داده شده است.

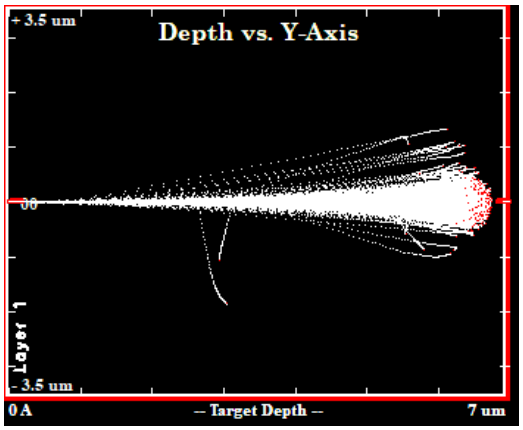
در دستگاه پلاسمای کانونی بیشینه گسیل یونها در زاویه صفر درجه نسبت به محور آند رخ می‌دهد. علاوه بر آن گسیل یونها در بازه - ۱۰ تا ۱۰+ درجه نسبت به محور آند گزارش شده است. برای زاویه گسیل ۱۰ درجه عمق نفوذ پروتونهای با انرژی ۳۰۰ keV برابر ۲.۱۹µm است که کمتر از عمق نفوذ زاویه صفر درجه است. در جدول ۲ عمق نفوذ پروتونهای با انرژی ۳۰۰ keV در داخل تارگت بور برای زوایای ۰ تا ۱۰ درجه آورده شده است. این محاسبات بیشترین عمق نفوذ را برای زاویه ۰ درجه نشان می‌دهد.



شکل ۴. عمق نفوذ پروتونها در داخل تارگت بور بر حسب انرژی پروتونهای فرودی با استفاده از کد SRIM

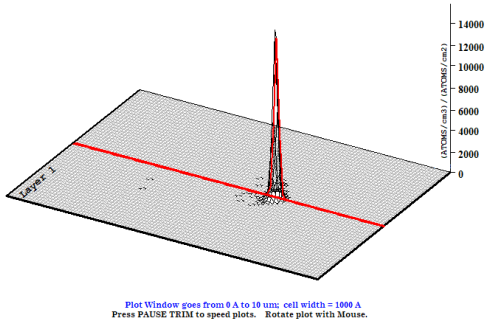


شکل ۵. بیشینه عمق نفوذ ذرات آلفا در داخل تارگت بور بر حسب انرژی ذرات آلفا با استفاده از کد SRIM



Ion Distribution

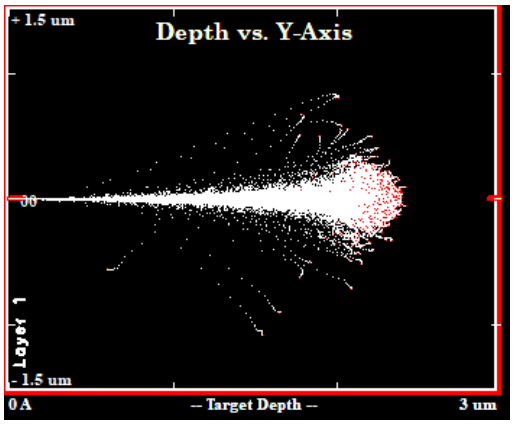
Ion Range = 6.53 um Skewness = -14.631
Straggle = 1087 A Kurtosis = 456.964



Plot Window goes from 0 A to 10 um; cell width = 1000 A
Press PAUSE TRIM to speed plots. Rotate plot with Mouse.

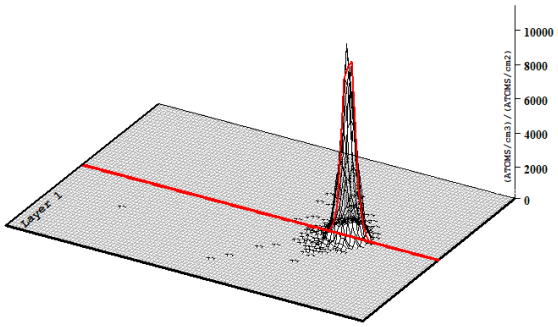
Ion = He (2.46 MeV)

شکل ۷. عمق نفوذ ذرات آلفا با انرژی ۲.۴۶ MeV در داخل تارگت بور



Ion Distribution

Ion Range = 2.23 um Skewness = -3.813
Straggle = 683 A Kurtosis = 74.316



Plot Window goes from 0 A to 3 um; cell width = 300 A
Press PAUSE TRIM to speed plots. Rotate plot with Mouse.

Ion = H (300. keV)

شکل ۶. عمق نفوذ پروتونها با انرژی ۳۰۰ keV در داخل تارگت بور

جدول ۱. بیشینه عمق نفوذ پروتونها و ذرات آلفا در تارگت بور با استفاده از کد SRIM

انرژی پروتونهای فرودی keV	عمق نفوذ پروتونها در تارگت بور µm	انرژی ذرات آلفا MeV	عمق نفوذ ذرات آلفا در تارگت بور µm
۱۰۰	۰,٦٤	۲	٥,۰٤
۱٥۰	۰,۹۷	۲,٤٦	٦,٥۳
۲۰۰	۱,۳٤	۳	۸,٥
۲٥۰	۱,۷٦	۳,٥	۱۰,٥
۳۰۰	۲,۲۳	۳,۷٦	۱۱,۷
		٤	۱۲,۸

جدول ۲. بیشینه عمق نفوذ پروتونهای با انرژی ۳۰۰ keV در تارگت بور بر حسب زاویه فرودی پروتون

زاویه نسبت به محور آند (درجه)	عمق نفوذ (µm)
۰	۲,۲۳
۲	۲,۲۳
٤	۲,۲۲
٦	۲,۲۱
۸	۲,۲۱
۱۰	۲,۱۹

بحث و نتیجه گیری

در این پژوهش، استفاده از دستگاه پلاسمای کانونی برای انجام واکنشهای گداخت $p\text{-}^{11}B$ پیشنهاد شده است. مزایا گداخت $p\text{-}^{11}B$ عبارتست از: ایمن بودن، واکنش بدون گسیل نوترون و تبدیل مستقیم ذرات باردار به انرژی الکتریکی. دستگاه پلاسمای کانونی بصورت یک شتابدهنده ذرات عمل می‌کند و یونهای پرشدت و پرانرژی را گسیل می‌کند. با قرار دادن بور به عنوان تارگت در ناحیه مقابل آند، شرایط برای انجام واکنشهای گداخت پرتو-هدف مهیا می‌شود. سطح مقطع واکنش گداخت $p\text{-}^{11}B$ برای پروتونهای فرودی با انرژی ۱۶۰ keV برابر ۰.۱ Barn و برای پروتونهای فرودی با انرژی ۶۷۵ keV برابر ۱.۴ Barn است. با تزریق گاز هیدروژن و شات هیدروژن، پروتونها به سمت تارگت بور شتاب می‌گیرند و گداخت پرتو-هدف $p\text{-}^{11}B$ رخ می‌دهد. مزیت این روش، سادگی آزمایش می‌باشد و نیازی به تاباندن پرتو لیزر به تارگت بور وجود ندارد. در این پژوهش یک چیدمان بهینه برای قرارگیری فویل بور و آشکارسازهای CR۳۹ و پلی کربنات پیشنهاد شده است و ضخامت بهینه تارگت بور طوری استخراج شده است که آشکارسازی پروتونها به حداقل برسد و امکان مشاهده ردپای ذرات آلفا بدون پروتونها مهیا شود. به عبارت دیگر ضخامت بهینه تارگت بور عبارتست از حداکثر آلفای عبوری با شرط توقف کامل پروتونها. این چیدمان به زودی بر روی دستگاه پلاسمای کانونی IR-MPF-۱۰۰ نصب شده و نتیجه آزمایشها گزارش خواهد شد. در این پژوهش به منظور آشکارسازی خالص ذرات آلفا در پشت تارگت بدون رد پروتونها، ضخامت بهینه فویل بور با استفاده از کد SRIM محاسبه شده است. بهینه ضخامت تارگت بور طوری محاسبه شده است که در پشت تارگت بور، تنها ذرات آلفا آشکارسازی شوند و پروتونها از تارگت بور عبور نکنند. نتایج شبیه‌سازی با کد SRIM نشان می‌دهد با انتخاب ضخامت تارگت بور برابر ۲.۵ میکرون، می‌توان اطمینان حاصل کرد که پروتونها در داخل تارگت متوقف شده و به آشکارساز CR۳۹ برخورد نمی‌کنند. این چیدمان شرایط را برای کاهش سهم پروتون-های عبوری و بهبود تفکیک ردپاهای آلفا فراهم می‌کند. عمق نفوذ پروتونهای ۳۰۰ keV با زوایای فرودی ۰ تا ۱۰ درجه با استفاده از کد SRIM محاسبه و با یکدیگر مقایسه شدند. این مقایسه نشان می‌دهد با افزایش زاویه از ۰ تا ۱۰ درجه ، عمق نفوذ از ۲.۲۳ µm تا ۲.۱۹ µm کاهش می‌یابد. ضخامت ۲.۵ µm برای پروتونهای گسیل شده در دستگاه پلاسمای کانونی IR-MPF-۱۰۰ و با هدف آشکارسازی آلفا در پشت تارگت بور استخراج شده است و به این فرضیات وابسته است.

منابع

[۱] M. Scholz and e. al, "On the Possibility of Initiating the Proton–Boron Nuclear Fusion Reaction in the Plasma-Focus Device," *Journal of Fusion Energy* , vol. ۳۸, no. https://doi.org/۱۰,۱۰۰۷/s۱۰۸۹٤-۰۱۹-۰۰۲۲٥-٥, p. ٥۲۲–٥۳۰, ۲۰۱۹.

[۲] X. Ribeyre and e. al, "Multiscale study of high energy attosecond pulse interaction with matter and application to proton–Boron fusion," *Scientific Reports*, vol. ۱۲, no. https://doi.org/۱۰,۱۰۳۸/s٤۱٥۹۸-۰۲۲-۰۸٤۳۳-٤, ۲۰۲۲.

[۳] M. Aladi and e. al, "Alpha particle yield in femtosecond laser-driven proton–boron fusion," *THE EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL*, vol. ۲۳٤, no. https://doi.org/۱۰,۱۱٤۰/epjs/s۱۱۷۳٤-۰۲٥-۰۱٦۷٤-۰, p. ۲۹۹۹–۳۰۰٥, ۲۰۲٥.

[٤] D. P. Molloy and e. al, "Alpha particle production from novel targets via laser-driven proton-boron fusion," *PHYSICAL REVIEW RESEARCH*, vol. ۷, ۲۰۲٥.

[٥] E. J. Lerner and e. al, "Focus Fusion: Overview of Progress Towards p-B۱۱ Fusion with the Dense Plasma Focus," *Journal of Fusion Energy* , vol. ٤۲, no. ۷, pp. https://doi.org/۱۰,۱۰۰۷/s۱۰۸۹٤-۰۲۳-۰۰۳٤٥-z, ۲۰۲۳.

[٦] A. Picciotto and e. al, "Ammonia borane-based targets for new developments in laser-driven," *Applied Surface Science*, vol. ٦۷۲, p. https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.apsusc.۲۰۲٤.۱٦۰۷۹۷, ۲۰۲٤.

[۷] M. Tosca and e. al, "Hydrogen boron fusion in confined geometries," *High Power Laser Science and Engineering*, p. https://doi.org/۱۰,۱۰۱۷/hpl.۲۰۲٥,۱۰۰٥٥, ۲۰۲٥.

[۸] M. J. Sadowski and e. al, "Recent Achievements of Plasma Studies within PF-۱۰۰۰U Facility," *ACTA PHYSICA POLONICA A* , vol. ۱۳۸, no. ٤, ۲۰۲۰.

[۹] K. TAKAO and e. al, "Characteristics of Ion Beams Produced in a Plasma Focus Device," *Jpn. J. Appl. Phys.* , vol. ٤٠, pp. ۱۰۱۳-۱۰۱٥, ۲۰۰۱.

JMRPh. (11(1): 59-66, Spring & Summer, 2026

Computation of Optimum Boron Target Thickness for p-^{11}B Fusion by Plasma Focus Device

Amir Raeisdana[1*]

[1]Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Atomic Energy Organization of Iran, Tehran, Iran

Article details

Received: ۲۰۲۵-۱۲-۰۹
Accepted: ۲۰۲۶-۱۱-۰۱
Published: ۲۰۲۶-۱۱-٤

ISSN: ۲٥۸۸-٤۸۲۱
eSSN: ۲٥۸۸-٤۹۳x

Correspondence email: araeisdana@aeoi.org.ir

Doi: ۱۰,۲۲۰۳٤/jmrph.۲۰۲٦.۱۲۲۹۰۹,۰

Abstract

Proton-boron۱۱ fusion is an aneutronic fusion reaction that produces ۳ α particles. The advantage of this reaction over D-T fusion is that no neutrons are produced and there is no neutron activation and no waste production. The proton-boron۱۱ fusion energy is clean and economical. Given that ۳ alpha particles are produced and each alpha particle has double positive charge, it can be directly converted into the electrical energy without the need for the thermodynamic cycle. This increases the efficiency of electricity generation. The disadvantage of p-۱۱B fusion compared to D-T fusion is requiring to higher energy to initiate the reaction. The cross-section of this reaction has two peaks at energies of ۱٦۰ keV and ٦۷٥ keV. In this study, a plasma focus device has been proposed to perform p-۱۱B fusion reactions, so that p-۱۱B fusion can be achieved by using the beam-target method and emitting protons towards the boron target. In order to detect the emitted alpha particles, the CR۳۹ and polycarbonate nuclear track detectors are used. For the detection of pure alpha without protons, the arrangement of nuclear track detectors is very important and requires high accuracy. Considering the simultaneous emission of protons and alpha particles, the arrangement of detectors and the selection of the boron thickness foil should be such that only alpha particles can be detected. In this study, the optimal thickness of the boron target for the detection of alpha particles behind the target has been calculated using SRIM code. The innovation of this research is a new arrangement for placing detectors and reducing the contribution of the background protons.

Keywords: p-^{11}B Fusion Reaction, Plasma Focus Device, SRIM Code, Optimum Thickness of Boron, Alpha particle detection