آماده سازی هدفهای مناسب برای اندازه‌گیری سطح مقطع‌های واکنش‌های PIGE

جوکار ، علیرضا* ؛ کاکویی ، امید رضا؛ لامعی رشتی، محمد

سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشکده فیزیک و شتابگرها، صندوق پستی ۸۳۶-۱۴۳۹۵ ، تهران- ایران

چکیده:

توابع تحریکی بیشتر واکنش‌های گسیل پرتو گاما پروتون – القایی (Proton Induced Gamma-ray Emission) *حاصل از بمباران هدفهای سبک با باریکه پروتون کم انرژی، دارای رزونانسهای باریک ومتوالی هستند که برای اندازه‌گیری آنها نیاز به استفاده از هدفهای بسیار نازک می‌باشد. در این کار پژوهشی هدف های مناسب برای مطالعه واکنش‌های هسته‌ای* $^{27}Al(p,p\gamma_{1,2})^{27}Al$، $^{27}Al(p,\alpha\gamma_1)^{24}Mg$، $^{29}Si(p,p\gamma_1)^{29}Si$، $^{28}Si(p,p\gamma_1)^{28}Si$ و $^{31}P(p,p\gamma_1)^{31}P$ *با روش لایه نشانی فیزیکی بخار تهیه شدند.*

کلمات کلیدی *:هدفهای نازک Si، Al و P ، واکنش‌های گسیل پرتو گاما پروتون – القایی (PIGE) ، مقطع‌های دیفرانسیلی.*

مقدمه:

در آزمایشگاه‌های فیزیک هسته‌ای، واکنش‌های هسته‌ای از بمباران هدف‌های مناسب ایجاد می‌شوند. مشخصات هدف انتخابی به ماهیت آزمایش، واکنش هسته‌ای تحت مطالعه، ساختار هسته هدف و مشاهدات حاصل از آن بستگی دارد. هدف‌های نازک یا به صورت خود نگهدار و یا بر روی یک زیرلایه مناسب نشانده می‌شوند. طیف وسیعی از هدف‌های مورد استفاده درمطالعات واکنش‌های هسته‌ای به روش لایه نشانی فیزیکی بخار بر روی زیرلایه‌های نازک یا ضخیم رسوب داده می‌شوند. زیرلایه‌ها از عناصری انتخاب می گردند که مواد هدف به صورت یکنواخت و با چسبندگی خوب بر سطح آنها بنشینند. آنها باید در هنگام بمباران با باریکه، تولید زمینه مزاحم نکنند و ضریب انتقال حرارتی مناسب داشته باشند تا از آسیب هدف در اثر حرارت تولید شده جلوگیری شود. برای زیرلایه‌های ضخیم بهترین انتخاب، تانتالم، مولیبدن، مس و نیکل هستند. این عناصر به علت عدد اتمی نسبتاً بالایی که دارند در انرژی‌های پایین تمایل به واکنش هسته‌ای ندارند. همچنین نقطه ذوب آنها بالا بوده و در مقابل جریان زیاد مقاوم هستند. در تعدادی از آزمایش‌ها مانند اندازه‌گیری سطح مقطع، استفاده از زیرلایه‌های نازک مناسبتر است. این زیر لایه‌ها به قدری نازک انتخاب می شوند که گرمای ذخیره شده در آنها در مدت بمباران با باریکه (در بعضی از آزمایشها زمان بمباران هدف تا چندین روز متوالی به طول می کشد) ناچیز می‌باشد. برای زیرلایه‌های نازک بهترین انتخاب کربن، طلا و نقره هستند [۱]. بعد از تهیه زیرلایه مناسب، مواد هدف بر روی آنها نشانده می‌شوند. استفاده از هدف نازک و بادوام برای اندازه‌گیری دقیق سطح

مقطع‌ها بسیار مهم و تعیین کننده می‌باشد. شرایط اصلی یک هدف مناسب به شرح زیر است:

۱. هدف باید همگن و به اندازه کافی نازک باشد، به طوری که افت انرژی ذرات در آن کمتر از پهنای رزونانس شود. با رعایت این شرط می‌توان رزونانسهای متوالی و نزدیک به یکدیگر را بدون همپوشانی تمیز داد. مهمتر اینکه اگر ضخامت هدف نازک نباشد، بهره پرتو گاما اندازه‌گیری شده معادل با انتگرال سطح مقطع بر روی افت انرژی خواهد بود تا معادل با مقدار سطح مقطع واکنش هسته‌ای مورد مطالعه .

۲. نمونه‌های ساخته شده باید پایداری مکانیکی، شیمیایی وحرارتی مناسب داشته باشد، بطوریکه در حین پرتو دهی مخصوصاً در جریان‌های زیاد و زمانهای طولانی تجزیه و تخریب نشوند.

۳. هدایت الکتریکی و گرمایی مناسب داشته باشد.

در سالهای اخیر، روش آنالیز PIGE به علت پتانسیل بالایی که در آنالیز کمی و همچنین نمایه عمقی عناصر سبک ($Z<18$) دارد به عنوان یک روش مکمل برای PIXE مورد توجه قرار گرفته است. به دلیل وجود رزونانس‌های تیز در بسیاری از سطح مقطع‌های این برهمکنش‌ها، آنالیز به روش PIGE، تکنیک بسیار مناسبی برای تعیین نمایه عمقی رزونانسی با قدرت تفکیک بالا نیز می‌باشد. در حال حاضر محدودیت عمده آنالیز به روش PIGE متکی بودن آن به مقایسه با نمونه استاندارد است. برای دستیابی به نتایج بهتر و مستقل از استاندار، داشتن مقادیر دقیق و قابل اعتماد داده‌های سطح مقطع الزامی می‌باشد. برای این منظور آژانس بین المللی انرژی اتمی پروژه جدیدی در ارتباط با داده‌های پایه برای آنالیز به روش PIGE را در سال ۲۰۱۱ تصویب و آغاز نموده است [۲].این پروژه با شرکت چند آزمایشگاه معتبر که در زمینه آنالیزهای باریکه یونی فعال می‌باشند شروع شده است. آزمایشگاه واندوگراف پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای که پیشینه طولانی در به کارگیری روش‌های مختلف آنالیز با باریکه یونی همچون PIXE، Micro-PIXE، RBS و NRA را دارد به عنوان یکی از آزمایشگاه ها در این پروژه بین المللی مشارکت داشته است.

روش کار :

در این کار تحقیقاتی، تمام هدفها نازک به روش تبخیر فیزیکی در خلاء بر روی زیرلایه‌های نازک نقره و کربن نشانده شدند. دستگاه‌های لایه نشانی به روش تبخیر فیزیکی در خلاء، از یک منبع حرارتی و یک زیرلایه که درون یک محفظه خلاء محبوس شده‌اند، تشکیل شده است. محفظه تا فشاری کمتر از 10^{-5} میلی بار تخلیه می‌شود. منبع حرارتی معمولاً یک بوته یا فیلمان گرم شده توسط روش مقاومتی می‌باشد. اتم‌های بخار شده حاصل از حرارت ترکیب داخل بوته در مسیر مستقیم به سمت زیر لایه حرکت کرده و بر روی آن انباشت می‌شوند. در این روش باید به این نکته توجه کرد که در صورت استفاده از هر نوع ترکیب شیمیایی، ممکن است بعد از انجام لایه نشانی همان ترکیب با همان نسبت

استوکیومتری اولیه نباشد. بنابراین باید بعد از لایه نشانی، استوکیومتری لایه تشکیل شده بررسی شود. شکل (۱) نمایی از دستگاه لایه نشانی مورد استفاده را نشان می‌دهد. زیرلایه‌های نقره مورد استفاده نیز با همین روش بر روی سطح شیشه (لام میکروسکوپ) نشانده شده‌اند. شیشه‌های لام قبل از استفاده با مواد شوینده و یا محلول آب قند آغشته شده و بعد از آن خوب خشک می‌شوند. بعد از آنکه نقره بر روی شیشه لام تبخیر شد، همانطور که از شکل (۲) مشاهده می‌شود، با وارد کردن لام در ظرف آب مقطر گرم (دمای 90^{o} C) در زاویه 45^{o}، در اثر نیروی کشش سطحی آب و حل شدن شوینده یا محلول آب قند موجود بر سطح لام، فیلم نازک نقره از لام به آرامی جدا شده و بر سطح آب شناور می‌شود [۳]. در این مرحله، فیلم‌های جدا شده را بر روی فریم‌هایی از جنس آلومینیوم قرار داده وبرای بمباران بر سیستم نگهدارنده هدف در داخل محفظه واکنش نصب می‌شوند. در بعضی مواقع به علت اینکه مایع شوینده یا آب قند به طور یکنواخت بر سطح لام شیشه‌ای توزیع نمی‌شوند، فیلم نقره در هنگام جداسازی از روی شیشه پاره می‌شود و یا بر سطح فیلم سوراخ‌های ریز ایجاد می‌شود. برای رفع این مشکل از تبخیر حدود ۳۰ mg پودر $BaCl_2$ بر روی لام شیشه (در فاصله ۱۲ cm از بوته) به جای مواد شوینده یا آب قند استفاده شد [۴]. در مورد جدا سازی فیلم کربن از لام، چون احتمال پاره شدن آن زیاد است، فیلم کربن روی لام شیشه‌ای را در ماده‌ای آلی بنام زاپون لاکور (مخلوطی از ۳۰ درصد کولودین و۷۰ درصد آن- آمیل استات) غوطه ور شد. پس از ۲۴ ساعت نگهداری در دسیکاتور و خشک شدن کامل، آنرا وارد آب مقطر کرده و فیلم کربن را از سطح لام جدا نمودیم. لازم به ذکر است مقداری از ماده زاپون لاکور بر روی سطح فیلم کربن باقی می‌ماند که در حین بمباران با باریکه قسمتی زیادی از آن تبخیر شده و مشکلی برای آزمایش ایجاد نمی کند. برای اندازه‌گیری توابع تحریکی واکنش‌های $^{29}Si(p,p\gamma_1)^{29}Si$ و $^{28}Si(p,p\gamma_1)^{28}Si$، ۱۱۰ mgr پودر منواکسید سیلیسیم را بوسیله حرارت دادن بوته‌ای از جنس تانتالم، بر روی زیر لایه نقره که در فاصله ۳۵ cm از بوته قرار دارد، تبخیر شد. قبل از استفاده، رطوبت پودر منواکسد سیلیسیم را با گذاشتن آن در آون در دمای حدود ۱۲۰ درجه برای مدت ۳۰ دقیقه گرفته شده و تا شروع لایه نشانی در دسیکاتور نگهداری شده است. باید توجه داشت که مونواکسید سیلیسیم قبل این که به نقطه ذوب تصعید می‌شود. همچنین چون در مرحله لایه نشانی، ذرات ریز پودر بر اثر گرمای کسب شده به اطراف پخش می‌شوند، حفره‌های سوزنی شکلی بر سطح هدف تشکیل می‌شود که باعث آسیب دیدن آن در حین تشکیل لایه نازک می‌شوند. به طور کلی مشاهده می‌شود که احتمال ایجاد حفره‌های سوزنی در دمای بالای ۱۳۵۰ درجه سانتیگراد زیاد می‌شود [۵]. برای جلوگیری از این پدیده، فاصله بوته از زیر لایه نقره را افزایش داده و آهنگ افزایش جریان (دمای بوته) را کند شد. بطوری که لایه نشانی در سه مرحله انجام گردید. با وجود اینکه کم کردن آهنگ افزایش جریان باعث کاهش سوراخ‌های سوزنی شکل بر سطح فیلم شد، ولی به علت افزایش زمان تبخیر باعث

ایجاد چروک بیشتری بر سطح هدف گردید. بعد ازخارج کردن هدف از دستگاه لایه نشانی، آن را برای مدت ۳-۴ دقیقه در دمای حدود۴۰ درجه سانتیگراد در محیط هوا مقابل لامپ فلورسنت قرار گرفت. این عمل باعث افزایش دوام فیلم مونواکسید می‌شود [۶]. با این حال فیلم منواکسید سیلیسیم تشکیل شده به طور یکنواخت و با چسبندگی و دوام بسیار خوبی بر سطح زیرلایه نقره نشست. بطوریکه در مدت ۴۸ ساعت بمباران متوالی با باریکه پروتون ۷۰۰-۱۰۰ nA هیچ گونه آسیبی در هدف مشاهده نشد. برای اندازه‌گیری سطح مقطع‌های واکنش $^{31}P(p,p\gamma_1)^{31}P$، ۲۷۰ mgr پودر فسفید روی را با عبور جریان از بوته مولیبدن، بر روی یک زیر لایه کربن نازک که در فاصله ۱۲/۵ cm از بوته قرار گرفته، نشانده شد. آنالیزPIGE پودر فسفید روی خریداری شده وجود ناخالصی آلومینیم را نشان داد. با توجه به اینکه در طیف RBS، قله‌های مربوط به آلومینیم و فسفر با هم تداخل می‌کنند، از این رو برای ممانعت از نشستن ذرات آلومینیم در فرایند لایه‌نشانی از اختلاف دمای تبخیر بین آلومینیم و فسفید روی استفاده شد. لایه نشانی با آلومینیم با بوته مشابه و همچنین ولتاژ یکسان نشان می‌دهد که آلومینیم در جریان ۱۵۰A شروع به ذوب شدن می‌کند. از این رو جریان را به آرامی تا ۱۴۰ A افزایش داده و بلافاصله کاهش می‌دهیم. این فرایند سه مرتبه تکرار شده است. نهایتاً فیلم یکنواختی از فسفید روی بر سطح زیر لایه کربن تشکیل شد. فیلم تهیه شده در مقابل باریکه پروتون با جریان حدود ۵۰ nA، برای چندین ساعت بطور مداوم پرتودهی شد. برای اطمینان از پایداری هدف در حین آزمایش، استوکیومتری هدف چندین بار بوسیله طیف RBS ناشی از ذرات آلفا با انرژی۲/۵ MeV بررسی شد، نتایج هیچگونه نشانه ای از آسیب رسیدن به نمونه را نشان ندادند. در هنگام استفاده از فسفید روی (مرگ موش) باید سمیت شیمیایی آن را به خاطر داشت. در آخر برای تهیه هدف نازک آلومینیم، ۵۰ mgr مفتول آلومینیم خالص به وسیله بوته سیمی شکلی از جنس تنگستن، بر روی زیر لایه نازک نقره که در فاصله ۱۲/۵ cm از بوته نصب شده است، نشانده شد.

نتایج و بحث:

برای آماده سازی فیلم های نازک مناسب هر یک هدفهای Si ،Al وP، لایه نشانی آنها چندین بار انجام شد تا نهایتاً هدفهای نازک، همگن و بادوام تهیه شدند. مشخصات هدفهای مورد استفاده برای اندازه‌گیری سطح مقطع واکنش‌های PIGE در جدول (۱) خلاصه شده است. ضخامت هدف های Al/Ag، SiO/Ag و Zn_3P_2/C با استفاده از طیف‌های RBS حاصل از ذرات آلفا با انرژیهای ۲ و۲/۵ MeVو مقایسه طیف‌های بدست آمده با نرم افزارSIMNRA بدست آمده است [۷]. در شکل (۳ تا ۵)، این نوع طیفها نمایش داده شده اند. افت انرژی پروتون‌های در فیلم های هدف با استفاده از نرم افزار SRIM-2006 محاسبه شده است [۸]. افت انرژی پرتونهای داخل هدفهای تهیه شده در محدوده پهنای بیشتر رزونانسهای واکنش‌های PIGE مورد مطالعه می باشد. شکل (۶) تابع تحریکی اندازه‌گیری شده برای

واکنش $^{29}Si(p,p\gamma_1)^{29}Si$ را نشان می‌دهد [۹]. همانطور که از این شکل مشاهده می‌شود رزونانسهای باریک و متوالی بخوبی مشخص می‌باشند. این شرایط برای دیگر اندازه‌گیری ما در مورد هدفهای Al و P نیز دیده می‌شود [۱۰ و ۱۱].

هدف این کار تحقیقاتی تهیه هدفهای نازک، بادوام وهمگن Si،Al و P برای اندازه‌گیری سطح مقطع واکنشهای PIGE است. به این منظور هدفهای نازک Al/Ag، SiO/Ag و Zn_3P_2/C به ترتیب با ضخامتهای ۲۹، ۲۶ و ۱۱۰ $\mu g/cm^2$ تهیه شدند. در توابع تحریکی اندازه‌گیری شده با این هدفها، رزونانسهای باریک و نزدیک بهم بخوبی استخراج شدند.

مراجع :

[۱] C. Iliadis, Nuclear Physics of Stars, Cauldrons in the Cosmos, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, ISBN 978-3-527-40602-9 , p.249.

[۲] D. Abriola, P. Dimitriou, A. Pedro de Jesus, Summary Report 1st Research Coordination Meeting Development of Reference Database for Particle-Induced Gamma ray Emission (PIGE) Spectroscopy, IAEA Headquarters, Vienna, Austria. 2011.C.

[۳] A. Stolarz, J Radioanal Nucl Chem 299 (2014) 913.

[۴] S.H. Maxman, Nucl. Instr. Meth. 50 (1967) 53.

[۵] Y. Lachance, J. C. Roy, Rev. Sci. Instrum. 43 (1972) 1382 .

[۶] G. Hass, J. Am, Ceram, Soc. 33 (1950) 353.

[۷] M. Mayer, SIMNRA, Report IPP 9/113, Max Planck institute fürplasmaphysik, Germany, 1997.

[۸] J.F. Ziegler, M.D. Ziegler, J.P. Biersack, Nucl. Instr. Meth. B 268 (2010) 1818.

[۹] A. Jokar, O. Kakuee, M. Lamehi–Rachti, Nucl. Instr. Meth. B 371 (2016) 37.

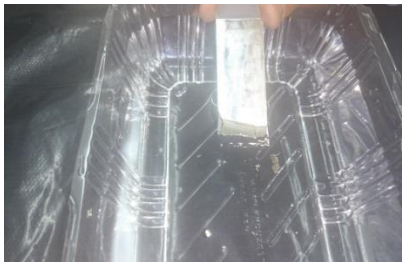
[۱۰] A. Jokar, O. Kakuee, M. Lamehi–Rachti, Nucl. Instr. Meth. B 362 (2015) 138.

[۱۱] A. Jokar, O. Kakuee, M. Lamehi–Rachti, Nucl. Instr. Meth. B 383 (2016) 152.

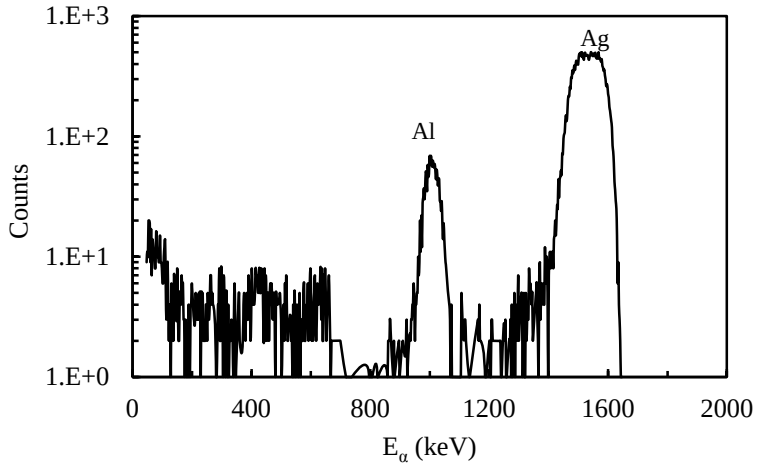
جدول(۱) مشخصات هدفهای مورد استفاده برای مطالعه مقطع‌های واکنش‌های PIGE

هدف	ضخامت زیرلایه ($\mu g/cm^2$)	ضخامت هدف ($\mu g/cm^2$)	افت انرژی دربازه E_p= ۲-۳ MeV (keV)
Al/Ag	۱۲۹	۲۹	**۲/۹-۲/۲**
SiO/Ag	۹۷	۲۶	**۴/۳-۳/۲**
Zn_3P_2/C	۱۰۰	۱۱۰	**۷/۴-۵/۷**

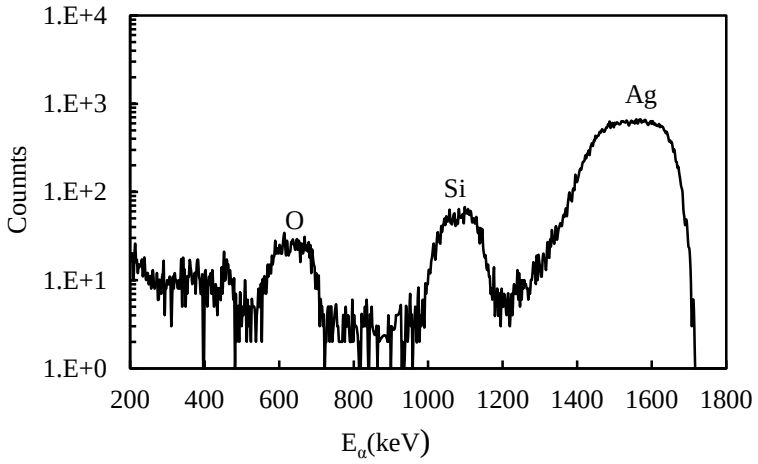
شکل(۱) دستگاه لایه نشانی آزمایشگاه واندوگراف.



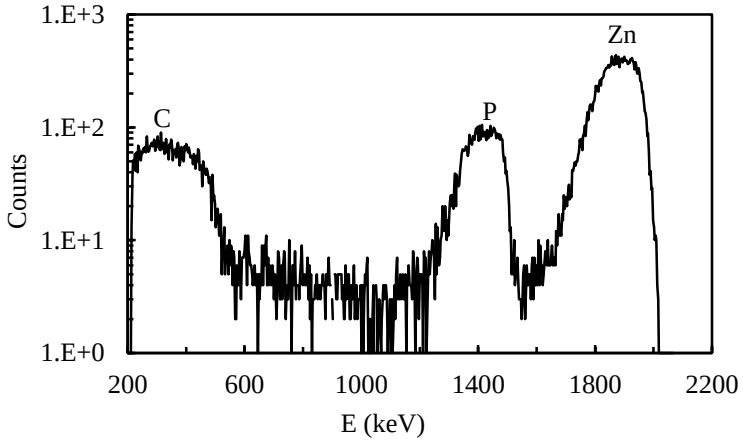
شکل (۲) جداسازی فیلم از لام شیشه‌ای.



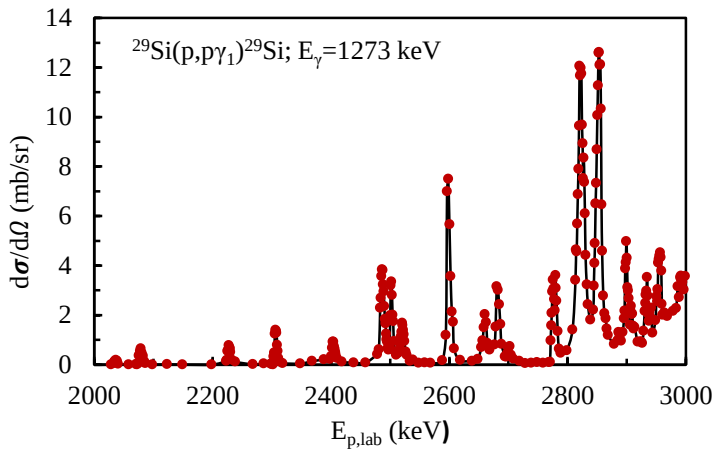
شکل (۳) طیف پس پراکندگی ذرات آلفا حاصل از بمباران هدف Al/Ag با باریکه هلیمMeV ۲ و زاویه پراگندگی ^{o}۱۶۵ برای اندازه‌گیری ضخامت هدف.



شکل (۴) طیف پس پراکندگی ذرات آلفا حاصل از بمباران نمونه SiO/Ag با باریکه هلیم MeV ۲ .



شکل (۵) طیف پس پراکندگی ذرات آلفا حاصل از بمباران هدف Zn_3P_2/C با باریکه هلیم ۲/۵ MeV .



شکل (۶) تابع تحریکی اندازه‌گیری شده برای گامای ۱۲۷۳ keV در زاویه آشکارسازی ۹۰^{o}.