

اندازه‌گیری نمای فراوانی فسفر کشت شده فراسطحی در سیلیسیوم

محمد بلوریزاده^۱ و ایان میچل^۲

۱. بخش فیزیک، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران

۲. بخش فیزیک و نجوم، دانشگاه انتاریو غربی، انتاریو، کانادا

(دریافت مقاله: ۸۱/۱۲/۲۴ ؛ دریافت نسخه نهایی: ۸۲/۶/۳۰)

چکیده

مطالعه‌ای را برای به دست آوردن نمای فراوانی فسفر (مقدار فسفر بر حسب عمق از سطح) فراسطحی و به منظور تکمیل مطالعات مشابه در مورد بر (B) شروع کرده‌ایم. کشت فراسطحی فسفر و بر، از نظر مطالعه، طراحی و ساخت تراشه‌های الکترونیکی با چگالی زیاد اهمیت فراوان دارند. در این مقاله، گزارشی از چگونگی اندازه‌گیری نمای فراوانی فسفر با استفاده از ترکیب طیف نگاری جرمی، زمان پرواز یون ثانویه ($TOF-SIMS$) و تجزیه فرایند هسته‌ای $^{31}P(\alpha, p)^{34}S$ تهیه شده است. با این که سطح مقطع این فرایند هسته‌ای کوچک است، امکان محاسبه مقدار مطلق فسفر کشت شده در سیلیسیوم در عمق کمتر از 20 nm را ایجاد نموده‌ایم. به این منظور دو مجموعه از نمونه‌های سیلیسیوم را که در آن فسفر کشت شده بود تهیه کردیم. در یک مجموعه از نمونه‌ها، فسفر به مقدار $1 \times 10^{14}\text{ cm}^{-2}$ تا $3 \times 10^{15}\text{ cm}^{-2}$ با انرژی 8 keV و در مجموعه نمونه دوم فسفر به مقدار $1 \times 10^{12}\text{ cm}^{-2}$ تا $1 \times 10^{15}\text{ cm}^{-2}$ با انرژی 1 keV تا 30 keV کشت شده است. در این مطالعه اثری از کشت خود به خودی دیده نشد.

واژه‌های کلیدی: نمای فراوانی عمق، کنش خودبه‌خودی، فسفر، ایندیوم، سیلیسیم، RBS، NRA، SIMS

۱. مقدمه

(NRA) [۳-۵] و روشهای اندازه‌گیری الکتریکی [۶] به دست می‌آورند.

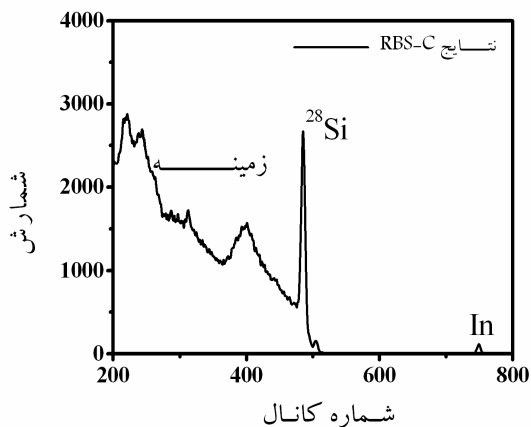
متداولترین و سریعترین روش برای به دست آوردن نمای فراوانی فسفر، طیف نگاری جرمی یون ثانویه است [۷]. اما اندازه‌گیری مقدار مطلق یون کشت شده فراسطحی بر مبنای این روش ساده نیست و نتایج به دست آمده تنها از نظر کیفی و نسبی اهمیت دارند. مقدار خطای نمای فراوانی یون کشت شده تنها بر مبنای طیف‌نگاری جرمی یون ثانویه زیاد است. دلایل متعددی برای این مشکل می‌توان بیان کرد. اول اینکه اندازه‌گیری مقدار مطلق یون در روشهای استاندارد طیف نگاری جرمی یون ثانویه سخت تحت تاثیر حساسیت ضعیف آن قرار می‌گیرد و زمانی که مقدار یون کشت شده کم است بسیار جدی

هر روز نیاز صنعت برای ایجاد اتصال $p-n$ در سیلیسیوم به‌منظور ساخت تراشه‌های الکترونیکی فراریز ($ULSI$) به سرعت افزایش می‌یابد. این اتصالات را می‌توان با کشت یونهای افزوده نظیر فسفر، بر و آرسنیک در انرژی پایین ایجاد کرد. رسیدن به این هدف مستلزم یافتن روش مناسبی برای اندازه‌گیری مطلق نمای فراوانی فسفر است. به‌طور سنتی نمای فراوانی فسفر با روشهای طیف نگاری جرمی یون ثانویه^۱ (SIMS) [۱]، طیف‌نگاری پس پراکنندگی راترفورد^۲ [۲] تحلیل واکنش هسته‌ای^۳

۱. Secondary Ion Mass Spectroscopy

۲. Rutherford Backscattering Spectroscopy

۳. Nuclear Reaction Analysis



شکل ۱. نمونه‌ای از طیف نگاری پس پراکندگی راترفورد (RBS) برای اندازه‌گیری فسفر و ایندیوم. ایندیوم به راحتی قابل اندازه‌گیری است ولی نمی‌توان فسفر را تفکیک کرد.

همچنین مسائل حفاظتی نیز مطرح است. این روش را نیز قبلاً^۱ برای به دست آوردن نمای فراوانی فسفر کشت شده به کار گرفته‌اند [۴،۳]. اما در هیچ مورد انرژی فسفر کشت شده به کوچکی آنچه در این مطالعه وجود داشت، نبوده و شرایط انرژی فسفر کشت شده کمتر باشد، چگالی آن در نزدیکی سطح بیشتر شده و به اتصالات مورد نیاز صنعت نزدیکتر خواهد بود. ولی کَش سطحی خودبه‌خودی افزایش می‌یابد. این مطالعه کار انجام شده در مورد بر [۱۱] را تکمیل می‌کند.

۲. آزمایش

برای انجام آزمایش دو نمونه آماده شد. در جدول ۱ این دو نمونه برحسب انرژی فسفر کشت شده و چگالی شدت^۱ آنها مرتب شده است. اولین نمونه را در آزمایشگاه شتاب‌دهنده تاندرون دانشگاه انتاریو غربی تهیه کرده‌ایم. برای تهیه این نمونه‌ها و کشت فسفر در سیلیسیوم، یون InP^- با انرژی $40 keV$ را وارد شبکه سیلیسیوم کردیم که سهم انرژی فسفر کشت شده $1 keV$ خواهد بود. چگالی شدت فسفر کشت شده را از $1 \times 10^{14} cm^{-2}$ تا $3 \times 10^{16} cm^{-2}$ انتخاب کرده‌ایم

خواهد شد. دوم اینکه به نتایج به دست آمده در مطالعه مقدار افزوده فراسطحی در لایه سطحی، به دلیل اثرهای مرزی بین لایه‌های متفاوت نظیر هوا و سطح اکسید سیلیسیوم، اعتماد کافی نیست. دلیل این مشکل در روش طیف نگاری جرمی یون ثانویه برای مرزها به طور کامل مشخص نشده است. سوم اینکه در بعضی شرایط نیاز به قدرت تفکیک جرمی زیاد است. با اینکه تلاشهای فراوانی برای به دست آوردن نمای فراوانی اتم کشت شده با استفاده از کمیت فاکتور حساسیت نسبی (RSF) انجام پذیرفته است، ولی در بهترین شرایط، نمای فراوانی به دست آمده با خطای ۳۰ تا ۴۰٪ را نتیجه داده است [۸]. در نتیجه نیاز است روش طیف نگاری جرمی یون ثانویه را با روش دیگری ترکیب کرد تا بتوان نمای فراوانی اتم به دست آمده به این روش را متعادل نموده و مقادیر مطلق را محاسبه کرد.

طیف نگاری پس پراکندگی راترفورد، یکی از روشهای به کار برده شده برای این منظور است. اما زمانی که اندازه‌گیری مقدار فسفر در سیلیسیوم مورد نظر است، این روش مناسب نیست. زیرا جرم اتمی فسفر نزدیک جرم ایزوتوپهای سیلیسیوم بوده و حساسیت طیف نگاری پس پراکندگی راترفورد بسیار کم می‌شود. در شکل ۱ نمونه‌ای از طیف نگاری پس پراکندگی راترفورد آمده است. با این که این آزمایش در شرایط کانال‌زنی انجام شد تا اثر سیلیسیوم شبکه در پیش زمینه طیف کاهش و حساسیت اندازه‌گیری مقدار فسفر افزایش یابد، هنوز تفکیک کمی اتم فسفر و ایزوتوپ سیلیسیوم ممکن نیست. مناسبترین روش برای اندازه‌گیری فسفر در شبکه سیلیسیوم، تحلیل فرایند هسته‌ای است [۹ و ۱۰]. برای این منظور فرایندهای هسته‌ای مناسب را باید بین فرایندهایی نظیر $^{28}Si(p, \alpha)^{24}P$ ، $^{31}P(t, p)^{33}P$ و $^{31}P(\alpha, p)^{28}S$ انتخاب کنیم. محاسبه و آزمایشهای متعددی برای امکان سنجی روشهای مختلف انجام شد روش تحلیل فرایند هسته‌ای بر مبنای واکنش $^{31}P(\alpha, p)^{28}S$ برای اندازه‌گیری مطلق فسفر مناسب تشخیص داده شد. البته در انتخاب روش مناسب عملی بودن آن و

۱. Fluence

جدول ۱. چگالی شدت دو مجموعه نمونه ها در انرژیهای کشت یون متفاوت. اعداد ستون اول مقدار یون کشت شده در سیلیسیوم بوده و اعداد درون جدول جزء کسری (مانتیس) چگالی شدت اندازه گیری شده که به جای جزء کسری ستون اول قرار می گیرد است.

In	۳۰ keV	۱۰ keV	۸ keV	۵ keV	۲ keV	۱ keV	مقدار فسفر کشت شده
×	×	×	×	۰/۸۰۴	×	×	$1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$
×	۰/۷۰۸	۰/۷۸	۰/۹۲	۰/۸۳۵	۰/۷۴۶	۰/۸۳۵	$1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$
×	×	×	۰/۲۴۶	۲/۳۵	×	×	$3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$
۴/۳	×	×	×	۰/۴۰۲	×	×	$5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$
۰/۸۵	×	×	۰/۸۰۱	۰/۷۸	×	×	$1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$
۲/۳	×	×	۲/۳۵	×	×	×	$3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$

گروه جرمی ۵۹،۳۱ و ۶۰ را در شکل ۲ آورده ایم. از آنجایی که جرم یونهای مزاحم هیدروژن دار بسیار نزدیک یون مولکولهای محتوی فسفر هستند. دستگاه طیف نگار باید قدرت تفکیک کافی برای جدا کردن آنها را داشته باشد. این شکل نشان می دهد که یون ^{31}P از یون ^{30}SiH در گروه جرمی ۳۱ و یون ^{31}SiP از یون $^{29}Si^{29}SiH$ در گروه جرمی ۶۰ قابل تفکیک هستند. یونهایی که تنها از ایزوتوپهای سیلیسیوم تشکیل می شوند مزاحم نخواهند بود و به سادگی می توان آنها را از یونهای فسفردار کسر کرد. به عنوان مثال، همان گونه که در شکل ۲ مشاهده می شود چون جرم یون ^{30}Si بسیار نزدیک یون ^{31}SiP بوده، قابل تفکیک نیستند. از آنجا که مقدار این یونها در ناحیه ای که فسفر کشت نشده مشخص و ثابت است، می توان سهم یون بدون فسفر را از یون فسفردار کسر کرد. قادر بودیم با تجزیه و تحلیل این طیفها نمای فسفر و دیگر یونهای موجود در نمونه ها را به دست آورد.

۲.۲. آزمایش تحلیل فرآیند هسته ای

نمای فسفر به دست آمده به روش طیف نگاری جرمی یون ثانویه، تنها مقدار نسبی فسفر در عمق از سطح را می دهد. همان گونه که قبلاً مطرح شد با محاسبات امکان سنجی، فرآیند $^{31}P(\alpha, p)^{30}S$ در خط طیفی $4A65MeV$ را برای نسبت دادن مقادیر کمی به نماهای به دست آمده انتخاب کردیم. در

نمونه دوم توسط دستگاه کشت یون دانشگاه ساری در انگلستان تهیه شده است. انرژی یون کشت شده $1keV$ تا $30keV$ و چگالی شدت آنها از $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ تا $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ بود. نکته مهم در این آزمایش ایزوتوپهای سیلیسیوم است که برای راحتی بحث، جرم و نسبت فراوانی آنها را در جدول ۲ آورده ایم.

۲.۱. آزمایش طیف نگاری جرمی یون ثانویه

نمای فسفر کشت شده در این نمونه ها را با استفاده از دستگاه طیف نگاری جرمی یون ثانویه $ION-TOF SIMS$ آزمایشگاههای علوم سطح دانشگاه انتاریوی غربی به دست آوردیم. در این طیف نگار، ابتدا با استفاده از یون سزیوم (Cs) با انرژی $1keV$ و با جریان $150nA$ اتمها و مولکولهای سطحی را از سطحی به مساحت $200 \times 200 \mu m^2$ یا $300 \times 300 \mu m^2$ جدا می کند. میانگین زمانی عمق حفره^۱ کنده شده از روی سطح نمونه به ترتیب برابر با $1.14nm/s$ و $0.67nm/s$ بود. سپس جریان این یون قطع شده و یونهای گالیوم (Ga) با انرژی $25keV$ به جریان $6pA$ برای مدت کوتاهی یون اتمها و مولکولهای کنده شده را به وجود می آورد. سطح مقطع این باریکه در حدود $58 \times 58 \mu m^2$ تا $80 \times 80 \mu m^2$ انتخاب شد.

مثالی از طیف جرمی به دست آمده در این آزمایش برای

جدول ۲. جرم مولکولی ایزوتوپهای سیلیسیوم و درصد آنها در طبیعت.

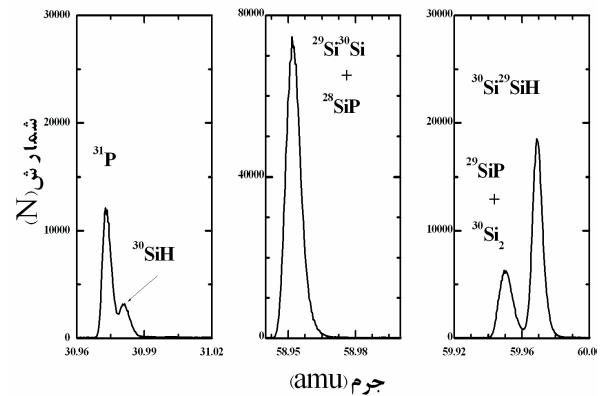
^{30}Si	^{29}Si	^{28}Si	وزن مولکولی (a.u.)
۲۹/۹۷۳۸	۲۸/۹۷۶۵	۲۷/۹۷۶۹	
%۳/۱۰	%۴/۶۷	%۹۲/۲۳	درصد ایزوتوپ

آزمایش و اینکه ممکن است در طیف هسته‌ای ایجاد شده اختلال ایجاد کنند، در جدول شماره (۳) آورده ایم. به دو دلیل خط طیفی خاصی که در بالا به آن اشاره شد، انتخاب گردید. اول اینکه محصول پروتون^۲ در این خط طیفی زیاد است. دلیل دوم اینکه خطوط طیفی دیگر تقریباً دور هستند و ایجاد تداخل نخواهند کرد. در شکل ۵ نمونه‌ای از طیف فرایند $^{31}\text{P}(\alpha, p)^{30}\text{Si}$ را به صورت محصول نسبی پروتون بر حسب انرژی ذرات آلفای فرودی نشان داده‌ایم. لازم به ذکر است که خطوط طیفی به دست آمده به اندازه 30keV با نتایج مشابه از موری و همکارانش [۱۰] اختلاف دارد.

۳. نتایج و بحث

نتایج به دست آمده در آزمایش طیف نگاری جرمی یون ثانویه را با آزمایش تجزیه فرایند هسته‌ای ترکیب کردیم تا نمای فسفر در نمونه‌های کشت شده را به دست آوریم. آزمایش فرایند هسته‌ای را در انرژیهای متفاوت ذرات آلفا در اطراف خط طیفی مورد نظر تکرار کردیم تا حداکثر محصول پروتون به دست آید. حساسیت آزمایش به حدی بود که خطای چند keV در انرژی ذرات اولیه آلفا به شدت در نتایج اثر می‌گذاشت. لذا اندازه‌گیری طیف فرایند هسته‌ای را برای هر نمونه و در هر روز تکرار کردیم.

نمونه استاندارد برای اطمینان از نتایج به دست آمده در روش تجزیه فرایند هسته‌ای نیز آماده کردیم. در این نمونه لایه‌ای به ضخامت 20nm از جنس $\text{In}_{0.48}\text{Ga}_{0.52}\text{P}$ روی شبکه



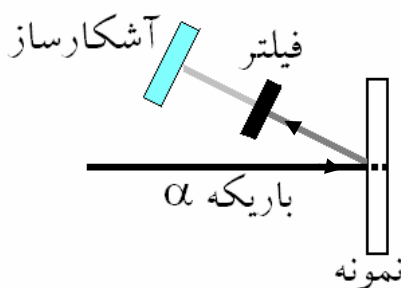
شکل ۲. نمونه طیف جرمی استخراج شده از دستگاه SIMS، برای گروه جرمی ۵۹،۳۱ و ۶۰.

شکل ۳ نموداری از این آزمایش نشان داده شده است. باریکه آلفای ایجاد شده توسط تندترون دانشگاه انتاریوی غربی به نمونه برخورد می‌کند. زاویه برخورد با سطح نمونه نزدیک به قائم ولی به گونه‌ای انتخاب شده که کانال زنی اتفاق نیفتد. ذرات پروتون و آلفا در زاویه‌های گوناگون و از جمله 150° پراکنده می‌شوند. آشکار ساز نمی‌تواند آنها را از هم تفکیک نماید، لذا فیلتری از جنس مایلار و به ضخامت $50\ \mu\text{m}$ این کار را انجام می‌دهد. فیلتر ذرات آلفا را متوقف کرده ولی به ذرات پروتون امکان عبور از خود را می‌دهد. ذرات پروتون پس از عبور از فیلتر توسط آشکار ساز سد لایه سیلیسیوم^۱ به سطح مقطع 450mm^2 آشکار می‌شوند. این آشکار ساز انرژی ذرات را نیز معین می‌کند. نمونه‌ای از طیف انرژی یونهای آشکار شده در این آزمایش و فرایند را در شکل ۴ نشان داده‌ایم. در این آزمایش مقدار کل فسفر کشت شده در نمونه را با در نظر گرفتن انرژی ذرات آلفا در عمق‌های مختلف به دست آوردیم. برای این منظور از نمودارهای نظیر آنچه در شکل ۳ آمده نیز استفاده شده است.

در برخورد آلفا با نمونه، فرایند های متعددی اتفاق می‌افتند. خصوصیات این فرایندها را به دلیل اهمیت آنها در این

جدول ۳. فرآیندهای مهم در آزمایش تحلیل فرآیند هسته‌ای و انرژی پروتونهای ثانویه. با شستن نمونه‌ها ممکن است فلور، روی نمونه بنشینند. انرژی پروتون ثانویه برای ذرات آلفای فرودی به انرژی $0keV$ محاسبه شده است.

فرایند	Q_{α} (MeV)	E_{po} (MeV)	E_{p1} (MeV)
$^{31}P(\alpha,p)^{34}S$	۰/۶۲۷۶	۴/۴	۲/۴۳
$^{29}Si(\alpha,p)^{31}P$	منفی	۲/۱۴	عدم نیاز
$^{29}Si(\alpha,p)^{30}P$	منفی	۱/۷	عدم نیاز
$^{19}F(\alpha,p)^{22}Na$	۱/۶۷۴۷	۴/۸۷۸	۳/۷۵۳
$^{31}P(p,\alpha)^{28}Si$	۱/۹۱	عدم نیاز	عدم نیاز

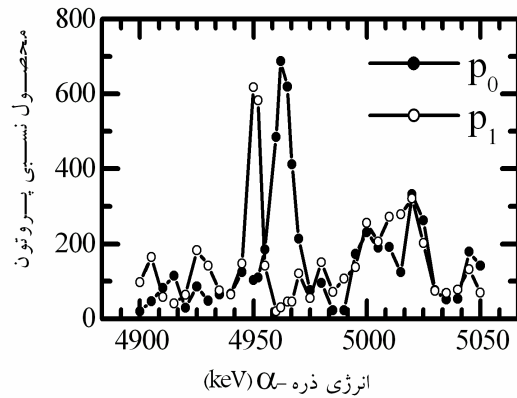


شکل ۳. نموداری از آزمایش تحلیل فرآیند هسته‌ای.

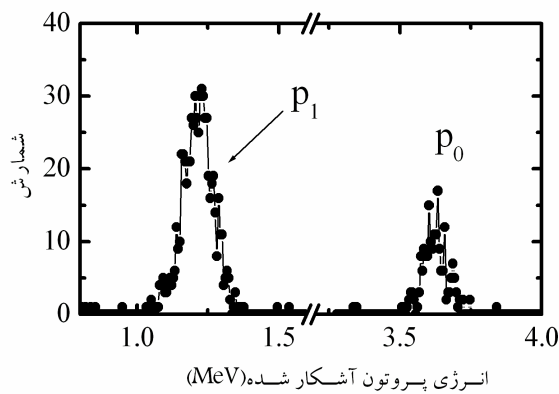
می‌دهد که مقدار فسفر در نزدیکی سطوح کم است. این اثر قبلاً مشاهده شده بود [۱۲]. برای کم کردن این اثر، نمای محاسبه شده نسبت به تغییرات یون ^{29}Si تصحیح شده که تکرار این نتایج خطایی در حدود ۱۵٪ را نشان می‌دهد. پس از انجام این تصحیح در نمای فسفر به دست آمده، با انجام آزمایش هسته‌ای مقادیر مطلق را به محور عمودی نسبت داده‌ایم. برای این منظور، محور عمودی را در عددی ضرب کرده‌ایم تا انتگرال زیر منحنی نمای به دست آمده برابر با مقدار فسفر اندازه‌گیری شده در آزمایش تجزیه هسته‌ای شود. در این شکل مقادیر محاسبه شده به روش نظری نیز رسم شده که به نتایج تجربی نزدیک نیست. روش نظری که نتایج این آزمایش را با آن مقایسه نمودیم به صورت نرم افزاری به نام TRIM قابل دسترسی است [۱۲] (به عنوان نمونه به مرجع [۱۳] رجوع شود). در شکل ۷، نمای فسفر به دست آمده

GaAs رشد داده شد. با استفاده از روش طیف نگاری پس پراکندگی راترفورد مقدار فسفر و ایندیوم را با دقت زیاد به دست آوردیم و پس از مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده فسفر به روش فرآیند هسته‌ای خطای آزمایش را به حداقل رساندیم. معادل انرژی عمق فسفر در نمونه استاندارد و نمونه‌های تهیه شده کمتر از $3keV$ بود که در مقایسه با پهنای خط طیفی فرآیند هسته‌ای، $10keV$ ، به اندازه کافی کوچک است. این مطلب اجازه می‌دهد که خط طیفی فرآیند هسته‌ای را بتوان به خوبی و برای این منظور به کار گرفت.

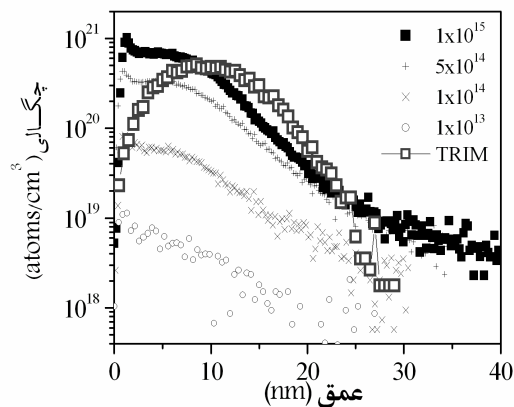
شکل ۶، نمای فسفر به دست آمده از این آزمایش را برای برخی نمونه‌ها که در آنها فسفر با انرژی $5keV$ کشت شده نشان می‌دهد. این نما را به روش طیف نگاری جرمی یون ثانویه به دست آورده‌ایم. نمای فسفر به دست آمده نشان



شکل ۴. نمونه‌ای از طیف جذبی ذرات آلفا توسط فسفر. محور افقی انرژی ذرات آلفا و محور قائم محصول پروتون است. دو دسته پروتون از هم تفکیک شده که از دو سطح انرژی متفاوت هسته فسفر گسیل یافته است. انرژی این دو دسته پروتون متفاوتند.



شکل ۵. طیف انرژی پروتون گسیل یافته در برخورد ذرات آلفا با نمونه در این طیف دو دسته پروتون ثانویه کاملاً قابل تفکیک هستند.



شکل ۶. نمای فسفر به دست آمده از این آزمایش برای نمونه‌هایی از فسفر کشت شده در انرژی ۵ keV، در این شکل مقایسه‌ای با محاسبات نظری TRIM انجام شده است.

و مقادیر اندازه گیری شده حدوداً یکی است، به عقیده ما اثری از گنش یون مشاهده نمی شود. با اینکه خطای آزمایش در حدود ۱۵٪ محاسبه شده است، هنوز باید فعالیت زیادی به منظور کم کردن خطا انجام شود. قصد داریم جهت کم شدن خطا امکان انجام آزمایش را به روشهای زیر ایجاد کنیم.

۱. آزمایش تجزیه فرایند هسته‌ای را به دلیل بزرگی سطح آشکارساز در زاویه 150° انجام دادیم. سعی خواهیم کرد که امکان انجام آزمایش را در زاویه 180° ایجاد نماییم. در خط طیفی مورد نظر و بعضی خطوط طیفی دیگر، سطح مقطع پراکندگی واکنش هسته‌ای $S P^{34} P(\alpha, p) P^{31}$ در زاویه 180° به شدت افزایش می یابد. این امر نیاز به تغییر بخش مهمی از آزمایش است. این تغییر محصول پروتون را به مقدار زیاد افزایش می دهد.

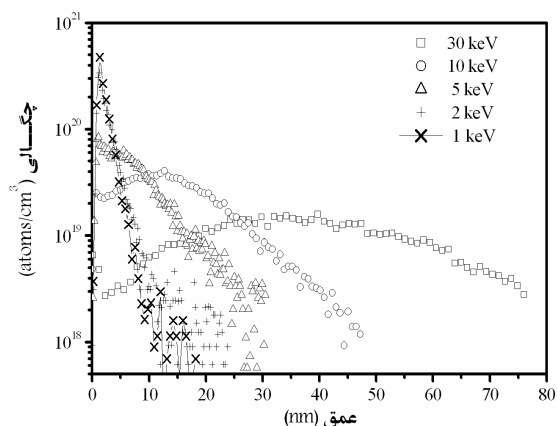
۲. نمونه استاندارد را باید به صورت آمورف تهیه نماییم تا اثر کانال زنی را کم کنیم.

قدردانی

یکی از مولفین (م-ب) علاقه دارد از دانشگاه شهید باهنر کرمان که با پذیرش درخواست استفاده از مرخصی ذخیره شده وی امکان انجام این مطالعات را ایجاد نموده است و از دانشگاه انتاریوی غربی که با اهداء پست استاد مدعو امکان تحقیق در آن دانشگاه را ایجاد نمودند تشکر نماید.

۴. نتیجه گیری

در این آزمایش روشهای طیف نگاری جرم یون ثانویه و تجزیه فرایند هسته‌ای $S P^{34} P(\alpha, p) P^{31}$ در خط طیفی $4/965 MeV$ را ترکیب کردیم تا بتوانیم نمای مطلق فسفر کشت شده در شبکه سیلیسیوم را اندازه گیری کنیم. هدف اصلی این مطالعه، بررسی کشت یونی در شرایط فراسطحی و تعیین اینکه آیا گنش یون وجود خواهد داشت بود. از آنجا که درصد اختلاف مقادیر اولیه



شکل ۷. نمای فسفر به دست آمده از این آزمایش برای بعضی نمونه‌ها با فسفر کشت شده به چگالی شدت $1 \times 10^{14} cm^{-2}$ و در انرژیهای $1 keV$ تا $30 keV$.

برای نمونه هایی که شدت چگالی فسفر کشت شده در آن برابر با $1 \times 10^{14} cm^{-2}$ بود رسم شده است. در جدول (۱) مقدار اولیه یون کشت شده فسفر (ستون اول) در نمونه‌ها را با نتایج به دست آمده (ستونهای دوم و بعد) مقایسه کرده‌ایم.

مراجع

1. R Loesing, G M Guryanov, J L Hunter, and D P Griffis; *J. Vac. Sci. Technol.* **B18** (2000) 509.
2. L Persson, N G Lovestam, U Sodervall, U Watjen; *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.* **B161-163** (2000) 482.
3. L C McIntyre Jr., J A Leavitt, B. Dezfouly-Arjomandy and J Oder; *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.* **B35** (1985) 446.
4. H Kobayashi, W M Gibson; *Nucl. Instrum. Meth.*

B152 (1999) 365.

5. D S Walsh, B L Doyle; *Nucl. Instr. Meth.* **B161-163** (2000) 629.

6. D C Ingram, J A Baker, D A Walsh, E Strathman. *Nucl. Instrum. Meth.* **B21** 460 (1987).

7. J G M van Berkum, E.J.H. Collant, K Weemers, D J. Gravesteijn, K Iltgen, A Benninghoven, E J Niehuis; *Vac. Sci. Technol.* **B16** 298 (1998).

- Lett.* **74** 2453 (1999).
12. <http://www.srim.org>.
13. M J Berger et al. "*Stopping Power and Ranges of Proton and Alpha Particles*", ICRU-49, International Commission on Radiation Units, Bethesda, MD, USA (1993).
8. R G Wilson, S W Novak, *J. Appl. Phys.* **69** 466 (1991)
9. W A Schier, B K Barnes, G P Couchell, J J Egan, P.Harihar, S C Mathir, A. Mittler, E. Sheldon; *Nucl. Phys.* **A254** 80 (1975).
10. W R McMurray, D M Holz, I J van Heerden; *Z. Physik.* **247** 453 (1971).
11. Aditya Agarwal, H.J.Gossmann, D.J. Eaglesham, S.B. Herner, A T Fiory, T E Haynes; *Appl. Phys.*