

استفاده از دوترون در واکنشهای هسته‌ای برای آنالیز کمی مواد روی سطوح

حسین آفریده
گروه سیکلوترون
سازمان انرژی اتمی ایران
تهران، جمهوری اسلامی ایران

چکیده

خلاصه‌ای از قابلیت‌های آنالیز به روش هسته‌ای در این مقاله ارائه شده و بر اندازه‌گیری کمی عناصر سبک با استفاده از واکنشهای (d,p) و (d,α) تاکید شده است. همچنین دستگاههای اندازه‌گیری در رابطه با شتابدهنده با انرژی ۳ میلیون ولت (MeV) نیز تشریح می‌گردد. در پایان مجموعه‌ای از منحنی‌های استاندارد واکنش (d,p) برای عناصر با عدد اتمی (Z) ۳ تا ۱۷ در اثر دوترون با انرژی ۲ میلیون الکترون ولت (MeV) همراه با مثالهای مفیدی از واکنش (d,α) ارائه گردیده است.

مقدمه

در سالهای اخیر آنالیز سریع مواد برای اندازه‌گیری عناصر سبک با بکارگیری واکنشهای هسته‌ای نظیر (d,p) و (d,α) و $(^3\text{He},p)$ بصورت یک روش شناخته شده و متداول در آمده است (۱-۳). این روش، به شتابدهنده کوچک ذرات با انرژی کمتر از چندین میلیون ولت نیاز دارد تا بتواند یونهای سبک را بر روی سطوح نمونه تابش دهد. در اثر برخورد ذرات باردار با سطوح نمونه بعضی از آنها ممکن است که واکنشهای هسته‌ای انجام دهند. اندازه‌گیری انرژی ذرات حاصله بعد از واکنش همراه با آنالیز رابطه توزیع انرژی - بازدهی (yield)، آشکارسازی عناصر روی سطوح و همچنین توزیع عمقی آنها را میسر می‌سازد. بویژه بر روی لایه چند میکرومتری اول سطوح با تهیه غلظت مقاطع مختلف با حد تفکیک ۱۰۰۰

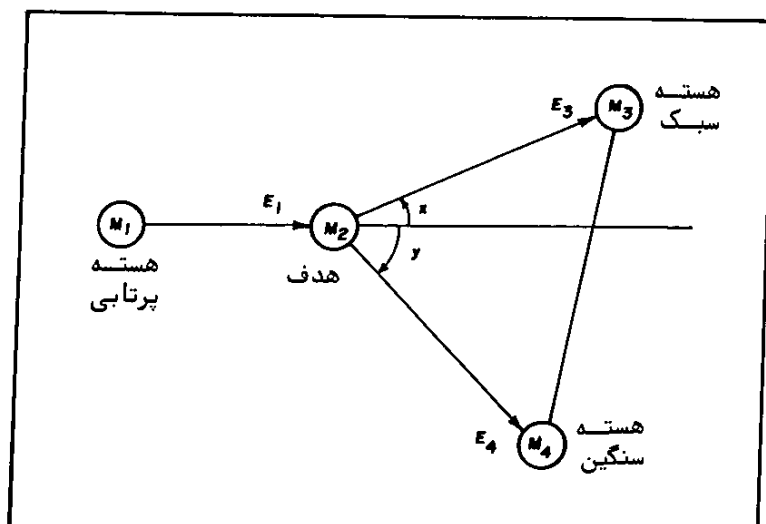
آنگستر می‌توان دقت اندازه‌گیری بخوبی چند قسمت در میلیون (ppm) داشت. اگرچه این بحث محدود به واکنشهای هسته‌ای در اثر برخورد دوترون می‌شود، اما بطور کلی این روش می‌تواند بخوبی در مورد بقیه واکنشها هم تعمیم داده شود. هدف اصلی کاربر روی واکنشهای (d,α) و (d,p) بدلیل کاربرد عمومی آنها در کارهای روزمره آنالیز می‌باشد. واکنشهای (d,p) روش بینهایت خوبی را برای آنالیز فراهم می‌نمایند زیرا واکنشهای حاصل برای تمامی ایزوتوپهای بوجود آمده برای عناصر با عدد اتمی ۴ تا حدود ۱۷ دارای مقدار Q (Q-value) مثبت (انرژی‌رها شده در واکنش هسته‌ای) حدود چند میلیون الکترون - ولت است (۴). بنابراین این آنالیز چند عنصر به صورت همزمان امکان پذیر می‌شود. برای عناصر با $Z > 17$ اثر سد پتانسیل کولمبی حساسیت روش را

۱- اساس کار

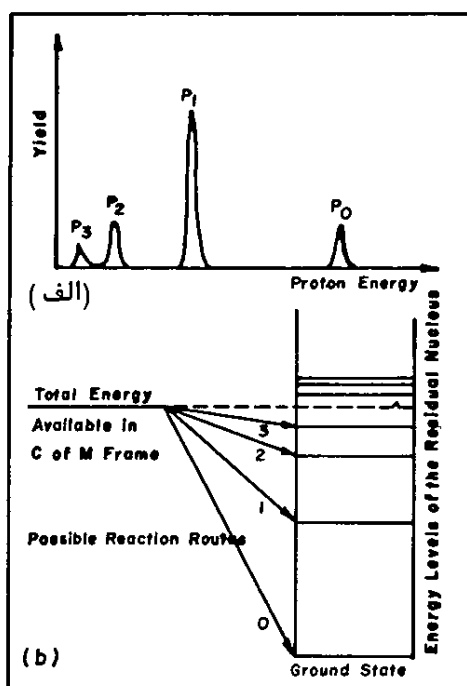
حالت کلی این روش آنالیز بوسیله واکنش (d,p) قابل بیان می‌باشد . اما بهرحال چندین نکته مهم در کاربرد واکنشهای (d,α) وجود دارد . یک هدف نازک متشکل از یک عنصر واحد ساده‌ترین مثالی است که می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد . یک ذره دوترون با انرژی E_1 در حدود چند صد کیلو الکترون ولت (keV) تا چندین میلیون الکترون ولت (MeV) ، که حد پائین با توجه به سد پتانسیل کولمبی انتخاب می‌شود با هسته‌های نمونه هدف برخورد می‌کند . بعضی از این دوترونها با اتمهای هدف واکنشهای (d,p) را مطابق شکل ۱ انجام می‌دهند . انرژی E_3 پروتونهایی که در زاویه مشخص χ نسبت به راستای مسیر ذرات اندازه‌گیری می‌شود به آسانی از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد (۵) .

تا زیر حد قابل قبول کاهش داده اما بهرحال روش تکمیلی پراکندگی برگشتی راتر فورد (RBS) (۷-۵) ممکن است مورد استفاده قرار گیرد تا اطلاعات زیادی در مورد عناصر سنگین بدست دهد . اما مقدار Q در واکنشهای (d,α) تا حدود ۲۵ میلیون الکترون ولت بوده و با انتخاب شرائط مناسب می‌تواند در اندازه‌گیری‌های بخصوصی نسبت به واکنشهای (d,p) استفاده شود .

متاسفانه بسیاری از عناصر دارای سطوح مقطع کمی برای واکنش (d,α) را دارند و اگر این را با مقدار شمارش کم (به بخش ۱ رجوع شود) حاصل از واکنش ترکیب گردد نتیجه حاصل منجر به کاهش حساسیت خواهد گردید . اما بهرحال دقت اندازه گیری عمق نمونه با این واکنش معمولاً " بسیار بهتر از واکنش (d,p) می‌باشد . بنابراین استفاده همزمان یا متناوب از هر دو واکنش بسیار مفید خواهد بود .



شکل ۱- نمودار برخورد دو هسته در واکنش هسته‌ای



شکل ۲- الف: طیف انرژی ذرات ساطع شده از هدف های نازک. ب: ترازهای تحریک هسته بوجود آمده.

چنین شرایط انرژی دوترونها در موقع واکنش به علت عمل یونسازی در طول مسیر کاهش پیدا کرده و چنین واکنشی منجر به ایجاد پروتون با انرژی کمتر نسبت به حالت اول خواهد شد. بدیهی است که چنین پروتونی هنگام خروج از هدف مجدداً "مقداری انرژی نیز از طریق یونسازی از دست می دهد. بنابراین این انرژی پروتون ثبت شده کمتر از E_p خواهد بود و بستگی به عمقی خواهد داشت که در آن واکنش صورت گرفته است. برای بسیاری از ذرات، طیف انرژیهای ذرات پروتون در آشکارساز ممکن است به صورت شکل ۳- ب نشان داده شود. شکل اصلی طیف انرژی معرف توزیع عمقی اتمهای هدف و تغییرات سطح مقطع واکنش برحسب انرژی می باشد. در واکنش (d,p) قرار دادن صفحه نازک به

$$E_3 = E_T A \cos X + (B/A - \sin^2 X)^{1/2}$$

$$A = \frac{M_1 M_3 (E_1 / E_T)}{(M_1 + M_2) (M_3 + M_4)}$$

$$B = \frac{M_2 M_4}{(M_1 + M_2) (M_3 + M_4)} \left(1 + \frac{M_1 Q}{M_2 E_T}\right)$$

$$Q = (M_1 + M_2 - M_3 - M_4) C^2$$

$$E_T = E_1 + Q$$

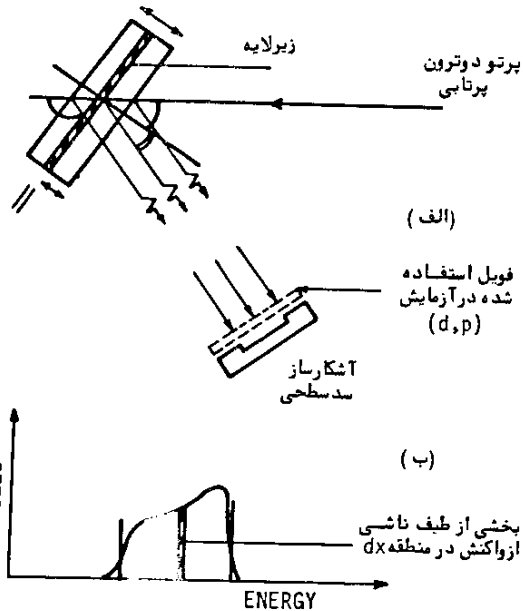
در این رابطه M_1 و M_2 جرمهای دوترون پرتابی و هسته هدف، M_3 و M_4 جرمهای پروتون خروجی و هسته دختر حاصل و Q مقدار انرژی رها شده در واکنش می باشند.

برای بسیاری از ذرات پرتابی طیف انرژی های پروتون ضبط شده در آشکارساز ممکن است به صورت شکل ۲- الف ظاهر شود و هر واکنش بخصوص از ذرات پرتابی و اتمهای هدف منجر به یک سری قله (peak) منطبق با ترازهای تحریک مجزای هسته باقیمانده می گردد (شکل ۲- ب). سطح مقطع موثر برای هر واکنش با دیگر واکنشها فرق می کند. از اینرو قلهها ارتفاعهای مختلف خواهند داشت. اما بهرحال، برای یک آزمایش تجربی معین نسبت ارتفاع قلههای منطبق به یک عنصر مشخص مقدار ثابتی می باشد. این اطلاعات همراه با انرژی قلهها در مشخص کردن عناصر بکار می رود.

مسئله هدفهای ضخیم بسیار پیچیده می باشد. نحوه کلی قرار گرفتن یک هدف در معرض تابش ذرات در شکل ۳- الف نشان داده است. اتمهای موجود در روی سطح هدف تحت تحریک قرار گرفته تا منجر به تابش پروتونهای با انرژی E_p در حالت هدف نازک نمایند. اما بهرحال بعضی از دوترونها با اتمهای زیرین سطح نیز واکنش انجام داده که در

حسین آفریده . استفاده از دوترون در واکنشهای هسته‌ای .

استفاده قرار گیرد تا بتواند از تجمع پالس جلو - گیری نماید . عوامل درجه دوم دیگری مانند محدودیت حد تفکیک انرژی آشکارساز نیز در اندازه‌گیری نوع طیف انرژی موثر خواهد بود که بعضی از این عوامل در قسمت ۲ مورد بحث قرار خواهند گرفت . در پایان باید به این نکته توجه شود که اگر هدف شامل انواع عناصر سبک در سطح باشد ، هر عنصری منجر به توزیع انرژی پروتون مربوط به خود خواهد گردید . که توزیع انرژی کلی پروتونها ممکن است بسیار پیچیده شود (شکل ۴) . در چنین شرائطی انتخاب صحیح انرژی دوترونهای پرتابی و موقعیت هندسی آشکارساز عوامل بسیار مهمی در تفکیک کردن منحنی پروتونهای بوجود آمده از بعضی عناصر سبک می‌باشند .



شکل ۳- الف : نحوه قرار گرفتن هدف در معرض پرتو ذرات ، ب : یک طیف آیدئال .

عنوان جذب‌کننده در جلو آشکارساز بسیار معمول می‌باشد . چنین صفحه‌ای باید به اندازه‌ای ضخیم باشد که فقط بتواند دوترونهایی را که بطریق الاستیک از هدف پراکنده شده‌اند متوقف نماید و در عین حال آنقدر نازک باشد تا پروتونهای حاصل از واکنش از آن عبور نمایند . گذاشتن صفحه منجر به این می‌شود که تجمع پالس (pile-up) بطور موثر کاهش پیدا کرده و در نتیجه حساسیت روش افزایش یابد . بهر حال این عمل همانطور که در قسمت ۲ ملاحظه می‌گردد باعث کاهش سطح زیر پیک در طیف به خاطر افزایش تفرق انرژی شود .

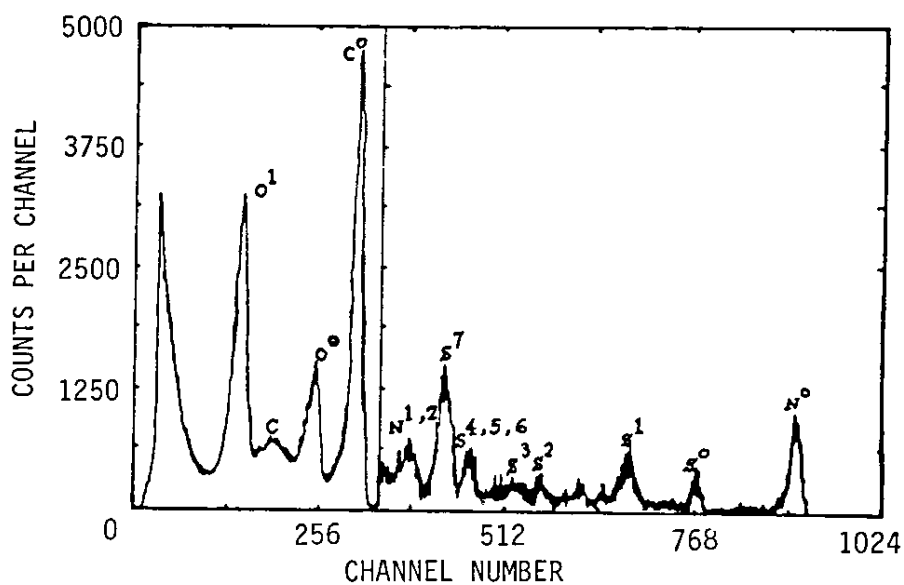
برای اندازه‌گیری (d, α) صفحه مذکور استفاده نمی‌شود و یک جریان بسیار کم در حدود 10 nA همراه با سیستمهای الکترونیکی سریع باید مورد

۲- روش بررسی منحنی‌ها

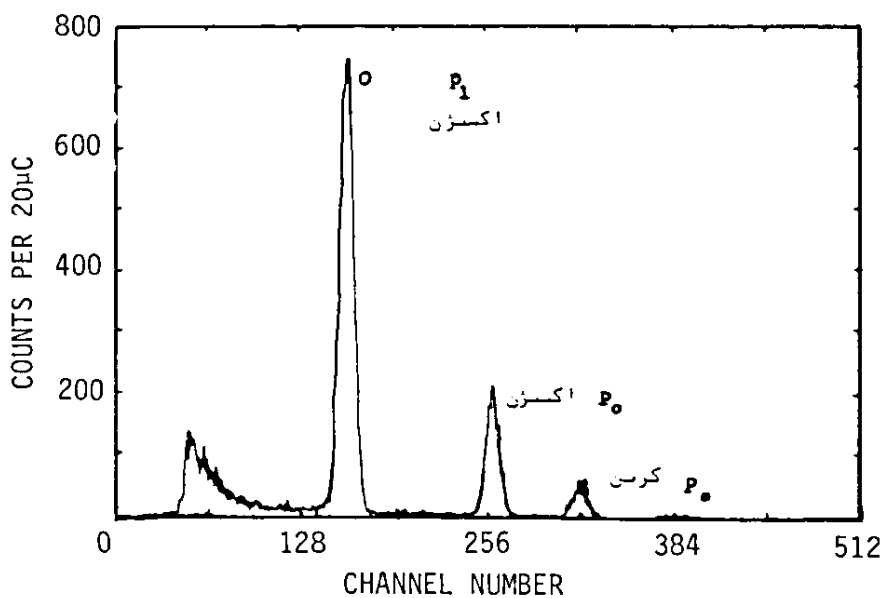
منحنی‌های واکنش‌های هسته‌ای بطور عمومی به دو گروه تقسیم می‌شوند : گروه اول از منحنی‌های مربوط به هدفهای نازک یا لایه نازک سطح تشکیل می‌گردد که شامل یک سری قله‌های انرژی گوسی شکل می‌باشند . چنین منحنی‌هایی به آسانی میزان تولید تعداد کل اتمهای هر عنصر خاص موجود در هدف را نشان می‌دهند اما در مورد نحوه توزیع آنها در داخل لایه نازک را هیچ اطلاعاتی بدست نمی‌دهند .

گروه دوم حالت خیلی پیچیده مربوط به هدفهای ضخیم می‌باشد که آنالیز چنین منحنی‌هایی نیاز به منحنی استاندارد و یا شبیه‌سازی (simulation) کامپیوتری دارد .

یک منحنی (d, p) بوجود آمده از یک لایه ۷۰۰ آنگسترمی Ta_2O_5 بر روی سطح تانتالیم در شکل ۵ نشان داده شده است . قبل از آنالیز ابتدا باید قله‌های مختلف منحنی با توجه به انرژی و ارتفاع



شکل ۴- طیف انرژی پروتون ناشی از عناصر مختلف در زاویه 15° در اثر بمباران دوترون با انرژی ۲ MeV در لایه رنگزده بر روی استیل.



شکل ۵- طیف انرژی پروتون اندازه گرفته شده در زاویه 135° در اثر بمباران دوترونهای با انرژی ۲ MeV بر روی لایه 700 \AA Ta_2O_5 روی سطح تانتالیم.

حسین آفریده . استفاده از دوترون در واکنشهای هسته‌ای .

رسم می‌شود . اگر کاهش انرژی ذرات ساطع شده در اثر عبور از لایه مرده آشکارساز در کالیبره کردن منظور نشود باعث غیرخطی شدن منحنی کالیبره کردن در انرژیهای پائین می‌گردد .

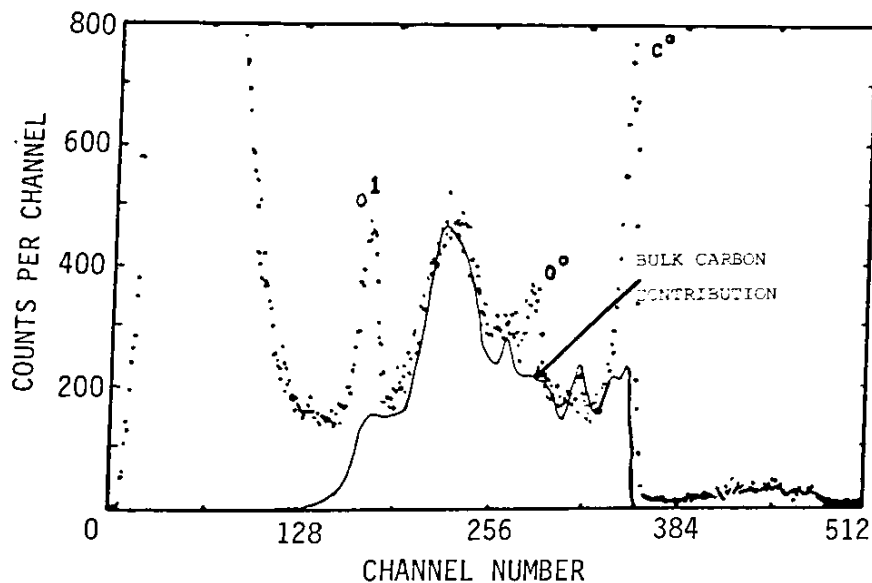
همچنانکه قبلاً " اشاره گردید آنالیز منحنی هدفهای ضخیم بسیار پیچیده‌تر از هدف نازک می‌باشد اگرچه شناسایی پیکها به همان صورت انجام می‌گیرد . یک منحنی (d,p) مربوط به یک نمونه استاندارد حاوی 470 ppm کربن در استیل در شکل ۶ نشان داده شده است . این حالت خاص بوضوح نشان دهنده رابطه بین میزان تولید (yield) و تغییرات سطح مقطع با انرژی دوترون تابشی می‌باشد (شکل ۷) (۸) . قله‌های تیز ناشی از وجود واکنش مربوط به کربن و اکسیژن در لایه‌های استیل می‌باشد .

آنها شناسائی شود . تعداد کل شمارش Y در یک قله ممکن است بوسیله رابطه زیر به تعداد اتمهای آن عنصر در واحد سطح H تبدیل گردد .

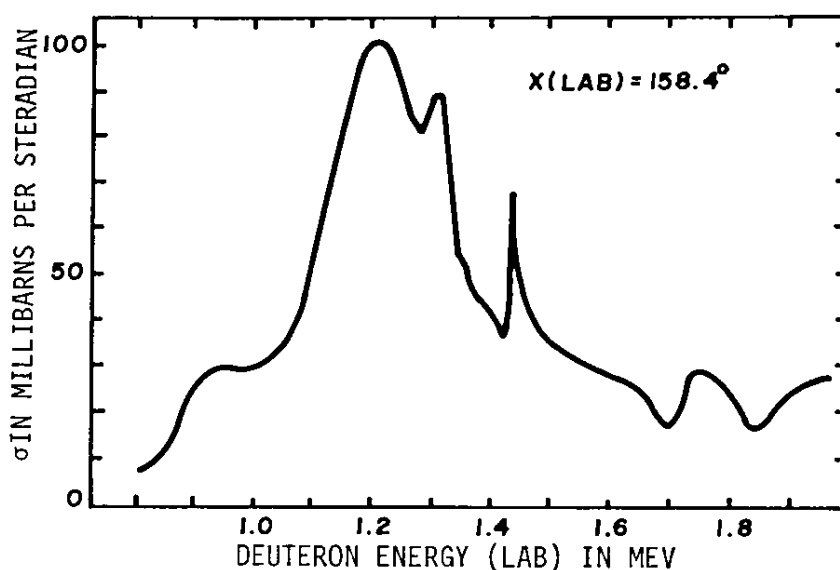
$$Y = C \frac{d\sigma}{d\Omega} dA \frac{H}{\cos\theta}$$

که در این رابطه $d\sigma/d\Omega$ سطح مقطع دیفرانسیلی برای واکنش با توجه به انرژی دوترون برخوردی و زاویه θ می‌باشد . C تعداد کلی ذرات برخوردی (دوترونها) ، θ زاویه پرتوهای دوترون پرتابی (طبق شکل ۳-الف) و dA زاویه هندسی آشکارساز می‌باشند .

برای شناسائی پیکهای ناشناخته معمولاً " منحنی کالیبره کردن انرژی ذرات ساطع شده (پروتون یا آلفا) بر حسب شماره کانال قله با توجه به کاربرد معادلات برخوردی که در قسمت ۱ بحث گردید ،



شکل ۶- طیف انرژی پروتونهای اندازه گرفته شده در زاویه 150° در اثر بمباران دوترونهای با انرژی 2 MeV بر روی نمونه استاندارد استیل که شامل 470 ppm کربن است . منحنی خط پر نشان دهنده کربن محاسبه شده در واکنش $^{13}\text{C}(d,p)^{12}\text{C}$ می‌باشد .



شکل ۷- سطح مقطع جزئی برای واکنش $^{12}\text{C}(d,p)^{13}\text{C}$

در این قسمت از محاسبات اثر پهن شدن (broadening) انرژی در اثر از دست دادن انرژی ذره در هدف و صفحه آشکارساز که خود منجر به تغییراتی در میزان تولید می‌شود در نظر گرفته نشده است. معادله دقیق اما بسیار پیچیده بوسیله مرجع شماره ۱۳ داده شده است.

راه دیگر برای آنالیز استفاده از شبیه سازی (simulation) کامپیوتری است (۱۴-۱۶). که در آن از سطح مقطعهای اندازه گیری شده برای واکنشهای مختلف استفاده می‌شود (۱۷). این برنامه‌ها معمولاً " بصورت معکوس کار می‌کنند به این صورت که ابتدا برای هدفی که دارای ساختمان مشخص است منحنی تئوری را تولید نموده و این منحنی با منحنی تجربی بدست آمده در حین آزمایش برای همان هدف مقایسه گردیده و در منحنی تئوری آنقدر تغییرات داده می‌شود تا به منحنی تجربی منطبق گردد. قابل ذکر است که در بیشتر آزمایشات تجربی ساختمان و اجزاء هدف تا حدودی مشخص

روش کلی برای معین کردن مقاطع مختلف عمقی از این نوع منحنی این است که ابتدا یک مقیاس عمقی چه از نظر جداول قدرت ایستادگی (stopping power) (۹ و ۱۰) و یا از نظر پارامترهای قدرت ایستادگی (۱۱، ۱۲) تولید کنیم. البته باید اثر صفحه گذاشته شده در جلو آشکارساز را در نظر گرفت که باعث جابجائی منحنی انرژی و پهن شدن (broadening) آن می‌شود. میزان تولیدها در مقایسه با منحنیهای استاندارد با استفاده از رابطه تقریبی زیر بدست می‌آید که می‌تواند در قسمتهای ۴ و ۵ ملاحظه گردد.

$$\gamma \alpha N \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{E_i} E_c \left(\frac{dE}{dx} \right)_{E_i}^{-1}$$

که N دانسیته اتمهای هدف، $(d\sigma/d\Omega)_{E_i}$ سطح مقطع دیفرانسیلی در انرژی برخوردی E_i و زاویه X ، E_c عرض کانال مربوط به ارتفاع پالس در مولتی چانل آنالیزر، $(dE/dx)_{E_i}$ میزان از دست دادن انرژی ذره برخوردی در نقطه برخورد می‌باشد.

تغییرات طول مسیر می‌گردد . بیشتر این پدیده‌ها بوسیله حذف صفحه کار گذاشته شده در جلو آشکار- ساز در واکنش (d, p) و یا با انتخاب کلیماتور مناسب باریک ممکن است به حداقل ممکن برسد . این کارها به‌رحال باعث افزایش زمان اندازه‌گیری آزمایش و در نتیجه کاهش حساسیت می‌گردد .

۳- جزئیات آزمایش

کلیه آزمایش‌های انجام شده در این گزارش در شتابدهنده دینامیترتون ۳ میلیون ولت واقع در دانشگاه بیرمنگام انجام گردیده است . دینامیترتون شتابدهنده بسیار خوبی برای آنالیز به روش واکنشهای هسته‌ای می‌باشد زیرا تغییرات ولتاژ بسیار کم حدود ۱ کیلو ولت در ۲ میلیون ولت را دارد (۲۲) . نحوه خطوط انتقال پرتو استفاده شده برای آنالیز نمونه‌ها با این روشها در شکل ۸ نشان داده شده است (۲۳) . آزمایش‌های جاری معمولاً " در یک اتاقک کوچک خلاء (chamber) بدلیل سریع و بهتر شدن خلاء انجام می‌پذیرد که در شکل ۹ نشان داده شده است (مگر مواردی که اندازه نمونه مانع از استفاده آن شود) . این محفظه دارای خروجی‌هایی در زوایای 90° و 135° می‌باشد . آشکارسازهای سد سطحی در زوایای مختلف می‌توانند در داخل محفظه قرار گرفته و در حین آزمایش امکان استفاده بیش از یک آشکارساز وجود دارد . مثلاً " در آزمایش‌های همزمان (d, p) و (d, α) احتیاج به هر دو منحنی ناشی از واکنشهای فوق می‌باشد . محفظه طوری ساخته شده است که در مرکز آن ۱۲ هدف مختلف توسط یک موتور گام به گام (stepping motor) به ترتیب در مقابل دسته پرتو قرار می‌گیرند . در مواردی که آنالیز حساس به مواد آلی باشد نگهدارنده آشکارساز گاما در محفظه می‌تواند با محفظه تله سرد (cold trap) ازت مایع جابجا

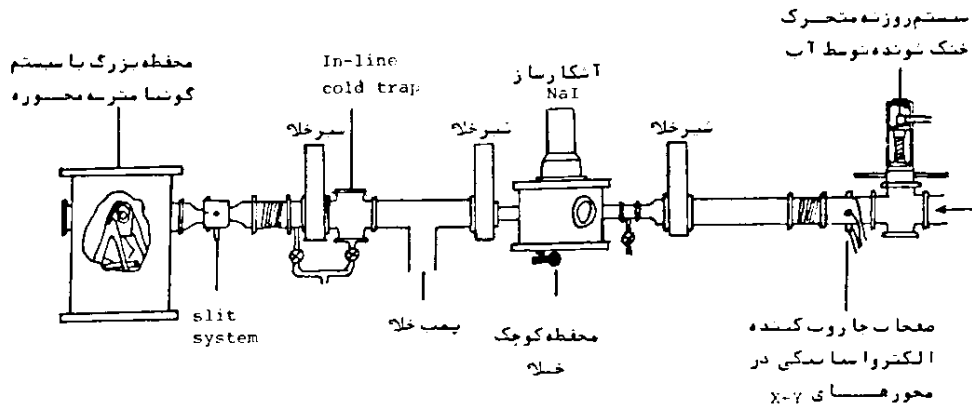
است و بنابراین اولین شبیه‌سازی تقریبی به آسانی امکان‌پذیر می‌باشد .

همچنان که در قسمت ۱ اشاره گردیده بعضی از این پدیده‌ها باعث کم شدن قابلیت جداسازی ($resolution$) عمق می‌شود که مهمترین آنها تفرق انرژی ($energy straggling$)، پهن شدن انرژی ($kinematic spreading$)، قابلیت جداسازی آشکارساز و پراکندگی چند مرحله‌ای را می‌توان نام برد .

تفرق انرژی ($energy straggling$) همان تغییرات آماری از دست دادن انرژی یونها هنگام عبور آنها از داخل ماده می‌باشد (۱۸، ۱۹) . به‌رحال ناهماری سطوح هدف و هر گونه غیر-یکنواختی در صفحه استفاده شده در جلو آشکارساز باعث تغییرات طول مسیر برای ذره‌های برخوردی و ذرات ساطع شده می‌شود که این تغییرات اغلب قابل ملاحظه می‌باشد .

پهن شدن انرژی ($kinematic spreading$) بخاطر این است که زاویه فضایی معین آشکارساز اجازه می‌دهد که مقادیر مختلف زاویه واکنشی X در منحنی ضبط شده وارد شود . این اثر بسیار کوچک می‌باشد اما ممکن است از آن با بکارگیری کلیماتور مناسب جلوگیری کرد .

قابلیت تفکیک‌پذیری یک سیستم آشکارسازی معمولاً " مقدار ثابتی است اما با انتخاب مناسب سیستم آشکارسازی (۲۰، ۲۱) می‌توان این اثر را به حداقل رساند . بالاخره پخش چند مرحله‌ای مربوط به زوایای کوچک از هسته هدف وقتی که اگر ذره تابشی بصورت مایل به هدف تابیده شود یک اثر مهم تلقی می‌شود . چنین حالتی گاهی در بعضی از آزمایشات مربوط به واکنش (d, α) مورد استفاده قرار می‌گیرد . این پدیده در محدوده زوایائی که بوسیله آشکارساز جاروب می‌شود دوباره باعث



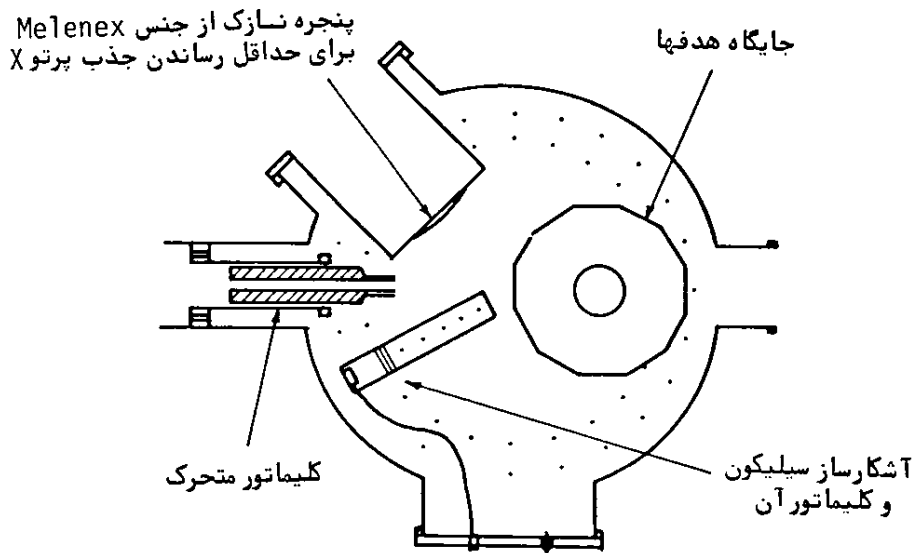
شکل ۸- شماتیک خط انتقال پرتو مورد استفاده در آنالیز

عناصر تشکیل دهنده سطح در آزمایش (d,p) احتیاج به منحنی‌های استاندارد می‌باشد. منحنی‌های تنظیم شده (۲۴) ذرات ساطع شده در اثر بمباران هدفهای ضخیم (ضخیمتر از ۵ میکرون) که از عناصر 17 تا Z=3 تشکیل شده است (بجز نئون) در شکل 10 تا 13 نشان داده شده است. این منحنی‌ها با

شود چنین محفظه‌های امکان آنالیز 100 نمونه را در روز دارد.

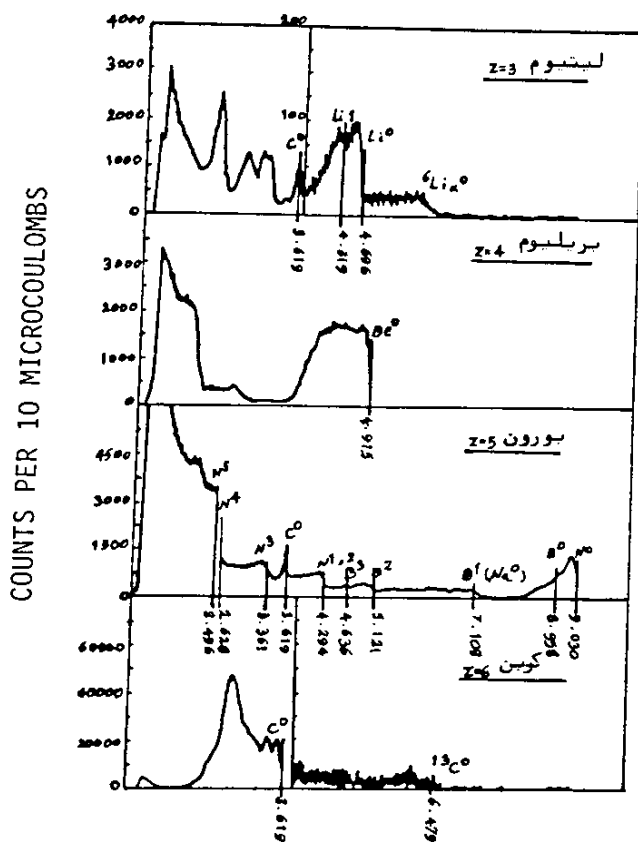
۴- بعضی منحنی‌های مفید ناشی از واکنش (d,p).

برای ارزیابی سریع از طبیعت و مقدار تقریبی



شکل ۹- جزئیات محفظه کوچک خلاء نشان داده شده در شکل ۸

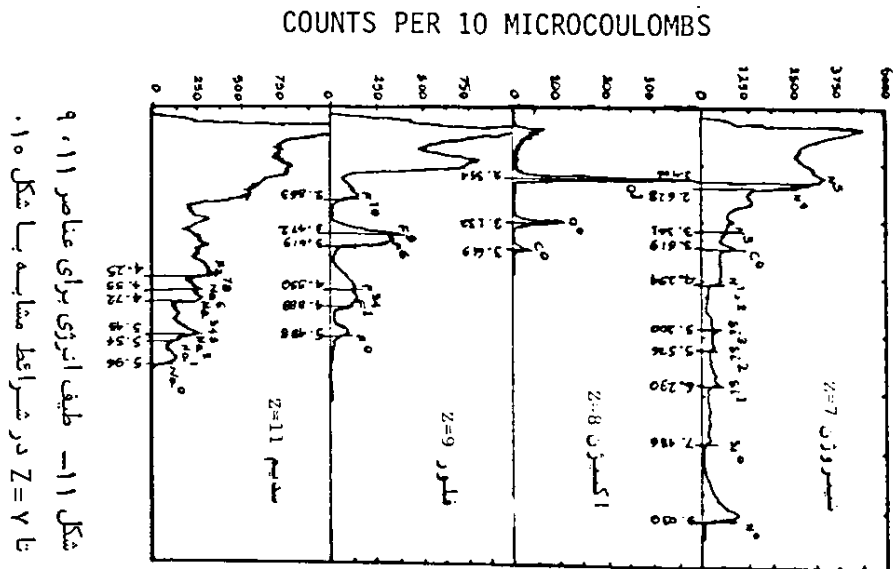
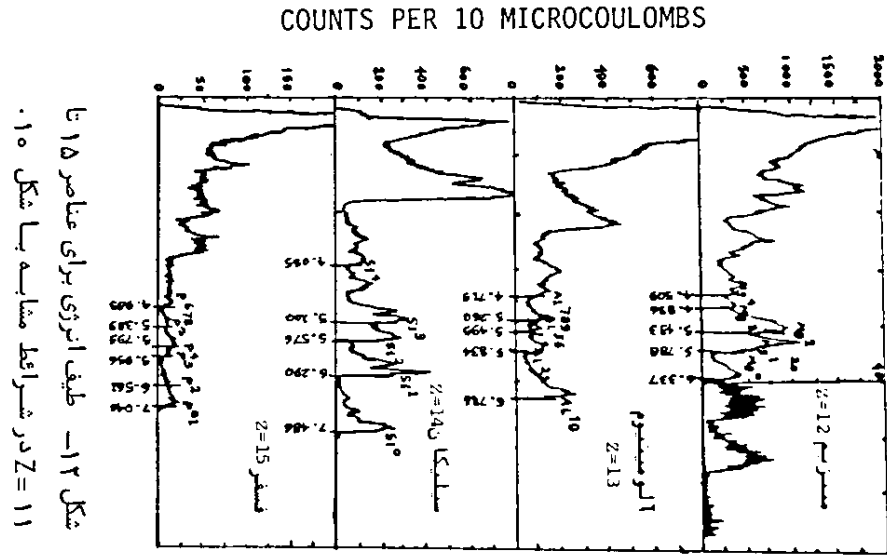
حسین آفریده . استفاده از دوترون در واکنشهای هستهای .



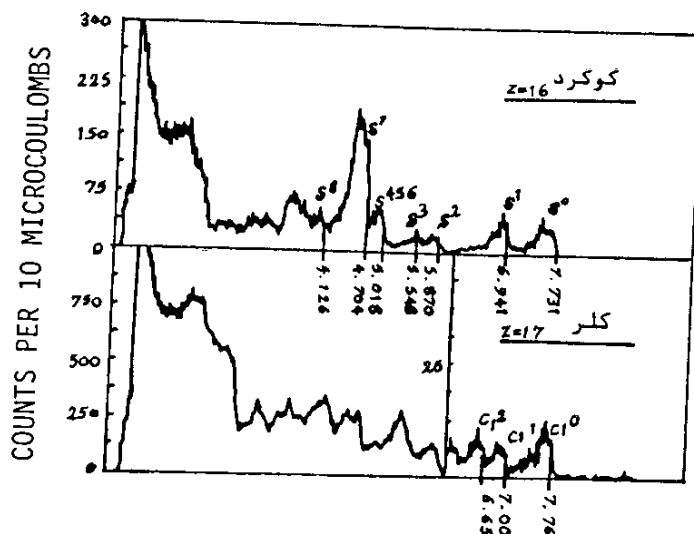
شکل ۱- طیف انرژی کالیبره شده برای ذرات ساطع شده از هدفهای ضخیم استاندارد (بیشتر از ۵ میکرو-متر) در اثر بمباران دوترون با انرژی ۲ MeV ، هدف استاندارد شامل عناصر ۳ تا ۶ Z بوده و اندازه گیریها در زاویه 150° صورت گرفته و دوترون بمباران شده روی هدف با زاویه 90° بوده و ۲۵ میکرون آلومینیوم در مقابل آشکارساز قرار داده شده که کلیه طیفها برای ۱۰ میکروکولمب بار آنالیز شده اند .

حساسیت قابل قبولی را برای عناصر بدست می دهد و بخوبی برای آنالیز چندین عنصر ، مناسب می باشد . اما بهر حال بهترین انرژی برای اندازه گیری همه عناصر نمی باشد . قابل ذکر است که در کالیبره کردن سیستم کاهش انرژی در صفحه موجود

استفاده از دوترون ۲ میلیون الکترون ولت که بطور عمودی بر هدف تابیده شده است بدست آمده اند که جریان کلی دوترونها برابر با ۱۰ میکروکولمب می باشد . انرژی ۲ میلیون الکترون ولت برای دوترون پرتابی به این جهت انتخاب شده است که



حسین آفریده . استفاده از دوترون در واکنشهای هسته‌ای .



شکل ۱۳ - طیف انرژی برای عناصر ۱۶ تا ۱۷ در شرایط مشابه با شکل ۱۰ .

آلفا را داشته و در عین حال از واکنشهای مزاحم جلوگیری شده است . آشکارساز طوری انتخاب شده است که لایه خالی شده (depletion layer) آن آنقدر ضخیم است که بتواند ذرات آلفای بوجود آمده در واکنش را متوقف و در عین حال به پروتونهای مزاحم این امکان را بدهد که از آشکارساز عبور کنند (۲۵) . این عمل باعث کمتر پیچیده شدن منحنی حاصل خواهد شد . پروتونهای عبور کرده از آشکارساز فقط مقدار کمی از انرژی خود را در آشکارساز از دست می‌دهند لذا در ناحیه انرژیهای پائین منحنی ظاهر می‌گردند .

شکلهای ۱۴ - الف و ۱۴ - ب منحنیهای انرژی ذرات آلفای ساطع شده در برخورد دوترون با هدف ضخیم نیترات بور (BN) و یک لایه‌ای از SiO_2 به ضخامت ۳۴۰۰ آنگسترم بر روی سیلیکون را به ترتیب نشان می‌دهد . منحنی بدست آمده از BN از اثر دوترون ۱/۸ میلیون الکترون ولتی است که به

در جلو آشکارساز منظور نگردیده است . جدول ۱ جزئیات مربوط به ساختمان هر هدف را نشان می‌دهد .

۵- مثالهایی در آنالیز با استفاده از واکنش (d, α)

استفاده از این واکنش به خاطر پائین بودن سطح مقطع واکنش برای بعضی از عناصر قدری محدود شده است . اما بهرحال برای اینکه بحث تکمیل شود ، منحنی که متعلق به واکنشهای مفید (d, α) است در اینجا آورده شده است . این روش معمولاً "موقعی بکار می‌رود که اطلاعات عمقی زیادی از یک عنصری که قبلاً وجود آن در نمونه بطریق دیگری اثبات شده است مورد نیاز باشد . به همین علت منحنی ارائه شده با استفاده از انرژیهای مختلف برای ذره دوترون و زوایای مختلف برای آشکارسازی ذره آلفا بطریقی انجام گردیده است که بیشترین میزان تولید

جدول ۱- فهرست هدفهای استفاده شده در آزمایش

هدف	جزئیات ساختمان هدف	ملاحظات
لیتیم	نیدرات لیتیم نشانده شده در ایندیوم	ممکن است یکنواخت نباشد
برلیم	برلیم خالص	استاندارد قابل اعتماد
بور	BN خالص	استاندارد قابل اعتماد
کربن	کربن خالص	استاندارد قابل اعتماد
ازت	Si ₃ N ₄ خالص	استاندارد قابل اعتماد اما گروههای سیلیکون تداخل می‌نماید
اکسیژن	۷۰۰آنگسترم Ta ₂ O ₅ بر روی تیتانیم	هدف ضخیم موجود نبود
فلئور	لایه LiF انباشته شده بر روی مس	قابل اعتماد اما هدف ضخیم نیست
سدیم	تک کریستال نمک طعام	استاندارد قابل اعتماد
منیزیم	منیزیم خالص	استاندارد قابل اعتماد
آلومینیوم	آلومینیوم خالص	استاندارد قابل اعتماد
سیلیکون	تک کریستال سیلیکون	استاندارد قابل اعتماد
فسفر		میزان فسفر تقریبی می‌باشد
گوگرد	تک کریستال ZnS	استاندارد قابل اعتماد
کالر	تک کریستال نمک طعام	استاندارد قابل اعتماد

آلفا در زاویه 135° مورد آشکارسازی قرار گرفت. ذرات آلفای آشکار شده در زاویه 75° نسبت به خط عمود بطور موثری طول مسیر را افزایش داده و بنا بر این باعث بهتر شدن حد تفکیک عمقی خواهد شد. استفاده از آشکارسازی ^{24}Mg میکرونی بطور کامل وجود واکنش مزاحم $^{170}\text{O}(d,p)^{160}\text{O}$ را از بین می‌برد.

۶- نتیجه‌گیری

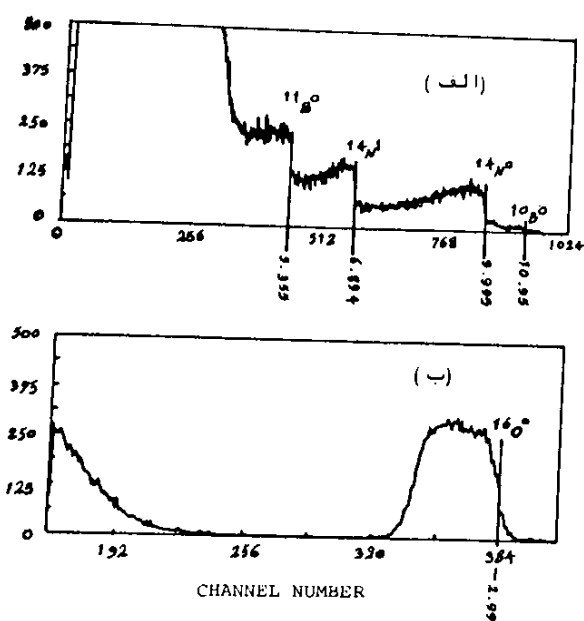
مختصری از شرح آنالیز به روش واکنش هسته‌ای با تاکید بیشتری بر روی واکنشهای تولید شده به وسیله دوترون در اینجا آورده شده است. این روش برای آنالیز کمی بصورت غیر تخریبی برای عناصر سبک موجود در لایه چند میکرونی موجود روی سطح

صورت عمودی بر روی هدف تابیده شده است و زاویه اندازه‌گیری ذرات آلفا برابر 150° درجه بوده است زیرا در حوالی این زاویه سطح مقطع واکنش $^{12}\text{C}(d,\alpha)^{14}\text{N}$ به حداکثر ممکن می‌رسد.

برای این حالت آشکارساز سد سطحی سیلیکون با لایه خالی شده حدود 150 میکرون مورد استفاده قرار گرفت. منحنی ذرات آلفای ناشی از لایه 3400 آنگسترمی SiO_2 نشان دهنده حد تفکیک در عمق، حدود 400 آنگسترم بوده که با انتخاب دقیق شرایط آزمایش بدست آمده است (۲۶).

برای اندازه‌گیری واکنش $^{14}\text{N}(d,\alpha)^{16}\text{O}$ برای اینکه سطح مقطع را به حداکثر مقدار برسانیم دوترون حاوی انرژی $1/8$ میلیون الکترون ولت تحت زاویه 30° نسبت به خط عمود هدف تابیده شده و ذرات

حسین آفریده . استفاده از دوترون در واکنشهای هسته‌ای .



شکل ۱۴ - الف : طیف انرژی ذرات آلفای ساطع شده در اثر بمباران نمونه ضخیم BN توسط دوترون . ب : طیف انرژی ذرات آلفای ساطع شده در اثر بمباران یک لایه 3400 \AA از SiO_2 که بصورت حرارتی رشد داده شده است .

اینجا آورده شده است که برای آنالیز کیفی سریع منحنی‌های یک هدف نامشخص می‌تواند بسیار مفید واقع گردد . این امکان وجود دارد که بتوان غلظت مقاطع مختلف عمقی را بطور تقریبی تعیین نمود به شرطی که اطلاعات مورد نیاز مربوط به قدرت متوقف شدگی ذره موجود باشد .

بکار گرفته می‌شود . زمان آنالیز معمولاً " بسیار کوتاه و در حدود ۱۰ دقیقه برای هر نمونه می‌باشد . این روش می‌تواند به صورت رقیبی برای اوزه الکترون اسپکتروسکوپی (۲۷) باشد . این روش به دلیل غیر تخریبی بودن بر روش اوزه الکترون اسپکتروسکوپی برتری دارد . بعضی از منحنی‌های استاندارد در

References

1. W. A. Lanford, I. S. T. Tsong and P. Williams (Eds.), Proc. of the six Int. Conf. On Ion Beam Analysis, Nucl. Instrum. Meth., 218, 1, (1983).

2. J. R. Bird and G. J. Clarke (Eds.), Proc. of the 5th Int. Conf. on Ion Beam Analysis, Nucl. Instrum. Meth., 191, 1 (1981).
3. H. H. Anderson, J. Bottiger and H. Knudsen (Eds.), Proc. of 4th Int. Conf. on Ion Beam Analysis, Nucl. Instrum. Meth., 168, 1 (1980).
4. F. Ajzenberg-Selove, Energy Levels of Light Nuclei, Nucl. Phys. A, 360, 1 (1981).
5. J. W. Mayer and E. Rimini (Eds.) Ion Beam Handbook for Materials Analysis, Academic Press, New York (1977).
6. P. F. Kane and G. B. Larrabee (Eds.), Characterisation of Solid Surfaces, Plenum, New York (1974).
7. J. F. Ziegler (Eds.), New Uses of Ion Accelerators, Plenum, New York (1975).
8. E. Kasly, R. R. Perry and J. R. Risser, Excited States in N From C(d,d) C, C(d,p) C and C(d,p) C, Phys. Rev., 117, 1289 (1960).
9. L. C. Nirthcliffe and R. F. Schilling, Nucl. Data Tables, A7 (1970).
10. C. F. Williamson, J. R. Boojot and J. Picard, Energy Commission of France Saclay, Rep. No. 3042 (1966).
11. J. F. Ziegler, Helium Stopping Powers and Ranges in All Elements, Pergamon Press, New York, (1977).
12. S. S. Eskildsen, Int. Rep. Inst. of Physics, University of Aarhus, Denmark (1984).
13. J. A. Borders and J. M. Harris, The Use of C(d,p) C and O(d,p) O Reactions to Profile Carbon and Oxygen in Solids, Nucl. Instrum. Meth., 149, 279 (1978).
14. J. C. B. Simpson and L. G. Earwaker, A Computer Simulation of Nuclear Reaction Spectra with Applications in Analysis and Depth Profiling of Light Elements, Vacuum, 34, 899 (1984).
15. T. L. M. Marcuso, S. J. Rothman, L. J. Nowicki and P. Baldo, A Computer Program for Nuclear Reaction Analysis with the $D(^3\text{He}, \alpha)H$ Reaction Nucl. Instrum. Meth., 211, 227 (1983).
16. J. A. P. Carvalho and J. M. Calvert, Low Energy Nucl., Phys. Ann. Rep. Schuster Laboratory, Univ. of Manchester (1983).

17. R. A. Jarjis, Int. Rep., Dept. of Phys., Univ. of Manchester (1979).
18. J. Lindhard and M. Scharff, Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk., No. 15, 27 (1953).
19. L.P. Neilsen, Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk., No. 6, 33 (1961).
20. I. Reid and P. J. Scanlon, Anomalous Stopping Power Effects in Thin Gold Films, Nucl. Instrum. Meth. 170, 211 (1980).
21. J. K. Hirvonen and W. H. Lucke, Nuclear Reaction Analysis of O Concentration Profiles with a High-Resolution Magnetic Spectrometer, Nucl. Instrum. Meth. 149, 295 (1978).
22. J.B.A. England, Techniques in Nuclear Structure Physics, Vol.1, McMillan,, London, (1974).
23. Birmingham Radiation Center, Ann. Rep. BRC-82, 04, 41 (1982).
24. H. Afarideh, Program DWKIN Van de Graaff Lab., NRC, Atomic Energy Organization of Iran (1989).
25. H. Afarideh, Range-Energy Program, Van de Graaff Lab. NRC, Atomic Energy Org. Iran, (1989).
26. J. C. B. Simpson, J. M. C. Groves and L. G. Earwaker, Use of the $O(d,\alpha)N$ Nuclear Reaction in the Analysis of Oxide Films, Nucl. Instrum. Method., B9, 321 (1985).
27. P. M. Hall and J. M. Morabito, In R. Vanselow (Ed.), Chemistry and Physics of Solid Surfaces, Vol. 2, Chem. Rubber Co., Celveland, OH (1979).

QUANTITATIVE SURFACE ANALYSIS USING
DEUTERON-INDUCED NUCLEAR REACTIONS

H. Afarideh
Cyclotron Department
Atomic Energy Organization of Iran

Abstract

The nuclear reaction analysis (NRA) technique consists of looking at the energies of the reaction products which uniquely define the particular elements present in the sample and it analyses the yield/energy distribution to reveal depth profiles.

A summary of the basic features of the nuclear reaction analysis technique is given, in particular emphasis is placed on quantitative light element determination using (d,p) and (d, α) reactions. The experimental apparatus is also described. Finally a set of (d,p) spectra for the elements $Z=3$ to $Z=17$ using 2 MeV incident deuterons is included together with example of more applications of the (d, α) spectra.