

رسالة محمد



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده فیزیک

محاسبه‌ی لایه‌ی مرده و بازده‌ی قلّه‌ی تمام انرژی آشکارساز HPGe با استفاده
از روش شبیه‌سازی MCNP و نتایج تجربی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد فیزیک - گرایش هسته‌ای

مسعود معینی فر

استاد راهنما
دکتر احمد شیرانی



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده فیزیک

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی فیزیک – گرایش هسته‌ای آقای مسعود معینی فر
تحت عنوان

محاسبه‌ی لایه‌ی مرده و بازده‌ی قلّه‌ی تمام انرژی آشکارساز HPGe با استفاده از روش شبیه‌سازی MCNP و نتایج تجربی

در تاریخ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

دکتر احمد شیرانی

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه

دکتر محمد حسن علامت‌ساز

۲- استاد مشاور پایان‌نامه

دکتر اکبر پروازیان

۳- استاد داور

دکتر مریم حسنونند

۴- استاد داور

دکتر فرهاد شهبازی

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده

تقدیر و تشکر

خدای راسبی ساگرم که از روی لطف و کرم، پدر و مادری فدکار نصیم کرده تا در سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم. والدینی که بودند تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم. چرا که پس از پروردگاریه، هستی ام بوده اند، دستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی پر فراز نشیب آموختند. از برادران و خواهر عزیزم که همواره شوقانی دلسوز برای من بوده اند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

از استاد راهنمای بزرگوارم، جناب آقای دکتر احمد شیرانی که همواره در مراحل انجام پروژه از راهنمایی های ایشان بهره مند بودم، نیابت تشکر را دارم. همچنین از آقای دکتر علامت ساز که در طول انجام پروژه از مشاوره های ارزنده ایشان بهره مند بودم سپاس فراوان دارم. از آقای دکتر پروازیان و خانم دکتر حسونیکه زحمت دآوری این پایان نامه را بر عهده گرفتند، بسیار ممنونم. از کجک های بی دریغ آقای رحمانی در آزمایشگاه بسته ای کمال تشکر را دارم. یاد و خاطره همه ی دوستان، بهکلاسی ما و هم اتاقی ها را در این مدت گرامی می دارم و از خداوند منان برای آنها موفقیت و کامیابی را در تمامی مراحل زندگیشان خواستارم.

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،
ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع
این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی
اصفهان است.

تقدیم به:

چشمه های جوشان محبت
جلوه های مهر و عطف الهی
لبندهای پر مهر زندگیم

پدر و مادر عزیزم

فهرست مطالب

| <u>صفحه</u> | <u>عنوان</u> |
|-------------|---|
| هشت | فهرست مطالب..... |
| ۱ | چکیده..... |
| ۲ | فصل اول: مقدمه |
| ۳ | ۱-۱ منشأ پرتوهای گاما و ایکس..... |
| ۴ | ۲-۱ اصول کار دستگاه‌های آشکارساز..... |
| ۴ | ۳-۱ تقسیم‌بندی آشکارسازها بر اساس ساز و کار تولید پاسخ..... |
| ۵ | ۴-۱ آشکارسازهای سوسوزن..... |
| ۵ | ۵-۱ آشکارسازهای نیمه‌رسانا..... |
| ۶ | ۶-۱ انگیزه و هدف انجام این پایان‌نامه..... |
| ۷ | ۷-۱ تاریخچه‌ی کارهای انجام‌شده..... |
| ۸ | فصل دوم: برهمکنش اشعه گاما با ماده و مقدمه‌ای بر طیف نگاری |
| ۸ | ۱-۲ مقدمه..... |
| ۹ | ۲-۲ اثر فوتوالکتریک..... |
| ۱۰ | ۱-۲-۲ پرتوهای ایکس و اثر اوژه..... |
| ۱۲ | ۳-۲ پراکندگی کامپتون..... |
| ۱۷ | ۴-۲ تولید زوج..... |
| ۱۹ | ۵-۲ ضریب تضعیف کل..... |
| ۲۱ | ۶-۲ ضریب جذب انرژی فوتون..... |
| ۲۴ | ۷-۲ طیف نگاری..... |
| ۲۴ | ۱-۷-۲ اندازه‌گیری طیف انتگرالی با تحلیل گر تک کاناله (SCA)..... |
| ۲۵ | ۲-۷-۲ اندازه‌گیری طیف دیفرانسیلی با تحلیل گر تک کاناله (SCA)..... |
| ۲۵ | ۳-۷-۲ رابطه‌ی بین توزیع ارتفاع تپ و طیف انرژی..... |
| ۲۶ | ۸-۲ قدرت تفکیک آشکارساز..... |
| ۲۷ | ۱-۸-۲ افت و خیزهای آماری و ضریب فانو..... |
| ۲۸ | ۲-۸-۲ اثر نوفه‌ی الکتریکی..... |
| ۲۸ | ۳-۸-۲ پهنای کل و قدرت تفکیک آشکارساز..... |
| ۲۹ | ۹-۲ مقایسه‌ی قدرت تفکیک آشکارساز Ge و NaI(Tl)..... |
| ۲۹ | ۱۰-۲ اهمیت قدرت تفکیک آشکارساز..... |
| ۳۱ | ۱۱-۲ بازده آشکارساز..... |
| ۳۳ | ۱۲-۲ تعیین قدرت چشمه..... |
| ۳۳ | ۱۳-۲ طیف نگاری پرتوهای گاما..... |

| | |
|----|--|
| ۳۴ | ذخیره انرژی توسط فوتون‌هایی با انرژی کمتر از $1/0.22 \text{ MeV}$ |
| ۳۸ | ذخیره انرژی توسط فوتون‌هایی با انرژی بیشتر از $1/0.22 \text{ MeV}$ |
| ۴۰ | فصل سوم: آشکارساز HPGe و ساختمان آن |
| ۴۰ | ۱-۳ مقدمه..... |
| ۴۰ | ۲-۳ رده‌بندی الکتریکی جامدها و گاف انرژی..... |
| ۴۱ | ۳-۳ الکترون و حفره..... |
| ۴۱ | ۴-۳ نیمه‌رساناهای ذاتی و غیر ذاتی و نقش ناخالصی‌ها..... |
| ۴۲ | ۵-۳ نیمه‌رسانای نوع n و نیمه‌رسانای نوع p..... |
| ۴۳ | ۶-۳ پیوند p-n به عنوان یک آشکارساز..... |
| ۴۴ | ۷-۳ تعاریف و روابط مهم..... |
| ۴۶ | ۸-۳ خواص پیوند بایاس معکوس..... |
| ۴۸ | ۹-۳ پیکربندی آشکارساز نیمه‌رسانا..... |
| ۴۹ | ۱۰-۳ آشکارسازهای کلاً تهی شده..... |
| ۵۱ | ۱۱-۳ ساخت آشکارسازهای ژرمانیومی فوق خالص (HPGe)..... |
| ۵۲ | ۱۲-۳ پیکربندی سطح..... |
| ۵۳ | ۱۳-۳ پیکربندی هم محور..... |
| ۵۴ | ۱۴-۳ میدان الکتریکی و ظرفیت..... |
| ۵۵ | ۱-۱۴-۳ هندسه‌ی سطح..... |
| ۵۶ | ۲-۱۴-۳ هندسه‌ی هم محور..... |
| ۵۸ | ۱۵-۳ لایه مرده سطحی..... |
| ۵۸ | ۱۶-۳ تعیین ضخامت لایه مرده..... |
| ۵۹ | ۱-۱۶-۳ روش تجربی..... |
| ۵۹ | ۲-۱۶-۳ روش تجربی-شبه‌سازی..... |
| ۶۱ | فصل چهارم: آشنایی با کد هسته‌ای MCMP |
| ۶۱ | ۱-۴ مقدمه..... |
| ۶۲ | ۲-۴ مراحل مختلف تکمیل کد MCNP..... |
| ۶۲ | ۳-۴ کد MCNP..... |
| ۶۳ | ۱-۳-۴ واحدها در MCNP..... |
| ۶۴ | ۲-۳-۴ دستورات اجرایی..... |
| ۶۴ | ۳-۳-۴ روش رسم هندسه‌ی مسأله به وسیله‌ی کد MCNP..... |
| ۶۵ | ۴-۳-۴ روش مقایسه‌ی دو فایل ورودی (FC)..... |
| ۶۵ | ۵-۳-۴ فایل ورودی INP..... |
| ۶۶ | ۶-۳-۴ هندسه مسأله..... |
| ۷۰ | ۷-۳-۴ کارت‌های اطلاعات..... |
| ۷۵ | ۸-۳-۴ روش‌های کاهش واریانس..... |

| | | |
|----|---|-------|
| ۷۶ | روش رسم نمودار..... | ۹-۳-۴ |
| ۷۹ | فصل پنجم: محاسبات و نتیجه گیری | |
| ۷۹ | مقدمه..... | ۱-۵ |
| ۷۹ | روش شبیه سازی..... | ۲-۵ |
| ۸۱ | معرفی سه قسمت برنامه شبیه سازی آشکارساز HPGe..... | ۱-۲-۵ |
| ۸۱ | اجرای برنامه شبیه سازی آشکارساز HPGe..... | ۲-۲-۵ |
| ۸۲ | روش تجربی..... | ۳-۵ |
| ۸۲ | معرفی آشکارساز..... | ۱-۳-۵ |
| ۸۳ | معرفی چشمه ها..... | ۲-۳-۵ |
| ۸۳ | محاسبه ی فعالیت چشمه ها..... | ۳-۳-۵ |
| ۸۴ | نمونه طیف های نگاشته شده..... | ۴-۳-۵ |
| ۸۶ | محاسبه ی لایه ی مرده آشکارساز HPGe..... | ۴-۵ |
| ۸۶ | تعریف گاوسی پیک ها..... | ۱-۴-۵ |
| ۸۷ | تعیین حجم فعال بلور و لایه ی مرده آشکارساز..... | ۲-۴-۵ |
| ۹۰ | محاسبه ی بازده ی قله ی تمام-انرژی آشکارساز HPGe به روش تجربی و شبیه سازی..... | ۵-۵ |
| ۹۱ | نتیجه گیری..... | ۶-۵ |
| ۹۱ | پیشنهادات..... | ۷-۵ |
| ۹۲ | پیوست..... | |
| ۹۴ | مراجع..... | |

فهرست شکل‌ها

| صفحه | عنوان |
|---------|---|
| ۴..... | شکل (۱-۱): نمودار کارلسروهه (Karlsruhe) که هسته‌های پرتوزا و نوع واپاشی آن‌ها را نشان می‌دهد (از مرجع ۸). |
| ۵..... | شکل (۲-۱): شکل یک شمارشگر سوسوزن..... |
| ۶..... | شکل (۳-۱): شکل یک آشکارساز نیمه‌رسانا..... |
| ۶..... | شکل (۴-۱): طیف حاصل از چشمه ی ^{60}Co |
| ۱۰..... | شکل (۱-۲): طیف نسبت سطح مقطع فوتوالکتریک کل به سطح مقطع پوسته K بر حسب عدد اتمی Z به دست آمده از معادله (۳-۲)..... |
| ۱۱..... | شکل (۲-۲): نمودار تراز انرژی اتمی همراه با نام گذاری پرتوهای ایکس (از مرجع ۶)..... |
| ۱۲..... | شکل (۳-۲): بازده فلورسانس برای پوسته K بر حسب تابعی از عدد اتمی Z (از مرجع ۱۵)..... |
| ۱۳..... | شکل (۴-۲): طرح اثر کامپتون..... |
| ۱۴..... | شکل (۵-۲): سطح مقطع دیفرانسیلی کامپتون برای الکترون‌های آزاد بر حسب زاویه فوتون پراکنده (θ)، برای مقادیر $\alpha = 0, 0.2, 0.5, 1.0, 5.0, 10.0$ منحنی‌ها با استفاده از معادله (۲-۱۳) به دست آمده‌اند (از مرجع ۱۵)..... |
| ۱۶..... | شکل (۶-۲): شکل توزیع پیوستار کامپتون برای چند گامای فرودی (از مرجع ۱۹)..... |
| ۱۶..... | شکل (۷-۲): پیوستار کامپتون محاسبه شده و مشاهده شده برای چشمه $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (۱۴۰ keV) در Si، منحنی خط چین برای پراکندگی از الکترون آزاد و منحنی تیره با در نظر گرفتن انرژی بستگی الکترون به دست آمده است. داده‌های تجربی به صورت نقطه چین نشان داده شده (از مرجع ۲۸)..... |
| ۱۸..... | شکل (۸-۲): سطح مقطع دیفرانسیلی تولید زوج، بیان شده بر حسب تابع بدون بعد P معادله (۲-۲۰). این نمودار توزیع انرژی جنبشی داده شده به الکترون و پوزیترون ($h\nu - 2mc^2$) را نشان می‌دهد (از مرجع ۱۹)..... |
| ۱۹..... | شکل (۹-۲): سطح مقطع تولید زوج بر حسب تابعی از انرژی فوتون فرودی برای دو عنصر Al و Pb. منحنی پایینی برای سرب با در نظر گرفتن اثر الکترون‌های اتمی و منحنی بالایی بدون در نظر گرفتن آن‌هاست. دو منحنی خط چین سطح مقطع کل کامپتون را نشان می‌دهد (از مرجع ۲۰)..... |
| ۱۹..... | شکل (۱۰-۲): اهمیت نسبی سه برهمکنش عمده ی گاما..... |
| ۲۰..... | شکل (۱۱-۲): باریکه‌ای از پرتوهای گاما با شدت I_0 بر یک بره به ضخامت t فرود می‌آیند. شدت فوتون‌هایی که بدون انجام برهمکنش به عمق X نفوذ می‌کنند با رابطه $I = I_0 e^{-\mu x}$ داده می‌شود و شدت فوتون‌هایی که ماده‌ی به ضخامت t را طی می‌کنند برابر است با..... |
| ۲۱..... | شکل (۱۲-۲): ضرایب تضعیف جرمی برای ژرمانیوم بر حسب انرژی فوتون فرودی (از مرجع ۱۵)..... |
| ۲۳..... | شکل (۱۳-۲): ضرایب تضعیف جرمی برای NaI بر حسب انرژی فوتون فرودی (از مرجع ۱۴)..... |
| ۲۳..... | شکل (۱۴-۲): مقایسه‌ی بین ضریب جذب و تضعیف در ژرمانیوم (از مرجع ۳۴)..... |
| ۲۴..... | شکل (۱۵-۲): طیف انرژی دیفرانسیلی..... |

- شکل (۱۶-۲): شکل یک طیف تپ دیفرانسیلی ۲۵
- شکل (۱۷-۲): توزیع گاوسی و قدرت تفکیک آشکارساز ۲۷
- شکل (۱۸-۲): (a) برهمکنش تپ‌ها و نوفه‌ی الکتریکی (b) توزیع گاوسی به وجود آمده که پهنای آن به نوفه‌ی الکتریکی بستگی دارد (از مرجع ۶) ۲۸
- شکل (۱۹-۲): طیف چشمه متشکل از دو انرژی متمایز ۳۰
- شکل (۲۰-۲): طیف اندازه‌گیری شده برای حالت $E_2 - E_1 > (W_0)_1 + (W_0)_2$ ۳۰
- شکل (۲۱-۲): طیف اندازه‌گیری شده برای حالت $E_2 - E_1 = (W_0)_1 + (W_0)_2$ ۳۰
- شکل (۲۲-۲): طیف اندازه‌گیری شده برای حالت $E_2 - E_1 = [(W_0)_1 + (W_0)_2] / 2$ ۳۱
- شکل (۲۳-۲): هندسه‌ی فرض شده در تعریف بازده ذاتی ۳۲
- شکل (۲۴-۲): هندسه‌ی فرض شده در تعریف بازده مطلق ۳۲
- شکل (۲۵-۲): چگونگی اندازه‌گیری نسبت قله-به-کل برای آشکارساز NaI(Tl) (از مرجع ۳۷) ۳۳
- شکل (۲۶-۲): برهمکنش فوتوالکتریک تابش فرودی با ماده آشکارساز و تشکیل قله‌ی فوتوپیک و قله‌ی فرار پرتو ایکس (از مرجع ۳۶) ۳۵
- شکل (۲۷-۲): فرایندهایی که در آشکارسازی پرتو گاما رخ می‌دهند. (۱) فوتون پس از پراکندگی چندگانه کامپتون، قبل از به جا گذاشتن همه‌ی انرژی‌اش آشکارساز را ترک می‌کند. (۲) پس از چند پراکندگی کامپتون، جذب فوتوالکتریک صورت می‌گیرد و تمام انرژی فوتون فرودی در آشکارساز ذخیره می‌شود. (۳) به ترتیب فرایندهای تولید زوج، نابودی پوزیترون، پراکندگی کامپتون و جذب فوتوالکتریک صورت می‌گیرد. (۴) یکی از فوتون‌های نابودی آشکارساز را ترک می‌کند (قله‌ی تک-فراری). (۵) هر دو فوتون حاصل از نابودی، آشکارساز را ترک می‌کنند (قله‌ی دو-فراری). فرایندهای (۳)، (۴) و (۵) در صورتی رخ می‌دهند که انرژی فوتون فرودی بیش از 1.022 MeV باشد (از مرجع ۳۹) ۳۶
- شکل (۲۸-۲): (الف) طیف یک چشمه‌ی گامای تک انرژی. (ب) طیف ارتفاع تپ حاصل از طیف چشمه‌ی الف، در غیاب افت و خیزهای آماری برای یک آشکارساز با قدرت تفکیک انرژی کامل (شبه‌سازی شده با کد MCNP4C) ۳۷
- شکل (۲۹-۲): طیف ارتفاع تپ اندازه‌گیری شده‌ی حاصل از چشمه‌ی شکل (۳-۲۸ الف). چون هیچ آشکارسازی دارای قدرت تفکیک ایده‌آل نیست این مسئله باعث پهن شدن قله‌ی فوتوپیک و لبه‌ی کامپتون می‌گردد. منحنی نقطه‌چین طیفی را نشان می‌دهد که در غیاب پیوستار کامپتون با همان قدرت تفکیک به دست می‌آید (شبه‌سازی شده با کد MCNP4C) ۳۷
- شکل (۳۰-۲): طیف چشمه‌ی ^{38}K که با آشکارساز Ge(Li) اندازه‌گیری شده است (از مرجع ۴۰) ۳۹
- شکل (۱-۳): ساختار نواری برای انرژی الکترونی در عایق‌ها و نیمه‌رساناها [از مرجع ۳۶] ۴۱
- شکل (۲-۳): (الف) سیلیسیوم خالص (ذاتی). (ب) سیلیسیوم آلاینده با آرسنیک. الکترون پنجم اتم آرسنیک خیلی مقید نیست و مقدار کمی انرژی برای فرستادن آن به نوار رسانش لازم است ۴۲
- شکل (۳-۳): سیلیسیوم آلاینده با گالیوم. یکی از پیوندهای کووالانسی جور نشده است ۴۲
- شکل (۴-۳): یک پیوند p-n با پیش ولت وارون که به عنوان یک آشکارساز عمل می‌کند ۴۳
- شکل (۵-۳): تراکم اتم‌های بخشنده و پذیرنده و کمیت‌های الکتریکی در یک پیوند p-n [از مرجع ۳۶] ۴۴
- شکل (۶-۳): شکل اندازه میدان الکتریکی بر حسب فاصله ۴۷
- شکل (۷-۳): نمودار اختلاف پتانسیل الکتریکی بر حسب فاصله ۴۷

- شکل (۸-۳): نمودار میدان الکتریکی در یک آشکارساز بایاس معکوس. سه خط صاف به ترتیب نشان‌دهنده‌ی پایین‌ترین بودن، مساوی بودن و بزرگ‌ترین بودن ولتاژ اعمالی نسبت به ولتاژ تهی‌سازی V_d هستند [از مرجع ۳۶]. ۵۰
- شکل (۹-۳): نمودار میدان‌های الکتریکی برای انواع مختلف آشکارسازهای نیمه‌رسانای مسطح کاملاً تهی‌شده [از مرجع ۳۶]. ۵۰
- شکل (۱۰-۳): تغییرات رسانندگی الکتریکی در ژرمانیوم بر حسب تابعی از تراکم ناخالصی. ماده خالص کامل (ذاتی) در نقطه صفر محور طولی قرار دارد [از مرجع ۳۶]. ۵۱
- شکل (۱۱-۳): پیکربندی یک آشکارساز HPGe مسطح [از مرجع ۳۶]. ۵۲
- شکل (۱۲-۳): انواع مختلف آشکارساز هم‌محور [۳۶]. ۵۴
- شکل (۱۳-۳): تغییرات شدت میدان الکتریکی داخل حجم فعال یک آشکارساز مسطح HPGe برای مقادیر مختلف بایاس معکوس V ۵۶
- شکل (۱۴-۳): تغییرات شدت میدان الکتریکی بر حسب شعاع یک آشکارساز هم‌محور HPGe [۳۶]. ۵۷
- شکل (۱-۵): هندسه‌ی واقعی تعریف شده در کد. در شکل‌های بالا رنگ بنفش مربوط به لایه‌ی ضخیم سربی اطراف آشکارساز، رنگ سبز مربوط به لوله‌ی مسی خنک‌کننده آشکارساز و همچنین پوشش داخلی لایه سربی اطراف آشکارساز، رنگ صورتی مربوط به درپوش پلی‌اتیلنی آشکارساز، رنگ قرمز مربوط به پنجره‌ی بریلیومی آشکارساز، رنگ آبی روشن مربوط به لایه آلومینیومی اطراف کریستال ژرمانیوم، رنگ قهوه‌ای مربوط به لایه‌ی مرده درونی آشکارساز از جنس لیتیوم و رنگ زرد مربوط به حجم فعال آشکارساز که از جنس ژرمانیوم فوق‌خالص است. ۸۰
- شکل (۲-۵): طیف شبیه‌سازی مربوط به انرژی ^{60}Co ۱۱۷۳ keV ۸۲
- شکل (۳-۵): طیف تجربی ^{60}Co ۸۵
- شکل (۴-۵): طیف تجربی ^{22}Na ۸۵
- شکل (۵-۵): مقایسه‌ی طیف‌های محاسبه‌شده به ازای ضخامت‌های مختلف لایه مرده با طیف تجربی کبالت-۶۰ ۸۷
- شکل (۶-۵): مقایسه‌ی طیف کبالت-۶۰ حاصل از شبیه‌سازی با طیف تجربی معادل آن به ازای لایه‌ی مرده‌ای به ضخامت ۰/۵۷ mm ۸۸
- شکل (۷-۵): مقایسه‌ی طیف ^{65}Zn حاصل از شبیه‌سازی با طیف تجربی معادل آن به ازای لایه‌ی مرده‌ای به ضخامت ۰/۵۷ mm ۸۹
- شکل (۸-۵): مقایسه‌ی طیف ^{226}Ra حاصل از شبیه‌سازی با طیف تجربی معادل آن به ازای لایه‌ی مرده‌ای به ضخامت ۰/۵۷ mm ۸۹

چکیده

یکی از پارامترهای مهم در آشکارسازهای HPGe بازده است که به شدت به هندسه و عوامل جذبی بستگی دارد؛ به طوری که با تغییر پیکربندی در هندسه‌ی نمونه - آشکارساز، نیاز به اندازه‌گیری مجدد بازده آشکارساز است. دقیق‌ترین راه برای تعیین بازده آشکارساز، اندازه‌گیری تجربی و استفاده از چشمه‌های استاندارد مخصوص است. با توجه به مشکل بودن و در عین حال زمان‌بر بودن این روش، استفاده از روش شبیه‌سازی برای تخمین بازده آشکارساز که در زمان کم و با دقت خوب همراه است، ارزشمند است.

در این پژوهش، شبیه‌سازی مونت کارلو برای به دست آوردن ضخامت لایه‌ی مرده و بازدهی قله‌ی تمام-انرژی آشکارساز HPGe با استفاده از نرم‌افزار MCNPX انجام شد. برای این کار چشمه‌های مختلف را در فاصله‌های مشخص از آشکارساز قرار داده و طیف تجربی به دست آمده را ذخیره می‌کنیم. سپس طیف حاصل از چشمه‌ها را مطابق با وضعیت و شرایط آزمایشگاه به طریق شبیه‌سازی به دست می‌آوریم. در اجرای اولیه، کل حجم بلور ژرمانیوم به عنوان حجم فعال آشکارساز در نظر گرفته شد و با این فرض طیف به دست آمده از محاسبات انجام شده با طیف تجربی مقایسه گردید. مقایسه‌ی طیف محاسبه شده با طیف حاصل از آزمایش اختلاف قابل توجهی را نشان می‌داد. پس از مشاهده‌ی اختلاف بین مقادیر محاسباتی مونت کارلو و داده‌های تجربی، سعی شد با استفاده از تغییرات اندک در ضخامت آشکارساز (در حدود چندین صدم میلی‌متر) در برنامه شبیه‌سازی و برازش منحنی شبیه‌سازی شده با منحنی تجربی، ضخامت حقیقی بلور و ضخامت لایه‌ی مرده‌ی آشکارساز و در نهایت بازدهی قله‌ی تمام-انرژی را برای انرژی‌های مختلف و فاصله‌های مختلف چشمه تا آشکارساز به دست آوریم.

کلمات کلیدی: ۱- آشکارساز HPGe ۲- لایه مرده ۳- کد مونت کارلوی MCNP ۴- بازدهی قله‌ی تمام-انرژی

فصل اول

مقدمه

پرتوهای گاما و ایکس از نوع تابش الکترومغناطیسی هستند. برای بررسی این پرتوها از دو روش ذره‌ای و موجی استفاده می‌شود. در روش ذره‌ای که بر اساس کوانتوم نسبیته است، پرتوهای گاما (ایکس) را به صورت ذراتی به نام فوتون در نظر می‌گیرند. چون فوتون با سرعت نور حرکت می‌کند، جرم سکون و بار آن صفر است و انرژی آن را می‌توان با رابطه‌ی زیر بیان کرد [۱]:

$$E = pc \quad (1-1)$$

که p تکانه‌ی ذره و $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ سرعت نور در خلأ است.

در سال ۱۹۲۳ دوبروی^۱ استدلال کرد که یک طول موج $\lambda = h/p$ می‌تواند برای ذرات، با تکانه‌ی p همراه باشد [۱]. در واقع فرضیه‌ی دوبروی پل ارتباطی میان ماهیت ذره‌ای و موجی تابش‌های الکترومغناطیسی است. با استفاده از فرضیه‌ی دوبروی معادله‌ی (۱-۱) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \quad (2-1)$$

که $h = 6.6261 \times 10^{-34} \text{ J.s}$ ثابت پلانک^۲ همچنین ν و λ به ترتیب بسامد و طول موج ذره هستند.

^۱ De Broglie

^۲ Plank

کامپتون^۳ در سال ۱۹۲۳ [۲،۳]، با در نظر گرفتن ذره‌ای بودن پرتوهای ایکس توانست پراکندگی این پرتو را توسط الکترون‌های آزاد توجیه کند (بخش ۲-۳).

خواص موجی این پرتوها بر اساس معادلات ماکسول استوار است. این روش بررسی، فقط در انرژی‌های پایین به کار می‌رود [۴] و در اینجا مورد بررسی قرار نمی‌گیرد، زیرا آشکارسازی پرتوها بر پایه‌ی برهم‌کنش آن‌ها با ماده به صورت ذره است.

لازم است اشاره شود که تمایز روشی بین پرتوهای گاما و ایکس وجود ندارد. عموماً فوتون‌های با انرژی کمتر از 0.1 MeV را پرتوهای ایکس و فوتون‌های با انرژی بیشتر از 0.1 MeV (فوتون‌های با طول موج کوچک‌تر از F 10^5) را اشعه‌ی گاما می‌نامند [۵،۶].

۱-۱ منشأ پرتوهای گاما و ایکس

پرتوهای ایکس با انرژی گسسته، در اثر گذارهای اتمی تولید می‌شوند. وقتی الکترون‌های اتمی از پوسته‌های بیرونی به پوسته‌های درونی برمی‌گردند (بخش ۲-۲)، اختلاف انرژی دو پوسته به صورت یک پرتو ایکس آزاد می‌گردد. این پرتوهای ایکس به پرتوهای مشخصه‌ی ایکس^۴ یا تابش فلورسانس معروف‌اند. البته فوتون‌های حاصل از تابش ترمزی^۵ نیز پرتو ایکس نام دارند ولی این فوتون‌ها دارای یک پیوستار انرژی هستند [۶].

پرتوهای گاما در اثر گذارهای هسته‌ای به حالت‌های کم انرژی تر و در نهایت به حالت پایه گسیل می‌شوند [۷]. طول عمر حالت‌های برانگیخته‌ی هسته متغیرند، در برخی موارد پرتوهای گاما بلافاصله پس از واپاشی هسته‌ی مادر گسیل می‌شوند. طول عمر این نوع حالت‌های برانگیخته را می‌توان تقریباً 10^{-10} s در نظر گرفت. اما مواردی وجود دارد که قاعده گزینش، گسیل فوتون را در بازه‌ی زمانی کوچک ناممکن می‌سازد. به عنوان مثال حالت برانگیخته‌ی ویژه‌ی هسته‌ی $^{137}_{56}\text{Ba}$ حاصل از واپاشی $^{137}_{55}\text{Cs}$ ، نیم عمری برابر با $2/55$ دقیقه دارد. چنین حالت هسته‌ای دراز عمری را اصطلاحاً حالت شبه‌پایدار^۶ گویند و به صورت $^{137m}_{56}\text{Ba}$ نمایش می‌دهند [۷]. پرتوهای گامای حاصل از واپاشی هسته‌ای دارای طیف انرژی گسسته هستند و هویت هسته‌ها را مشخص می‌سازند. در واقع مطالعه‌ی گسیل پرتوهای گاما از هسته به صورت یک روش استاندارد برای طیف‌سنجی هسته‌ای در آمده است. از جمله ابزار و وسایلی که به کمک آن‌ها می‌توان به مطالعه‌ی پرتوهای گاما پرداخت آشکارسازها هستند.

از آنجایی که هسته‌های پرتوزا (هسته‌های ناپایدار) برای رسیدن به حالت پایدار واپاشی می‌کنند و این واپاشی‌ها بیشتر به صورت واپاشی آلفا زا و بتا زا هستند (شکل ۱-۱)، هسته نهایی (هسته دختر) را در حالت برانگیخته باقی

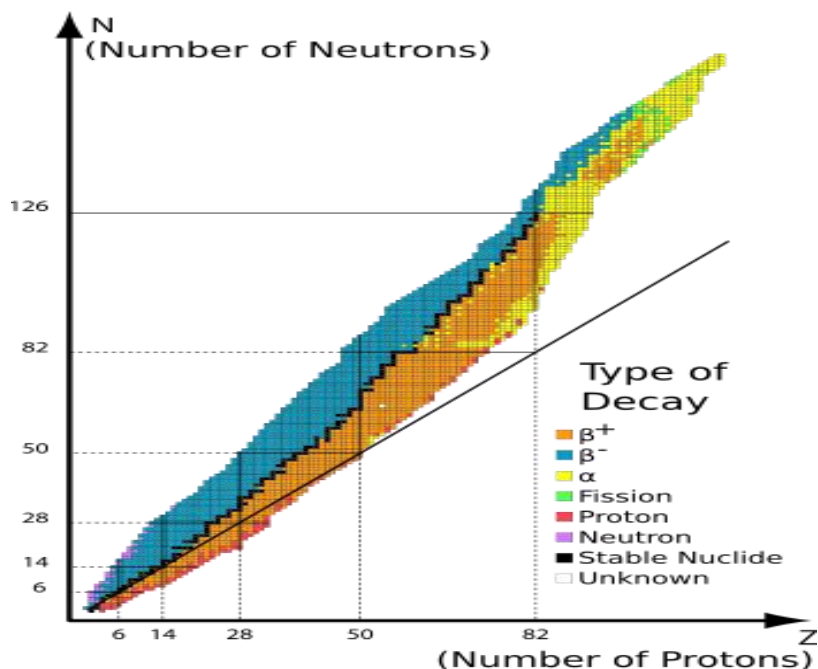
³ Compton

⁴ Characteristic X-rays

⁵ Bremsstrahlung

⁶ Metastable state

می‌گذارند. هسته‌های برانگیخته با دو آشکارساز NaI(Tl) و $HPGe^v$ (یا Ge(Li)) که به طور گسترده برای مطالعه‌ی پرتوهای گاما به کار رفته‌اند، آشکارسازی می‌شوند.



شکل (۱-۱): نمودار کارلسروهه (Karlsruhe) که هسته‌های پرتوزا و نوع واپاشی آن‌ها را نشان می‌دهد (از مرجع ۸).

۲-۱ اصول کار دستگاه‌های آشکارساز

اصول کار اغلب دستگاه‌های آشکارساز مشابه است. تابش وارد آشکارساز می‌شود، با اتم‌های ماده آشکارساز برهمکنش می‌کند (اثر تابش بر ماده) و ذره ورودی بخشی از انرژی خود را صرف جداسازی الکترون‌های کم انرژی ماده آشکارساز از مدارهای اتمی خود می‌کند. این الکترون‌ها و یونش ایجاد شده جمع‌آوری می‌شود و توسط یک مدار الکترونیکی برای تحلیل به صورت یک تپ ولتاژ یا جریان در می‌آید.

۳-۱ تقسیم‌بندی آشکارسازها بر اساس ساز و کار تولید پاسخ

الف: اگر اثر الکتریکی داشته باشیم از آشکارساز گازی و آشکارساز نیمه‌هادی استفاده می‌شود.

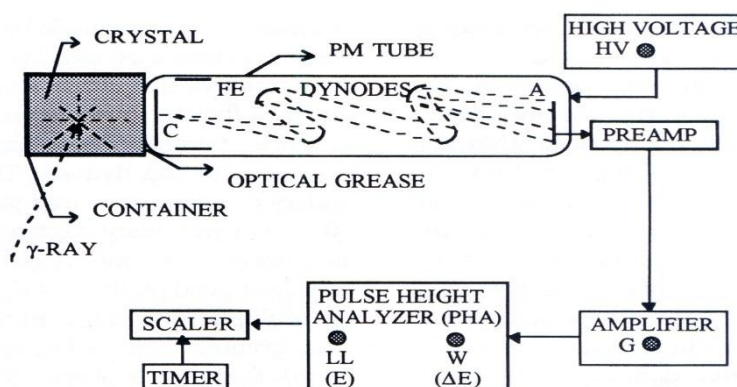
ب: اثر شیمیایی: دز سنج شیمیایی و فیلم عکاسی

ج: نورانی: شمارشگر سوسوزن، چرنکوف

د: گرمایی: گرماسنج

۴-۱ آشکارسازهای سوسوزن

سوسوزن‌ها^۸ مواد مایع، جامد و یا گازی شکل هستند که در اثر برخورد پرتو به آن‌ها نور تولید می‌گردد. مقدار نور تولید شده در هر فرایند سوسوزنی بسیار کوچک است و برای تولید تپ مناسب نیاز به تقویت دارد. لوله تقویتگر نوری^۹، نور کم دریافتی را پس از تبدیل به الکترون به شدت تقویت می‌کند. در شکل (۲-۱) به طور شماتیک یک شمارشگر سوسوزن، نمایش داده شده است که شامل ماده‌ی کرسیتال، لوله تقویتگر نوری شامل صفحه‌ی فتوکاتد (C) و تعدادی داینود (FE) برای تبدیل نور مرئی به جریان تقویت‌شده‌ای از الکترون‌ها، پیش تقویت‌کننده، تقویت‌کننده و قسمت‌های الکترونیکی نظیر انتخابگر ارتفاع تپ و شمارنده برای جمع‌آوری و تحلیل خودکار داده‌هاست.



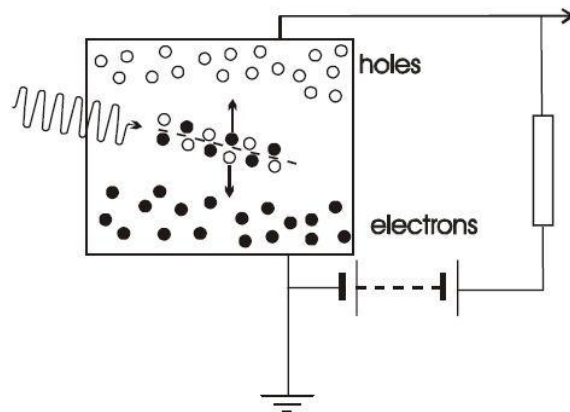
شکل (۲-۱): شکل یک شمارشگر سوسوزن

۵-۱ آشکارسازهای نیمه‌رسانا

این نوع آشکارسازها از یک اتصال p - n تشکیل شده‌اند. با اعمال یک ولتاژ معکوس، ناحیه‌ای تهی از حامل‌های بار در پیوند گاه به وجود می‌آید (ناحیه حساس آشکارساز). هنگامی که یک تابش گاما وارد ناحیه حساس آشکارساز می‌شود، در نتیجه برهمکنش آن با الکترون‌های داخل بلور زوج‌های الکترون - حفره تولید می‌شود. الکترون‌ها و حفره‌ها جمع می‌شوند و یک تپ الکتریکی در شمارشگر به وجود می‌آید (شکل ۳-۱).

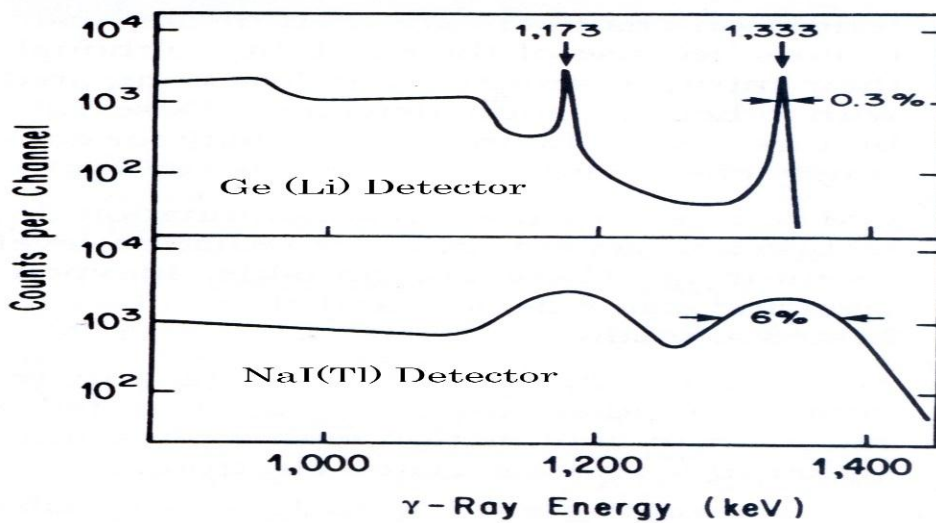
⁸ Scintillation

⁹ Photomultiplier Tube



شکل (۳-۱): شکل یک آشکارساز نیمه‌رسانا

دو تا از معمول‌ترین آشکارسازهای نیمه‌هادی، $Ge(Li)$ و $HPGe$ هستند. مزیت اصلی آشکارسازهای ژرمانیوم نسبت به آشکارسازهای سوسوزن، قدرت بالای تفکیک انرژی آن است. یک آشکارساز $Ge(Li)$ می‌تواند قدرت تفکیک انرژی ۰/۳ درصد در مقایسه با آشکارساز $NaI(Tl)$ با قدرت تفکیک ۶ درصد برای پرتوهای گامای ^{60}Co داشته باشد (شکل ۴-۱)



شکل (۴-۱): طیف حاصل از چشمه ^{60}Co

۶-۱ انگیزه و هدف انجام این پایان‌نامه

یکی از پارامترهای مهم در آشکارسازهای $HPGe$ بازده است که به شدت به هندسه و عوامل جذبی بستگی دارد؛ به طوری که با تغییر پیکربندی در هندسه‌ی نمونه - آشکارساز، نیاز به اندازه‌گیری مجدد بازده آشکارساز است. بی‌شک دقیق‌ترین راه برای تعیین بازده آشکارساز، اندازه‌گیری تجربی و استفاده از چشمه‌های استاندارد مخصوص

برای هر پیکربندی نمونه است. این روش مشکل، خسته کننده و درعین حال زمان بر است؛ بنابراین استفاده از روش شبیه سازی برای تخمین بازده آشکارساز که در زمان کم و با دقت خوب همراه است، ارزشمند است.

۱-۷ تاریخچه‌ی کارهای انجام شده

در گذشته بازده آشکارسازهای ژرمانیومی را با روش‌های مختلفی از جمله اندازه گیری‌های تجربی تعیین می کردند که دقیق ترین آن‌ها روش استفاده از یک چشمه‌ی با فعالیت معلوم است [۹,۱۰]. اخیراً بازده این آشکارسازها را با روش‌های شبیه سازی مونت کارلو تعیین می کنند که در این مورد عنوان برخی از مقالات در قسمت مراجع ذکر شده است [۱۱,۱۲,۱۳].

فصل دوم

برهمکنش اشعه گاما با ماده و مقدمه‌ای بر طیف نگاری

۲-۱ مقدمه

پرتوهای گاما و ایکس به دلیل نداشتن بار الکتریکی نمی‌توانند مانند ذرات باردار مستقیماً با ماده‌ی آشکارساز برهمکنش داشته و باعث یونش و برانگیزش شوند. اگر یک باریکه‌ی پرتو گاما از یک ماده عبور کند، هر پرتو گاما ممکن است بدون برهمکنشی با ماده، از آن خارج و یا اینکه توسط ماده جذب یا پراکنده شود. هر دو فرایند جذب و پراکندگی باعث یک تضعیف نمایی در پرتوهای گاما می‌شوند.

اگرچه برهمکنش‌هایی که باعث تضعیف پرتوهای گاما در ماده می‌شوند زیاد هستند [۱۴]، ولی سه برهمکنش فوتوالکتریک، کامپتون و تولید زوج نقش اصلی در تضعیف پرتوهای گاما دارند. اثر فوتوالکتریک در انرژی‌های پایین اشعه‌ی گاما غالب است (انرژی‌های حدود چند صد کیلو الکترون ولت) در حالی که تولید زوج در انرژی‌های بالا غالب است (حدود ۵-۱۰ مگا الکترون ولت). اثر کامپتون محتمل‌ترین رخداد بین گستره‌ی انرژی اثر فوتوالکتریک و تولید زوج است. این برهمکنش‌ها منجر به انتقال جزئی (اثر کامپتون) یا کامل انرژی اشعه‌ی گاما به الکترون‌های اتمی ماده شده و فوتون کاملاً نابود و یا در زاویه خاصی پراکنده می‌شود.

در این فصل ابتدا سه برهمکنش فوتوالکتریک، کامپتون و تولید زوج را مورد بحث قرار داده سپس اهمیت هر کدام را در ضریب تضعیف کل بیان می‌کنیم و در نهایت به بحث طیف نگاری اشعه‌ی گاما می‌پردازیم.