

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

دانشگاه بیرجند

دانشکده علوم

بررسی ترکیب ۲-((۴-متیل-۶-مورفالینو-۵-نیتروپیریمیدین-۲-ایل))  
آمینو) پروپانویک اسید جهت استفاده در دزیمتری الکترون های ۱۰ MeV به  
روش EPR.

**نگارش:** زهرا عسجدیان

**استادان راهنما:** آقای دکتر محمد مهدی فیروز آبادی

خانم دکتر قدسیه باقرزاده

**استاد مشاور:** آقای مهندس رضا امرایی

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در

**رشته فیزیک هسته‌ای**

شهریور ۹۱

تقدیم بہ ہمسفر بزرگوارم

غلام رضا صدیقی

## چکیده:

تکنیک طیف‌سنجی تشدید پارامغناطیسی الکترون بیش از شش دهه است که رادیکال‌های آزاد ایجاد شده در مواد را ارزیابی می‌کند. در این مطالعه، ترکیب ماده ۲- (۴-متیل-۶-مورفالینو-۵-نیتروپیریمیدین-۲-یل) آمینو پروپانویک اسید در معرض پرتوهای  $10\text{MeV}$  الکترون قرار گرفت تا به عنوان دزیمتر در سیستم دزیمتری EPR مورد ارزیابی قرار گیرد. پرتودهی نمونه‌ها در محدوده دز ۰,۵ تا ۴۰ کیلوگری انجام شد. اندازه‌گیری دز جذبی نمونه‌ها با دزیمتری آلانین مرجع انجام شد. پاسخ EPR نمونه‌های پرتودهی‌شده توسط دستگاه طیف‌سنجی EPR اندازه‌گیری شد. منحنی جواب دز برای نمونه‌هایی که با اشعه الکترون پرتودهی شده بودند رسم شد که نتیجه، یک رابطه تقریباً خطی بین سیگنال EPR و دز جذبی را نشان می‌داد. پایداری محصولات تولید شده در دز ۱۹,۷ کیلوگری در یک دوره ۲۰ روزه، مورد بررسی قرار گرفت. سیگنال EPR نمونه در ساعت اول پس از پرتودهی صد درصد بود اما پس از ۱۱ روز (با افت ۴۰ درصد) شدت سیگنال EPR پایدار شد، که نشان از پایداری تعداد رادیکال‌های مشتق شده از نمونه را می‌دهد. با توجه به پایداری محصول و منحنی جواب کالیبراسیون در بازه‌ی دز ۰,۵ تا ۴۰ کیلوگری، این ماده به عنوان یک دزیمتر روتین پذیرفته شد.

واژه‌های کلیدی: تشدید پارامغناطیسی الکترون، دزیمتری، پرتوهای الکترون  $10\text{ MeV}$ ، پیریمیدین، اسید آمینه

فصل اول: تئوری EPR

|   |    |
|---|----|
| مقدمه .....   | ۲  |
| ۱-۱- منبع سیگنال تشدید پارامغناطیسی الکترون .....                   | ۵  |
| ۲-۱- توزیع ماکسول - بولتزمن .....                                   | ۷  |
| ۳-۱- سیستم‌های مورد مطالعه در تشدید پارامغناطیسی الکترون .....      | ۸  |
| ۴-۱- شرایط تشدید .....  | ۹  |
| ۵-۱- ثبت طیف .....  | ۱۱ |
| ۱-۵-۱- روش موج پیوسته .....   | ۱۱ |
| ۲-۵-۱- روش پالسی .....  | ۱۲ |
| ۶-۱- پارامترهای طیف .....   | ۱۳ |
| ۱-۶-۱- g فاکتور .....   | ۱۴ |
| ۲-۶-۱- جفت شدگی فوق ریز .....                                       | ۱۶ |
| ۷-۱- پهنای خطی رزونانس .....  | ۱۸ |
| ۸-۱- شش قانون اساسی برای تفسیر طیف تشدید پارامغناطیسی الکترون ..... | ۱۸ |

**فصل دوم: دستگاه طیف متر EPR**

|   |    |
|---|----|
| ۱-۲ اجزای دستگاه طیف متر تشدید پارامغناطیسی الکترون ..... | ۲۲ |
| ۱-۱-۲- منبع تابش .....                                    | ۲۲ |
| ۲-۱-۲- هادی موج .....                                     | ۲۳ |
| ۳-۱-۲- تشدید کننده .....                                  | ۲۳ |
| ۴-۱-۲- آهن ربای مغناطیسی .....                            | ۲۶ |
| ۵-۱-۲- سیر کلاتور .....                                   | ۲۷ |

۲۷.....۱-۲-۶-قطعات اختیاری

۲۸.....۱-۲-۷-آشکارساز

۲۹.....۲-۲-آزمایش برجسب اسپین - اسپین

۲۹.....۳-۲ برخی از طیف مترها و ویژگی آنها

### فصل سوم: دزیمتری

۳۳.....مقدمه

۳۶.....۱-۳-تعاریف

۳۷.....۲-۳-کالیبراسیون

۳۷.....۳-۳-شرایط دزیمتر

۳۸.....۴-۳-انواع دزیمتر

۴۰.....۵-۳-شرایط محیطی

### فصل چهارم: روش کار

۴۲.....۱-۴-آماده سازی نمونه

۴۲.....۲-۴-اندازه گیری سیگنال زمینه

۴۳.....۳-۴-پرتودهی

۴۴.....۴-۴-دستگاه تشدید پارامغناطیسی الکترون و بهینه سازی پارامترهای آن

۴۵.....۵-۴-وابستگی دامنه به توان امواج مایکروویو

۴۷.....۶-۴-وابستگی دامنه به دز جذبی

۴۹.....۷-۴-بررسی پایداری پاسخ تشدید پارامغناطیسی الکترون

### فصل پنجم: نتایج

۵۱.....۱-۵-نتایج

۵۳.....۲-۵-پیشنهادات

۵۴.....مراجع

۵۹.....پیوست الف

## فهرست اشکال:

### فصل اول

- ۱-۱. اثر زمین..... ۵
- ۲-۱. رابطه بین میدان مغناطیسی و سطوح انرژی..... ۷
- ۳-۱. طیف CW EPR نمونه PSII..... ۱۲
- ۴-۱. طیف پالسی EPR نمونه PSII..... ۱۳
- ۵-۱. شبیه سازی طیف EPR رادیکال  $\text{CH}_3$ ..... ۱۶
- ۶-۱. شبیه سازی طیف EPR رادیکال  $\text{CH}_2(\text{OCH}_3)$ ..... ۱۷

### فصل دوم

- ۱-۲. طیف متر EPR..... ۲۱
- ۲-۲. نمای داخلی طیف متر EPR..... ۲۱
- ۳-۲. حفره تشدید کننده با موجبر متصل به آن..... ۲۵
- ۴-۲. طیف متر EPR..... ۲۶
- ۵-۲. طیف متر CW باند X..... ۳۰
- ۶-۲. طیف متر پالسی باند K..... ۳۰
- ۷-۲. طیف متر پالسی باند D..... ۳۱

### فصل سوم

- ۱-۳. طیف EPR دزیتر آلانین..... ۳۴
- ۲-۳. نمودار کالیبراسیون آلانین..... ۳۵

### فصل چهارم

- ۱-۴. طیف مشتق اول EPR نمونه قبل از پرتو دهی..... ۴۳

- ۴-۲. دستگاه EMS104 EPR.....۴۴
- ۴-۳. نمودار وابستگی شدت سیگنال به توان میکروویو.....۴۶
- ۴-۴. نمودار وابستگی شدت سیگنال به توان میکروویو با فیت خطی.....۴۷
- ۴-۵. نمودار کالیبراسیون نمونه.....۴۸
- ۴-۶. نمودار افت پاسخ EPR نمونه در یک دوره ۲۰ روزه.....۴۹

### فصل پنجم

- ۵-۱. طیف EPR نمونه پس از پرتودهی.....۵۱



## فهرست جداول

### فصل اول

۱-۱. فرکانس تقریبی امواج به همراه میدان متناظر آن در EPR ..... ۱۰

### فصل سوم

۱-۳. انواع دزیمتر مرجع ..... ۴۱

### فصل چهارم

۱-۴. پارامترهای بهینه ماده در دستگاه EPR ..... ۴۶

## فصل اول

نظریه‌ی تشدید پارامغناطیسی الکترون (EPR)

## مقدمه

تشدید پارامغناطیسی الکترون<sup>۱</sup> که تشدید اسپینی الکترون<sup>۲</sup> نیز نامیده می شود، بر پایه‌ی جذب تشدید انرژی امواج مایکرو<sup>۳</sup> در گونه‌های پارامغناطیسی که در حضور یک میدان مغناطیسی قوی، قرار گرفته‌اند بنا نهاده می‌شود.

اولین آزمایش تشدید پارامغناطیسی الکترون، ۶۰ سال قبل توسط یوگان زاویسکی<sup>۴</sup> در دانشگاه کازان شوروی سابق روی نمونه  $\text{CuCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  انجام گرفت. [۱] با این که بیش از پنج دهه از اولین آزمایش تشدید پارامغناطیسی الکترون نمی‌گذرد، اما در علوم مختلفی همچون زیست‌شناسی، شیمی، زمین‌شناسی، علم مواد و ..... پیشرفت چشمگیری داشته است. در نیمه دوم قرن بیستم به بعد، شاهد آزدادن مواد رادیو اکتیو از تاسیسات صنعتی، فعالیت‌های

---

Electron Paramagnet Resonance(EPR)<sup>۱</sup>  
Electron Spin Resonance(ESR)<sup>۲</sup>  
Microview<sup>۳</sup>  
Yougan Zavisky<sup>۴</sup>

نظامی و.....هستیم، این وقایع منجر به این شد که طیف وسیعی از مردم در معرض یونیزاسیون حاصل از تابش مواد رادیواکتیو قرار بگیرند. وجود ۴۰۰ حادثه تابشی از سال ۱۹۴۴-۲۰۰۰ حدود سه هزار نفر را در معرض خطر قرار داد. علاوه بر این دهها هزار نفر در هیروشیما، ناکازاکی، حوضه رودخانه تچا<sup>۱</sup> و تاسیسات مایاک<sup>۲</sup> در معرض تابش قرار گرفتند. تاریخ نشان داده است با تمام اقدامات احتیاطی به عمل آمده حوادث غیر قابل اجتناب است. این تابشها باعث بوجود آمدن رادیکالها در مواد، انسانها و حتی گیاهان می شود. به منظور نظارت بر رادیکالهای آزاد (رادیکالها اتمها، ملکولها و یونهایی هستند که الکترون جفت نشده دارند) نسبتا پایداری که پس از پرتودهی در مواد ایجاد می شود از طیفسنجی تشدید پارامغناطیسی الکترون استفاده می شود.

یکی از نقشهای اساسی هر طیفسنجی شناسایی عناصر شیمیایی در حال مطالعه است. در مواردی که بیش از دو نوع گونه پارامغناطیسی وجود داشته باشد خطوط طیف تشدید پارامغناطیسی الکترون ناشی از هر کدام از گونهها می تواند به طور همزمان مشاهده شود. غالبا شناسایی هر کدام از گونههای منحصر به فرد از شناسایی طیف تشدید پارامغناطیسی الکترون حاصل می شود. به علاوه طیفسنجی تشدید پارامغناطیسی الکترون قادر به ارائه جزئیات ساختاری ملکولهای غیر قابل دسترس برای هر ابزار تحلیلی دیگر است. [۲]

## مقایسه تشدید پارامغناطیسی الکترون با تشدید مغناطیسی هسته<sup>۱</sup>

تئوری تشدید پارامغناطیسی الکترون به طور معمول نقاط اشتراک زیادی با تشدید مغناطیسی هسته دارد، اما چون اکثریت ملکول‌ها الکترون جفت‌نشده ندارند از تشدید پارامغناطیسی الکترون مانند تشدید مغناطیسی هسته، استفاده نمی‌شود. گشتاور مغناطیسی اسپین الکترون به علت تفاوت جرمی هسته –

الکترون طبق فرمول زیر [۳]

$$\mu = \frac{gq}{2m} I = \frac{gq\sqrt{j(j+1)}}{2m} \frac{h}{2\pi} = \frac{gqh}{4\pi m} \sqrt{j(j+1)} \quad \text{Am}^2 \quad (1-1)$$

که در آن  $q$  و  $m$  به ترتیب بار و جرم الکترون هستند، حدود هزار برابر بزرگتر از گشتاور مغناطیسی هسته است. بنابراین حساسیت شناسایی تشدید پارامغناطیسی الکترون بسیار بیشتر از تشدید مغناطیسی هسته خواهد بود و این بسیار خوشحال‌کننده است، زیرا غلظت الکترون‌های جفت‌نشده اغلب به میزان قابل ملاحظه‌ای پایین است.

## ۱-۱- منبع سیگنال تشدید پارامغناطیسی الکترون:

الکترون ذره بارداری است با گشتاورزاویه ای (اوربیتالی و اسپینی) و با اسپین خود پارامغناطیس بوده و دارای گشتاور مغناطیسی می‌باشد. همچنین الکترون مانند پروتون در یک میدان مغناطیسی اعمال شده دارای حرکت تقدیمی با یک فرکانس تقدیمی دقیق است و اگر انرژی را با فرکانس صحیحی به کار بریم انتقالات بین حالت اسپینی (جهت اسپین) را انجام خواهد داد. گشتاور مغناطیسی می‌تواند توسط برهم کنش آن با میدان مغناطیسی آشکار شود. در میدان صفر، گشتاور مغناطیسی الکترون‌های جفت نشده در یک نمونه، به طور تصادفی جهت گیری کرده‌اند اما در حضور یک میدان مغناطیسی  $B$ ، گشتاور الکترون‌ها نسبت به میدان به کار برده شده به اندازه  $2s+1$  حالت انرژی ایجاد می‌نمایند (شکافتگی زیمان).

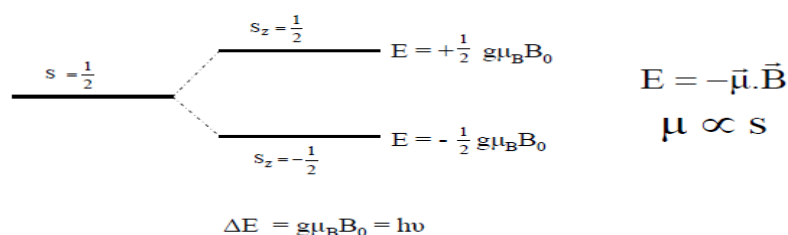
انرژی یک گشتاور الکترونی در یک میدان مغناطیسی از رابطه زیر به دست می‌آید: [۴]

$$E = g_e \mu_B B m_s \quad (۲-۱)$$

می‌دانیم هر الکترون دارای یک عدد کوانتومی اسپینی  $s=1/2$  می‌باشد که اگر



### ❖ Zeeman Effect



شکل ۱-۱ اثر زیمن

در حضور یک میدان مغناطیسی قرارگیرد که موازی با میدان مغناطیسی باشد مولفه مغناطیسی آن یعنی  $m_s = -1/2$  و اگر پادموازی با آن باشد  $m_s = 1/2$  خواهد بود که در این صورت هر کدام

انرژی خاص خود را دارد. که بر خلاف تشدید مغناطیسی هسته پایین ترین انرژی را حالت  $m_s = -\frac{1}{2}$

خواهد داشت زیرا علامت بار بر روی الکترون مخالف علامت بار پروتون است. شکل (۱-۱)

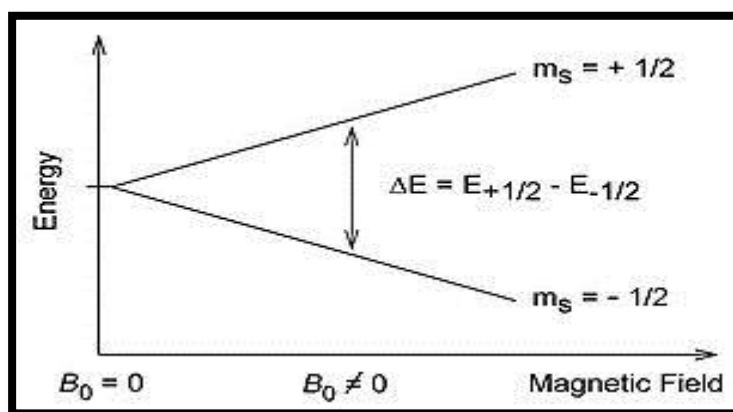
اختلاف انرژی بین دو سطح انرژی بالا و پایین طبق معادله (۲-۱) برابر است با:  $\Delta E = g_e \mu_\beta B$

که  $g_e$  را  $g$  فاکتور می نامند.  $\mu_\beta$  مگنتون بوهر هسته و برابر با  $9.27 \times 10^{-21}$  erg/gauss و  $B$  قدرت میدان مغناطیسی است. این معادله بیانگر آنست که فاصله بین سطوح انرژی متناسب با قدرت میدان مغناطیسی است که در شکل ۱-۲ ملاحظه می شود.

یک الکترون جفت نشده می تواند با جذب یا پراکندگی تابش الکترومغناطیسی که انرژی  $E = h\nu$  دارد بین سطوح انرژی حرکت کند. حال اگر  $\Delta E = h\nu$  (اختلاف انرژی سطوح) آنگاه شرایط رزونانس<sup>۱</sup> اتفاق می افتد. با جایگزینی معادله (۲-۱) در  $E = h\nu$  به معادله (۳-۱) معادله بنیادی طیف سنجی تشدید پارامغناطیسی الکترون می رسیم.

$$h\nu = g_e \mu_\beta B \quad (3-1)$$

این معادله اساس تکنیک طیف سنجی را تشکیل می دهد: جهش اسپین الکترونی بین ترازهای انرژی (که با دقت کمتر به تغییر اسپین اشاره می شود) با نشر یا جذب انرژی به شکل تابش و با فرکانس داده شده، توسط معادله (۲-۱)، همراه است. شدت جذب تشدید پارامغناطیسی الکترون متناسب با غلظت رادیکال های آزاد یا ماده پارامغناطیس موجود می باشد. بنابراین این تکنیک را می توان برای تخمین مقدار رادیکال های آزاد موجود به کار برد.



شکل ۲-۱ نمودار رابطه بین میدان مغناطیسی و سطوح انرژی

## ۲-۱- توزیع ماکسول - بولتزمن

اگر نمونه‌های تشدید پارامغناطیسی الکترون شامل مجموعه بسیاری از گونه‌های پارامغناطیسی باشد و جمعیت رادیکال‌ها در تعادل ترمودینامیکی باشد توزیع آماری آنها با معادله ماکسول-بولتزمن (معادله (۴-۱)) بیان می‌شود. [۵]

$$\frac{n_{upper}}{n_{lower}} = e^{\left(-\frac{E_{upper}-E_{lower}}{kT}\right)} = e^{\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right)} = e^{\left(-\frac{\epsilon}{kT}\right)} = e^{\left(-\frac{h\nu}{kT}\right)} \quad (4-1)$$

$n_{upper}$  تعداد گونه‌های پارامغناطیسی است که سطح انرژی بالا را اشغال کرده‌اند.  $k$  ثابت بولتزمن و  $T$  بر حسب کلوین است. به عنوان مثال در دمای ۲۹۸ کلوین و باند  $x$  که فرکانس امواج ۹,۷۵ گیگاهرتز است،  $\frac{n_{upper}}{n_{lower}} = 0.998$  که نشان می‌دهد سطح انرژی پایین‌تر، جمعیت بیشتری دارد، بنابراین انتقال از سطح پایین به بالا احتمال زیادتری دارد تا از بالا به پایین، که یک جذب خالص انرژی خواهیم داشت. به هر حال از آن جا که حالت پایین‌تر (در تعادل حرارتی و غیاب تابش) اندکی از حالت بالاتر پرجمعیت‌تر است، بنابراین جهش‌های به طرف بالا اندکی بیشتر بوده و یک جذب محض (اگر چه خیلی کم) انرژی از پرتو تابش



حادث می‌شود. زمانی که جمعیت دو حالت یکسان شد، احتمال جهش‌های به طرف بالا یا احتمال جهش‌های به طرف پایین مساوی شده و جذب بیشتر نمی‌تواند حادث گردد و گفته می‌شود سیستم اشباع شده است. اگر سیستم انرژی جذب شده را از دست دهد، جمعیت تعادلی می‌تواند مجدداً برقرار گردد. این به طور خود به خود میسر نیست و تنها از طریق تاثیر متقابل با تابش، یا با متلاطم شدن میدان مغناطیسی در مجاورت هسته امکان پذیر می‌شود. انرژی نشر شده را می‌توان جمع‌آوری و به عنوان طیف نشری نمایش داد. [۶]

### ۱-۳- سیستم‌های مورد مطالعه در تشدید پارامغناطیسی الکترون

#### شامل:

۱. رادیکال‌های آزاد در فازهای جامد، مایع و گاز.

تمامی مواد یا محلولهایی که در لایه آخر انرژی خود دارای تعداد فردی از الکترون هستند؛ اسپین غیر صفر داشته و به مواد پارامغناطیس معروف می‌باشند. زیرا هر لایه انرژی یا به عبارت دیگر هر حالت کوانتومی خاص، می‌تواند دارای دو الکترون با اسپینهای مخالف جهت باشد. به طوریکه اسپین کل آن حالت (طبق اصل طرد پاولی) صفر شود. اما اگر در یک لایه انرژی تعداد فردی الکترون داشته باشیم، یک زیر لایه این حالت دارای تک الکترون خواهد بود و این الکترون دارای اسپین خالص  $S = 1/2$  و مولفه  $Z$  اسپینی ( $S_Z = +1/2$  یا  $S_Z = -1/2$ ) خواهد بود. بنابراین اسپین کل سیستم اصطلاحاً صفر نبوده و دارای مقدار خاصی خواهد بود. برای مثال اتم هیدروژن  $H$ ، هیدروکسیل  $HO$ ، متیل  $H_3C$ .

۲. یون‌های انتقالی (یون‌های اکتینیدی) که ۵ تا ۶ الکترون جفت‌نشده دارند.

۳. ناخالصی یونی در جامدات: شناخته‌ترین این گونه، جامدات  $F$  مرکز هستند.

تعداد الکترونهای گرفته شده توسط یک گیرنده و یا تعداد الکترونهای از دست داده شده به

وسیله‌ی یک ناخالصی اهدا کننده، می‌توانند در تشدید پارامغناطیسی الکترون مشخص شوند.

۴. سیستم‌هایی با یک بیش از یک الکترون جفت‌نشده: یون‌هایی که در دسته دوم جای نمی‌گیرند، شامل:

الف) دورادیکالی‌ها: این سیستم‌ها دو الکترون جفت‌نشده دارند و از هم به قدری دورند که بر هم کنش ضعیفی با هم دارند.

ب) چند رادیکالی‌ها: بیش از دو الکترون جفت‌نشده دارند.

۵. رساناها: سیستمی با الکترون‌های ظرفیت.

### ۱-۴-شرایط تشدید:

باتوجه به معادله اساسی طیف سنجی ( $h\nu = g_e \mu_B B$ ) ، دو راه برای انجام آزمایش تشدید پارامغناطیسی الکترون وجود دارد:

الف) میدان مغناطیسی ثابت و فرکانس متغیر باشد. در این روش زمانی که فرکانس در شرایط رزونانس قرار می‌گیرد، جذب امواج روی می‌دهد و می‌توانیم خط‌های جذبی در طیف تشدید پارامغناطیسی الکترون را مشاهده کنیم.

ب) فرکانس ثابت و شدت میدان مغناطیسی متغیر است. در این مورد جذب زمانی مشاهده می‌شود که شدت میدان مغناطیسی در فرکانس  $\nu_0$  به شرایط رزونانس برسد.

هر خط جذبی یک فرکانس دارد اما جذب مایکروویو در یک محدوده میدان مغناطیسی اتفاق می‌افتد. به منظور مشاهده رزونانس، فرکانس امواج باید با تقسیمات حالت‌های انرژی اسپینی که با قدرت میدان مغناطیسی تعیین می‌شود، متناظر باشد. به این ترتیب قدرت میدان مغناطیسی وابسته به فرکانس است و برعکس. در جدول ۱-۱ فرکانس امواج به همراه میدان مغناطیسی آورده شده است.

جدول ۱-۱ فرکانس تقریبی امواج به همراه میدان متناظر مربوطه.

| Waveband            | L    | S    | C    | X    | P    | K    | Q    | U   | V   | E   | W   | F   | D   | —   | J    | —    |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|
| $\lambda/\text{mm}$ | 300  | 100  | 75   | 30   | 20   | 12.5 | 8.5  | 6   | 4.6 | 4   | 3.2 | 2.7 | 2.1 | 1.6 | 1.1  | 0.83 |
| $\nu/\text{GHz}$    | 1    | 3    | 4    | 10   | 15   | 24   | 35   | 50  | 65  | 75  | 95  | 111 | 140 | 190 | 285  | 360  |
| $B_0/\text{T}$      | 0.03 | 0.11 | 0.14 | 0.33 | 0.54 | 0.86 | 1.25 | 1.8 | 2.3 | 2.7 | 3.5 | 3.9 | 4.9 | 6.8 | 10.2 | 12.8 |

به هر فرکانس یک نوار یا باند گفته می‌شود. اولین مشاهده رزونانس مغناطیسی الکترون در باند S دیده شد. با این حال در چند دهه‌ی گذشته عامل‌های طیف‌متر در محدوده فرکانس‌های بالا مورد استفاده واقع شدند که به اعمال قدرت میدان بیشتری نیاز است. طیف‌سنجی تشدید پارامغناطیسی الکترون یا تشدید اسپینی الکترون تکنیکی برای مطالعه نوعی از عناصر شیمیایی است که یک یا چند الکترون جفت‌نشده دارند. به طور کلی طیف تشدید پارامغناطیسی الکترون با فوتون‌های فرودی که قدرت میدان مغناطیسی متفاوت و فرکانس یکسان دارند شکل می‌گیرد. دو فرکانس معمول در محدوده فرکانس

باند X- (۹۵۰۰ MHz یا ۹/۵ گیگاهرتز) که قدرت میدانی حدود ۳۴۰۰ گوس اعمال می‌شود و فرکانس باند Q- (۳۵ GHz) که قدرت میدان به کار رفته ۱۲۵۰۰ گوس است، می‌باشند. اما به طور کلی از فرکانس باند X بیشتر استفاده می‌شود، زیرا این فرکانس در دسترس تر و همچنین می‌تواند میدان بالای یک تسلا ایجاد کند. [۷]

### ۱-۵- ثبت طیف:

طیف تشدید پارامغناطیسی الکترون، نمودار جذب (یا مشتق جذبی) انرژی تابشی میکروویو بر حسب قدرت میدان مغناطیسی (یا فرکانس) است.

دو روش برای ثبت طیف تشدید پارامغناطیسی الکترون وجود دارد:

#### ۱-۵-۱- روش موج پیوسته<sup>۱</sup>

در روش موج پیوسته نمونه به طور پیوسته با امواجی که فرکانس ثابتی دارند نوردهی می‌شوند و برای مشاهده تغییرات جذبی امواج، قدرت میدان مغناطیسی کنترل می‌شود. روش موج پیوسته بنیادی ترین آزمایش انجام شده است. برای مثال، شکل زیر طیف یک نمونه (PSII) را نشان می‌دهد که در باند (X) گرفته شده است. نمونه (PSII) عایق بندی شده، یک ترکیب پروتئینی درگیر در فتوسنتز است. [۸] توجه کنید که محور (X) قدرت میدان مغناطیسی را نشان می‌دهد. محور (Y) مشتق واحدهای جذبی را در واحدهای دلخواه نشان می‌دهد. در این روش امواج با شدت کم به نمونه تابیده می‌شود. نمودار مشتق جذبی بر حسب شدت میدان مغناطیسی رسم می‌شود. در صورتی که خطوط جذبی پهن باشند نمایش مشتقی، ویژگی‌های طیف را بهتر نمودار می‌سازد.

---

<sup>۱</sup> Continue wave (cw)