

رسالة محمد



دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی

دانشکده علوم پایه

**پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد (M.Sc.)
گرایش: اتمی - مولکولی**

موضوع:

**مطالعه پاسخ EPR نانو بلور هیدروکسی اپتایت دوپه شده با کربن
به روش بمباران یونی**

استاد راهنما:

جناب آقای دکتر فرهود ضیایی

استاد مشاور:

جناب آقای دکتر مجید مجتهدزاده لاریجانی

پژوهشگر:

بیبا بقالزاده

تابستان ۱۳۹۱

بسمه تعالی

تعهد نامه اصالت پایان نامه کارشناسی ارشد

اینجانب بیتا بقال زاده دانشجوی کارشناسی ارشد فیزیک

با شماره دانشجویی ۸۹۰۶۶۵۲۰۷۰۰ اعلام می نمایم که کلیه مطالب مندرج در این پایان نامه با عنوان:

مطالعه پاسخ **EPR** نانو بلور هیدروکسی اپتایت دوپه شده با کربن به روش بمباران یونی حاصل کار پژوهشی خود بوده و چنانچه دستاوردهای پژوهشی دیگران را مورد استفاده قرار داده باشم، طبق ضوابط و رویه های جاری، آنرا ارجاع داده و در فهرست منابع و مآخذ ذکر نموده ام. علاوه بر آن تاکید می نماید که این پایان نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم سطح، پایین تر یا بالاتر ارایه نشده و چنانچه در هر زمان خلاف آن ثابت شود، بدینوسیله متعهد می شوم، در صورت ابطال مدرک تحصیلی ام توسط دانشگاه، بدون کوچکترین اعتراض آنرا بپذیرم.

تاریخ و امضا

بسمه تعالی

در تاریخ : ۱۳۹۱/۰۷/۰۴
دانشجوی کارشناسی ارشد خانم بیبا بقال زاده از پایان نامه خود دفاع
نموده و با نمره بحروف
و با درجه مورد تصویب قرار گرفت.

امضاء استاد راهنما

تقدیم به پدر عزیزم:

به پاس تعبیر عظیم و انسانی اش از کلمه ایثار و از خود گذشتگی
به پاس عاطفه سرشار و گرمای امید بخش وجودش که در این سردترین
روزگاران بهترین پشتیبان است
و به پاس محبت های بی دریغش که هرگز فروکش نمی کند.

تشکر و قدر دانی:

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمتهای او ندانند.

از استاد فرهیخته و فرزانه جناب آقای دکتر فرهود ضیایی که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این پروژه را بر عهده گرفتند؛

از استاد بزرگوار و گرامی جناب آقای دکتر مجید مجتهدزاده که زحمت مشاوره این پروژه را متقبل شدند؛

کمال تشکر و قدردانی را دارم.

باشد که این خرد ترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

در پایان از اعضاء محترم هیئت علمی، کارشناسان و تکنسین های آزمایشگاه های پژوهشکده کشاورزی، پزشکی و صنعتی کرج سپاسگزارم.

باسمه تعالی
دانشکده علوم پایه

نام واحد دانشگاهی : تهران مرکزی کد واحد: ۱۰۱	کد شناسایی پایان نامه : ۱۰۱۳۰۲۱۰۹۰۱۰۰۱
نام و نام خانوادگی دانشجو: بیتا بقال زاده شماره دانشجویی: ۸۹۰۶۶۵۲۰۷۰۰	سال و نیمسال اخذ پایان نامه: نیمسال دوم ۸۹-۹۰ رشته تحصیلی: فیزیک - اتمی مولکولی
عنوان پایان نامه کارشناسی ارشد: مطالعه پاسخ EPR نانو بلور هیدروکسی اپتایت دوپه شده با کربن به روش بمباران یونی	
نام و نام خانوادگی استاد راهنما: دکتر فرهود ضیایی نام و نام خانوادگی استاد مشاور: دکتر مجید مجتهد زاده لاریجانی	
تعداد واحد پایان نامه: ۶	نمره پایان نامه دانشجو (از ۱۸ نمره)
تاریخ صدور کد شناسایی: ۹۰/۷/۲۵	به عدد: به حروف:
تاریخ دفاع از پایان نامه: ۹۱/۰۷/۰۴	نمره مقاله دانشجو (از ۲ نمره)
تاریخ ارائه مقاله:	به عدد: به حروف:
<p>چکیده پایان نامه (شامل خلاصه، اهداف، روش های اجرا و نتایج به دست آمده):</p> <p>هیدروکسی اپتایت یا عبارتی کلسیم فسفات هیدروکسی اپتایت با نام معدنی هیدروکسیل اپتایت بیوسرامیکی است با فرمول استوکیومتری $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$. در طی روند معدنی شدن هیدروکسی اپتایت بیولوژیکی، یونهای کربنات در شبکه بلوری شرکت می کنند و جایگزین یونهای فسفات و هیدروکسیل می شوند. با جذب انرژی یونش توسط بلور هیدروکسی اپتایت، یونهای کربنات الکترون آزاد را به دام می اندازند و مراکز رادیکالهای آزاد تشکیل می شوند که فوق العاده پایدارند. روش EPR (تشدید پارامغناطیسی الکترون) به عنوان یک روش بسیار حساس برای آشکار سازی و اندازه گیری رادیکالهای آزاد است. به منظور تهیه کربن اپتایت در این پروژه، نمونه های هیدروکسی اپتایت به صورت مستقیم در زمانهای متفاوت توسط یونهای گاز CO_2^+ با انرژی 80 keV تحت بمباران قرار گرفته و یونهای CO_2^+ وارد شبکه بلوری هیدروکسی اپتایت گردیدند. پس از بمباران نمونه ها به جهت مشخصه یابی تحت آزمایشهای متفاوت FTIR، XRD قرار گرفته و به منظور بررسی ریز ساختاری تصاویر TEM آنها نیز تهیه گردید. پس از تهیه نمونه های کربن اپتایت با درصد کربن متفاوت، عملیات پرتو دهی در دزهای متفاوت انجام و نهایتاً تحت آزمون EPR قرار گرفت. منحنی شدت سیگنال EPR نمونه ها بر حسب دز جذبی پرتو، رسم و مورد مقایسه قرار گرفته است.</p>	

نظر استاد راهنما برای چاپ در پژوهش نامه دانشگاه مناسب است
مناسب نیست

تاریخ و امضاء

چکیده:

هیدروکسی اپتایت یا بعبارتی کلسیم فسفات هیدروکسی اپتایت با نام معدنی هیدروکسیل اپتایت بیوسرامیکی است با فرمول استوکیومتری $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$. در طی روند معدنی شدن هیدروکسی اپتایت بیولوژیکی، یونهای کربنات در شبکه بلوری شرکت می کنند و جایگزین یونهای فسفات و هیدروکسیل می شوند. با جذب انرژی یونش توسط بلور هیدروکسی اپتایت، یونهای کربنات الکترون آزاد را به دام می اندازند و مراکز رادیکالهای آزاد تشکیل می شوند که فوق العاده پایدارند. روش EPR (تشدید پارامغناطیسی الکترون) به عنوان یک روش بسیار حساس برای آشکار سازی و اندازه گیری رادیکالهای آزاد است. به منظور تهیه کربن اپتایت در این پروژه، نمونه های هیدروکسی اپتایت به صورت مستقیم در زمانهای متفاوت توسط یونهای گاز CO_2^+ با انرژی keV 80 تحت بمباران قرار گرفته و یونهای CO_2^+ وارد شبکه بلوری هیدروکسی اپتایت گردیدند. پس از بمباران نمونه ها به جهت مشخصه یابی تحت آزمونهای متفاوت FTIR، XRD قرار گرفته و به منظور بررسی ریز ساختاری تصاویر TEM آنها نیز تهیه گردید. پس از تهیه نمونه های کربن اپتایت با درصد کربن متفاوت، عملیات پرتودهی در دزهای متفاوت انجام و نهایتاً تحت آزمون EPR قرار گرفت. منحنی شدت سیگنال EPR نمونه ها بر حسب دز جذبی پرتو، رسم و مورد مقایسه قرار گرفته است.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول
۱	آشنایی با روش طیف سنجی EPR
۱	۱-۱ مقدمه
۳	۲-۱ مبانی نظری EPR
۴	۱-۲-۱ آزمایش اشترن - گرلاخ
۶	۲-۲-۱ رادیکال های آزاد
۷	۳-۲-۱ اثر زیمن
۹	۴-۲-۱ اصول فیزیکی تشدید
۱۳	۳-۱ آشنایی با دستگاه طیف سنجی EPR
۱۴	۱-۳-۱ حفره EPR
۱۷	۲-۳-۱ نکات مهم در مورد تحلیل نمونه با دستگاه EPR
۱۸	۱-۴ کاربرد های دستگاه EPR
۱۸	۵-۱ آشکارسازی مواد غذایی پرتو دیده
۱۷	۶-۱ دزیمتری
۲۱	فصل دوم
۲۱	مبانی نظری پدیده کاشت یون
۲۱	۱-۲ مقدمه
۲۱	۲-۲ فرآیند کاشت یون

۲۲.....	۳-۲ برهم کنش یون با ماده
۲۳.....	۴-۲ تتوری کاشت یون
۲۴.....	۵-۲ مزایای کاشت یون
۲۵.....	۶-۲ معایب کاشت یون
۲۵.....	۷-۲ کاربردهای کاشت یون
۲۶.....	۸-۲ پدیده کانال زنی یون
۲۸.....	۹-۲ آشنایی با دستگاه کاشت یون
۲۹.....	۱-۹-۲ چشمه کاشت یون
۳۱.....	۲-۹-۲ چشمه پراکنش یونی
۳۱.....	۳-۹-۲ چشمه پرتوالکترونی
۳۱.....	۴-۹-۲ چشمه یونی با انرژی کم و جریان بالا
۳۱.....	۵-۹-۲ سیستم خلاء
۳۲.....	۶-۹-۲ پایه چرخان و اندازه گیری جریان
۳۲.....	۷-۹-۲ سیستم خنک کننده
۳۳.....	فصل سوم
۳۳.....	هیدروکسی اپتایت
۳۳.....	۱-۳ مقدمه
۳۴.....	۲-۳ کاربردهای هیدروکسی اپتایت
۳۵.....	۳-۳ روش های تولید هیدروکسی اپتایت
۳۶.....	۴-۳ کرین دار کردن هیدروکسی اپتایت
۳۷.....	فصل چهارم

۳۷	روش های تجربی
۳۷	۱-۴ تهیه کلسیم اپتایت به روش کاشت یون Co^{+2}
۳۷	۲-۴ عملیات بمباران
۳۹	۳-۴ طیف سنجی پراش پرتو ایکس (XRD)
۴۱	۴-۴ طیف سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR)
۴۳	۵-۴ میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)
۴۵	۶-۴- پرتو دهی نمونه ها توسط چشمه گاما
۴۷	۶-۴ اندازه گیری توسط دستگاه (EPR)
۴۸	۸-۴ دستگاه کاشت یون MBM100
۵۰	فصل پنجم
۵۰	نتایج و بحث
۵۰	۱-۵ مشخصه یابی نمونه های HAP تهیه شده
۵۹	فصل ششم
۵۹	نتیجه گیری
۶۰	پیوست
۶۶	مراجع و منابع
۶۶	منابع فارسی
۶۷	منابع انگلیسی

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۳	شکل ۱-۱ گذر متناسب با انرژی الکترومغناطیس جذب شده
۶	شکل ۲-۱ شکل آهنربای به کار رفته در آزمایش اشترن گرلاخ
۸	شکل ۳-۱ جهت‌های بیشینه و کمینه انرژی مربوط به جهت‌گیری μ در میدان مغناطیسی B
۸	شکل ۴-۱ جداشدگی ترازهای انرژی اسپینی در میدان مغناطیسی خارجی
۱۰	شکل ۵-۱ نمودار احتمال جذب بر حسب بسامد
۱۱	شکل ۶-۱ تغییرات تراز انرژی اسپین به صورت تابعی از میدان مغناطیسی به کار رفته
۱۳	شکل ۷-۱ ساده‌ترین طیف‌سنج
۱۴	شکل ۸-۱ نمای عمومی یک طیف سنج EPR
۱۵	شکل ۹-۱ وان ماکروویو منعکس شده از حفره تشدید
	شکل ۱-۲ مقایسه توزیع عمق اتم‌های کاشته شده با یون‌هایی با جرم‌های مختلف نسبت به زیر لایه، در یک هدف آمورف (الف) وقتی عدد جرمی یون بمباران کننده از عدد جرمی ماده هدف کمتر باشد.
۲۳	(ب) وقتی عدد جرمی یون بمباران کننده از عدد جرمی نمونه بیشتر باشد
	شکل ۲-۲ نمایش شماتیکی مقایسه بینظمی ایجاد شده در اثر کاشت یون، تحت دزهای بالا و پایین
۲۴	
۲۸	شکل ۳-۲ برخورد کره‌های سخت
۳۰	شکل ۴-۲ تصویر میدان مغناطیسی مولتی کاسپ
۳۰	شکل ۵-۲ چگونگی عملکرد یک چشمه یونی
۴۱	شکل ۱-۴ تصویر دستگاه XRD واقع در پژوهشکده کشاورزی، پزشکی، صنعتی کرج
۴۳	شکل ۲-۴ تصویر دستگاه FTIR موجود در پژوهشکده کشاورزی، پزشکی، صنعتی کرج
۴۵	شکل ۳-۴ تصویر دستگاه TEM واقع در پژوهشکده کشاورزی، پزشکی، صنعتی کرج

- شکل ۴-۴ تصویر چشمه گاما موجود در پژوهشکده کشاورزی، پزشکی، صنعتی کرج..... ۴۶
- شکل ۴-۵ تصویر دستگاه EPR و محل نمونه‌گذاری آن ۴۸
- شکل ۴-۶ تصویر دستگاه کاشت یون MBM-100 ۴۹
- شکل ۵-۱ نمودار FIIR مربوط به HAP قبل و بعد از ۲۴ دقیقه بمباران ۵۰
- شکل ۵-۲ منحنی XRD ماده خام ۵۱
- شکل ۵-۳ منحنی XRD برای کاشت یون ۴ دقیقه ۵۲
- شکل ۵-۴ منحنی XRD برای کاشت یون ۸ دقیقه ۵۳
- شکل ۵-۵ منحنی XRD برای کاشت یون ۱۶ دقیقه ۵۳
- شکل ۵-۶ منحنی XRD برای کاشت یون ۲۴ دقیقه ۵۴
- شکل ۵-۷ طیف مقایسه‌ای XRD نمونه‌های بمباران شده و قبل از بمباران ۵۴
- شکل ۵-۸ تصویر TEM نمونه هیدروکسی اپتایت قبل از بمباران ۵۶
- شکل ۵-۹ تصویر TEM نمونه هیدروکسی اپتایت بعد از ۲۴ دقیقه بمباران ۵۶
- شکل ۵-۱۰ پاسخ EPR برای هیدروکسی اپتایت قبل و بعد از بمباران بر حسب زبان بمباران ۵۸
- شکل ۵-۱۱ پاسخ EPR برای هیدروکسی اپتایت قبل و بعد از بمباران بر حسب دز ۵۸

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۳۸.....	جدول ۴-۱ پارامترهای موثر هنگام عملیات بمباران نمونه‌ها با گاز CO ₂ در مدت زمان‌های متفاوت
۳۹.....	جدول ۴-۲ ارتباط بین زمان کاشت و دز کاشت
۵۵.....	جدول ۵-۱ تغییرات ارتفاع FWHM وضعیت پیک ۰۰۲ در نمونه‌های قبل و بعد از بمباران
۵۷.....	جدول ۵-۲ میانگین سایز نمونه های HAP بمباران شده در زمان های متفاوت

فصل اول

آشنایی با روش طیف سنجی EPR¹

۱-۱- مقدمه

تشدید پارامغناطیسی الکترون (EPR) یک فن طیف سنجی آشکار کننده مواد دارای الکترون های جفت نشده می باشد که اغلب آن را با نام تشدید اسپین الکترون (ESR²) نیز می شناسند. آزمایش تشدید پارامغناطیسی الکترون را می توان به صورت جذب تشدید انرژی ماکروویو در گونه های پارامغناطیس بوسیله گذار اسپین یک الکترون جفت نشده از یک تراز انرژی به تراز انرژی بعدی در حضور یک میدان مغناطیسی قوی تعریف کرد.

طیف سنجی EPR به دو روش پالسی و پیوسته انجام می شود که در این پروژه روش پیوسته مورد استفاده قرار گرفته است.

EPR یک فن تشدید مغناطیسی شبیه به NMR یا تشدید مغناطیسی هسته است. با این تفاوت که به جای گذارهای هسته ای در نمونه گذارهای الکترون جفت نشده را در میدان مغناطیسی مورد آشکارسازی قرار می دهد.

گشتاور دو قطبی مغناطیسی رفتار الکترون را به صورت یک آهنربای میله ای کوچکی در می آورد، که در حضور یک میدان مغناطیسی خارجی، الکترون های پارامغناطیس می توانند در ارتقای موازی بصورت هم جهت و خلاف جهت میدان مغناطیسی اعمال شده قرار گیرند. بدین سبب دو سطح انرژی مجزا برای الکترون های جفت نشده بوجود می آید، که در وهله ی اول تعداد الکترون هایی که در خلاف جهت میدان خارجی هستند بیشتر از الکترون های هم جهت است. با بکاربردن یک بسامد ثابت از تابش ماکروویو تعدادی از الکترون های سطح انرژی پایین به سطح انرژی بالا

¹- Electron Paramagnetic resonance

²- Electron Spin resonanc

برانگیخته می شوند. برای رخ دادن این گذار باید میدان مغناطیسی خارجی با یک قدرت خاص وجود داشته باشد. چنان که اختلاف سطح انرژی بین تراز بالا و پایین دقیقاً با بسامد ماکروویو هماهنگ باشد. برای رسیدن به چنین شرایطی مقادیر مختلف میدان مغناطیسی با ثابت نگه داشتن بسامد ماکروویو اعمال می شود و در شرایطی که میدان مغناطیسی و بسامد موج کاملاً منطبق باشند شرایط تشدید محقق می شود.

EPR تنها وسیله ای است که قادر به آشکارسازی الکترون های جفت نشده بصورت تمایزناپذیر می باشد. روش های دیگری چون روش فلورسانس ممکن است شواهد غیر مستقیمی از رادیکال های آزاد فراهم آورند ولی EPR دارای توانایی بی مانندی در شناسایی ویژگی پارامغناطیس است. نمونه های EPR نسبت به شرایط محیطی حساس هستند بنابراین قابلیت مشخص نمودن ساختار مولکولی نزدیک به الکترون جفت نشده را فراهم می آورند.

از طیف سنجی EPR برای آشکار سازی رادیکال های آزاد فعال با زمان بقای کم در حوزه زیست پزشکی¹ جهت شفاف نمودن نقش رادیکال های آزاد در مسمومیت ها به کار می رود، همچنین کاربرد دیگر آن در دزسنجی پرتو است که شامل اندازه گیری دز به کار رفته در سترون کردن وسایل پزشکی و آشکار نمودن مواد غذایی پرتو دیده است.

ESEEM و ENDOR دو روش EPR هستند که بر هم کنش الکترون با هسته های اطراف را اندازه گیری می کنند و روش های بسیار قدرتمندی برای بررسی ساختار قسمت های فعال پروتئین ها به شمار می روند.

¹ - Biomedical

۲-۱- مبانی نظری EPR

در نیمه اول قرن ۲۰ هنگامی که دانشمندان سعی در به کار بردن اصول مکانیک کوانتومی برای تشریح ساختار و ویژگی های اتم ها و مولکول ها داشتند، دریافتند که ساختار اتم ها و مولکول ها دارای سطوح گسسته ای است که هر یک با انرژی معینی متناظرند.

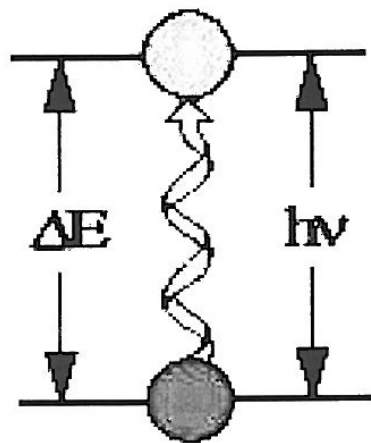
اسپکتروسکوپی به معنی اندازه گیری و یا تفسیر اختلاف انرژی بین تراز های اتم ها و مولکول هاست که با دانستن این اختلاف انرژی ها می توان به بصیرتی نسبت به ساختار دینامیک نمونه مورد مطالعه دست یافت. با استفاده از رابطه مهمی که بین اختلاف انرژی E و انرژی الکترو مغناطیس جذب شده وجود دارد امکان اندازه گیری E فراهم می گردد.

طبق قانون پلانک در امواج الکترو مغناطیس زمانی جذب رخ می دهد که:

$$E=h\nu \quad (1-1)$$

که در آن h ثابت پلانک و ν بسامد پرتو را تشکیل می دهد.

جذب انرژی سبب گذار حالت انرژی پایین تر به حالت انرژی بالاتر می شود (شکل ۱-۱).



شکل ۱-۱ گذر متناسب با انرژی الکترومغناطیس جذب شده

بسامد در بازه مگاهرتز برای NMR (تشدید مغناطیسی هسته) و امواج AM و FM تا نور مرئی و نور فرابنفش تغییر می کند و بسامد در بازه گیگاهرتز در آزمایش های EPR کاربرد دارد [10].

۱-۲-۱- آزمایش اشترن - گرلاخ

در سال ۱۹۲۲ اشترن و گرلاخ آزمایشی را انجام دادند که این آزمایش به صورت چشمگیری لزوم کنار گذاشتن مفاهیم مکانیک کلاسیک را نشان داد. ایده این آزمایش به شرح زیر است:

در ابتدا، اتمهای نقره (Ag) درون کوره گرم می شوند. کوره دارای سوراخ کوچکی است که اتمهای نقره می توانند از آن فرار کنند. سپس این اتمها در معرض یک میدان مغناطیسی غیر یکنواخت، قرار می گیرند. این میدان مغناطیسی توسط قطب های یک آهنربا که یکی از قطب های آن دارای لبه تیزی است، ایجاد می شود و سپس اثر میدان مغناطیسی روی اتمهای نقره بررسی می گردد.

اگر اتمهای نقره دارای گشتاور مغناطیسی μ باشند، انرژی آن ها در یک میدان مغناطیسی که دارای راستای بردار Z است به صورت $-\mu B_z$ خواهد بود. در نظریه الکترو مغناطیس کلاسیک $-\mu_z$ از ضرب گشتاور دو قطبی مغناطیسی در کسینوس زاویه بین گشتاور دو قطبی مغناطیسی و بردار میدان مغناطیسی بدست می آید. بنابر این انرژی اضافی ناشی از برهم کنش گشتاور دو قطبی مغناطیسی و میدان عبارتست از:

$$\Delta U = -\mu B \cos(\theta) \quad (۲-۱)$$

اتمهای داخل کوره سمت گیری کاتوره ای دارند و هیچ جهت ارجحی برای امتداد μ وجود ندارد اما پس از ورود به میدان مغناطیسی زیر لایه ها از هم باز می شوند و بر اساس رابطه بالا اختلاف انرژی بین جهت گیری های اسپین بوجود می آید که طبق اصول مکانیک آماری اتمها با توجه به اختلاف انرژی شان در زوایای مختلف توزیع می شوند که این پدیده در روزهای ابتدایی نظریه کوانتومی به "کوانتش فضایی" موسوم بود.

اشترن و گرلاخ لبه یکی از قطب های آهنربای خود را بسیار تیز درست کردند تا تغییرات بسیار سریعی در میدان مغناطیس ایجاد شود، همچنین اگر میدان در جهت Z ، به سرعت تغییر کند، بطوریکه گرادیان میدان شدیدی بوجود بیاید، انرژی مغناطیسی نسبت به مکان تغییر خواهد کرد. به همین دلیل در اینجا نیرویی بر گشتاور دو قطبی مغناطیسی اعمال می شود که جهت آن به علامت

کسینوس بستگی دارد. بنابراین آنها به وسیله ی نیرویی که با مشتق انرژی مغناطیسی متناسب است به سمت بالا یا پایین کشیده می شوند و خواهیم داشت:

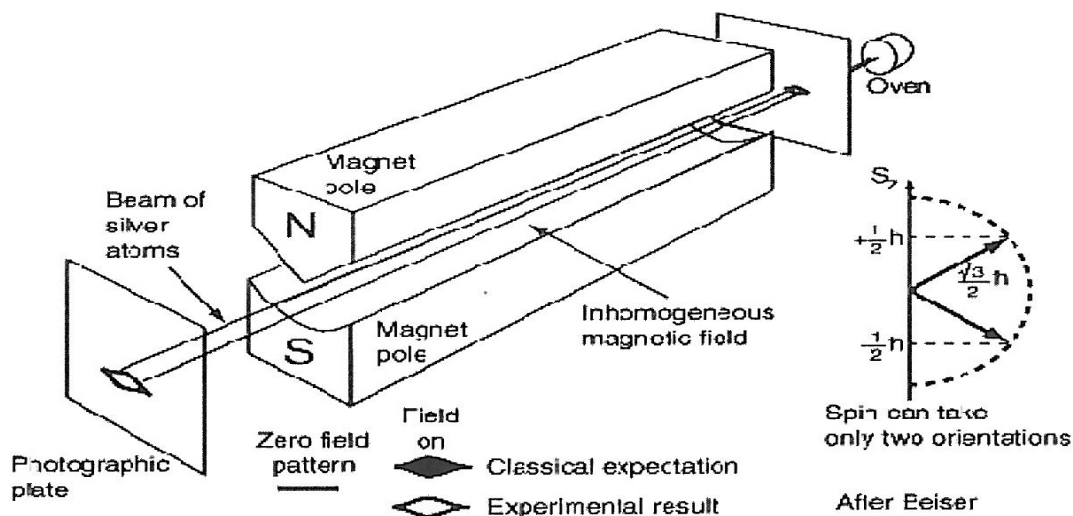
$$F_z = \frac{\partial}{\partial z} (\mu \cdot B) \approx \mu \cos \theta \frac{\partial U}{\partial z} \quad (3-1)$$

در این آزمایش اتم ها به طور مستقیم در امتداد لبه تیز سمت داده شده بودند. به طوری که اتمها باید نیروی عمودی را در میدان غیر یکنواخت احساس می کردند. در نتیجه یک مؤلفه ی سرعت و در پی آن جابه جایی در جهت عمودی ایجاد می شد. اتمهای نقره ای که گشتاور دو قطبی مغناطیسی افقی دارند هیچ نیرویی احساس نمی کنند و در امتداد خط راستی از میدان مغناطیس ها عبور می کنند.

اتمی که دارای گشتاور دو قطبی مغناطیسی عمودی است، نیرویی به سمت بالا یا لبه تیز آهنربا بر آن اعمال می شود و اتمی که دارای گشتاور دو قطبی مغناطیسی به سمت پایین است، نیرویی به سمت پایین و به سمت قطب تخت آهنربا احساس خواهد کرد (شکل ۱-۲). بنابر این هنگامی که بخار نقره از بین دو قطب آهنربا عبور می کند، اتمهایش با توجه به جهت گشتاور دو قطبی مغناطیسی از هم جدا می شوند. از نظر فیزیک کلاسیک همه زوایا امکان پذیرند، بنابراین هنگامی که اتمهای نقره با رسوب کردن روی شیشه جمع آوری می شوند، انتظار می رود که یک خط عمودی از نقره ظاهر شود، که ارتفاع این خط با گشتاور دو قطبی مغناطیسی نقره μ متناسب است.

حال آن که اشترن و گراخ روی صفحه ی شیشه ای فقط دو نقطه مجزا دیدند و اتمهای نقره دو باریکه تشکیل داده بودند و یک باریکه اتمهای نقره که اسپین هایشان به صورت تصادفی جهت گیری کرده بودند به دو باریکه جدا از هم شکافته شدند.

کوانتش تکانه زاویه ای اسپین الکترون اولین نمود مهمی بود که از آزمایش اشترن - گراخ بدست آمد [۱۱].



شکل ۱-۲ شکل آهنربای به کار رفته در آزمایش اشترن گزلاخ

۱-۲-۲- رادیکال های آزاد

مواد پارامغناطیس موادی هستند که در لایه آخر اتمی خود دارای تعداد فردی الکترون هستند و به اصطلاح اسپین غیر صفر دارند. هر تراز انرژی و یا به عبارت دیگر در حالت کوانتومی خاص می تواند دارای دو الکترون با اسپین های خلاف جهت یکدیگر باشد. به طوریکه اسپین کل آن حالت (طبق اصل طردپاولی) صفر شود. اما اگر در لایه آخر انرژی، تعداد فردی الکترون وجود داشته باشد یکی از زیر لایه های این تراز انرژی، دارای الکترون منفرد خواهد بود که این الکترون دارای اسپین خالص $S = \frac{1}{2}$ و مؤلفه ی $S_z = +\frac{1}{2}$ یا $S_z = -\frac{1}{2}$ است و اسپین کل دستگاه در این حالت صفر نخواهد بود.

رادیکال های آزاد موادی هستند که دارای خواص فوق باشند. یک رادیکال آزاد یک اتم یا گروهی از اتمها یا مولکول ها در حالت ویژه ای است که دارای الکترون منفرد در بالاترین تراز خود است. به عنوان نمونه می توان اتم هیدروژن H یا هیدروکسیل OH را رادیکال آزاد نامید.