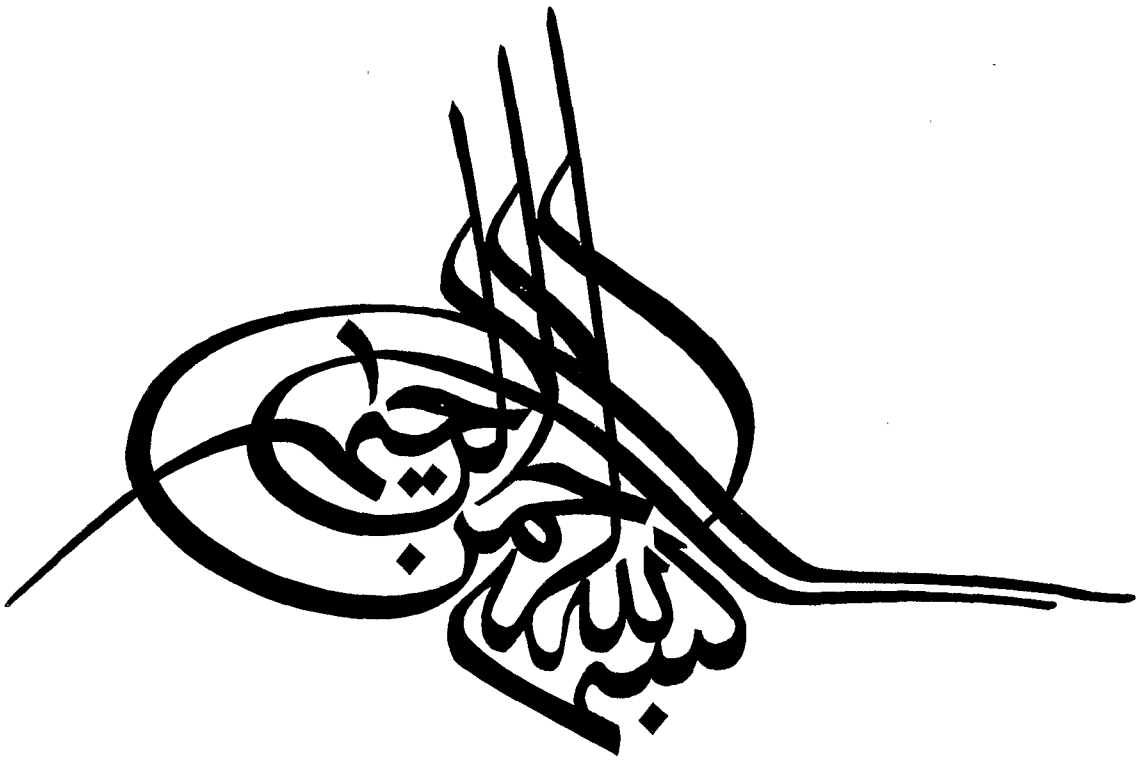


تصوری داشتم.....

خیال کردم که در کنارساحل با خدا قدم می زنم..

در آسمان تصویری از زندگی خود را دیدم..

در هر قسمت دو جای پا دیدم

یکی متعلق به من و دیگری متعلق به خدا

وقتی آخرین تصویر زندگیم را دیدم

بجای پا روی شن نگاه کردم.

دیدم که در سخت ترین لحظات زندگیم فقط یک جای پا بیشتر نیست.

برای رفع ابهام از خدا سوال کردم :

خدایا فرمودی که اگر به تو ایمان بیاورم هیچ زمانی مرا تنها نخواهی گذاشت.

پس چرا زمانی که بیشترین نیاز را به تو داشتم تنهایم گذاشتی

خدا فرمود : فرزند عزیزم تو را دوست دارم و هرگز تنهایت نمی گذارم.

در مواقع سختی اگر یک جای پا می بینی

در آن لحظات من تو را به دوش می کشیدم.

۱۳۸۷ /۱۱/ ۸

۱۱۲۸۲۱

دانشگاه تربیت معلم سبزوار

دانشگاه تربیت معلم سبزوار

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

فیزیک حالت جامد

بررسی امواج اسپینی با طول موج بلند در دولایه ای *Co/CoPt*

استاد راهنما :

دکتر حسین مرادی

۱۳۸۷/۱۱/۰۸

نگارش:

علی بخشایشی

بهمن ماه ۸۵

۱۱۲۸۲۱

باسمه تعالی

شماره : ۳۲/۳۲۹

تاریخ : ۱۳۸۵/۱۱/۱۵

دانشکده علوم پایه

جلسه دفاع از پایان نامه آقای **علی بخشایشی** دانشجوی دوره **کارشناسی ارشد فیزیک حالت جامد** ساعت ۱۰/۳۰ روز **شنبه** مورخه **۸۵/۱۱/۱۴** در اتاق **۲۴۵** تشکیل گردید. پس از بررسی و نظر هیأت داوران ، پایان نامه نامبرده با نمره ۱۹/۲۵ و درجه عالی مورد تأئید قرار گرفت.

عنوان رساله : بررسی امواج اسپینی با طول موج بلند در دو لایه ای Co/CoPt

تعداد واحد: ۶ واحد

داور رساله : دکتر ابراهیم عطاران

استادیار دانشگاه فردوسی مشهد

داور رساله : دکتر شعبان رضا قربانی

استادیار دانشگاه تربیت معلم سبزوار

استاد راهنما: دکتر حسین مرادی

استادیار دانشگاه فردوسی مشهد

نماینده تحصیلات تکمیلی : دکتر علی اصغر علوی

استادیار دانشگاه تربیت معلم سبزوار

مدیر گروه فیزیک : دکتر شعبان رضا قربانی

استادیار دانشگاه تربیت معلم سبزوار

تشکر و قدر دانی

مَنْ عَلَّمَنِي حَرْفاً
فَقَدْ صَيَّرَنِي عَبْداً

(حضرت علی علیه السلام)

در پایان از استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر حسین مرادی که مرا پیوسته مورد عنایت خود قرار می دادند تشکر و قدر دانی می کنم.
این پایان نامه تحصیلی را با یاد پدربزرگ عزیزم محمد علی محرومی و با سپاس فراوان از پدر و مادر مهربانم که همیشه در تمام مراحل زندگی بخصوص در اتمام پایان نامه مرا پشتیبان بوده اند به پایان می برم.

فهرست مطالب

فصل اول-مقدمه..... ۱

۱-۱- فرومغناطیس-پاد فرومغناطیس..... ۲

۱- ۲-بر هم کنش تبادلی..... ۳

۱-۲-۱-بر هم کنش تبادلی مستقیم..... ۳

۱-۲-۲ بر هم کنش تبادلی غیر مستقیم..... ٤

۱-۳- تک لایه فرومغناطیس در میدان خارجی..... ٥

۱-٤-انرژی ناهمسانگردی..... ۸

۱-٤-۱-ناهمسانگردی تک محوری ۹

۱-٤-۲-تعیین ثابت ها در ناهمسانگردی تک محوری..... ۱۲

۱-٤-۳-ناهمسانگردی مکعبی..... ۱۳

۱-٥- پدیده جفت شدگی تبادلی ۱٦

۱-٥-۱-مفهوم فیزیکی پدیده جفت شدگی تبادلی..... ۱۷

۱-٥-۲جفت شدگی دو لایه ای فرومغناطیس-فرومغناطیس(فنر تبادلی)..... ۱۸

۱-٥-۳-مدلهایی برای توجیه پدیده جفت شدگی تبادلی..... ۱۹

۱-٥-٤-جابجایی در مبدا و تغییر در پهنای منحنی..... ۲۱

۱-٥-٥-کاربردهای پدیده جفت شدگی تبادلی در صنعت..... ۲۲

۱-٥-٦-تونل زنی مغناطیسی..... ۲٤

۱-٥-۷-حسگر مغناطیسی(شیر اسپین) ۲٥

۱-٥-۸-رم مغناطیسی..... ۲٦

۱-٦-نتیجه گیری..... ۲٦

فصل دوم- محاسبه فرکانس امواج اسپینی در دو لایه ای $Co/CoPt$ در حالت(BLS)..... ۲۸

۲-۱-مفهوم موج اسپین..... ۲۹

۲-۲-روشهای عملی بررسی خواص امواج اسپینی..... ۳۱

۲-۲-۱-بررسی خواص امواج اسپینی توسط پراکندگی نوری بریلوئن..... ۳۲

۲-۲-۲-امواج اسپینی در دو لایه ای $Co/CoPt$..... ۳۵

۲-۲-۳-تغییرات فرکانس بر حسب میدان خارجی در دو لایه ای $Co/CoPt$..... ۳٦

۲-۳- مدل نیمه کلاسیک لاندائو – لیف شیتز..... ۳۸

۲-۳-۱-میدان موثر بر یک اسپین در حالت کلی..... ٤۲

۲-۳-۲-انرژی تبادلی..... ٤۳

۲-۳-۳-شرایط دمون اشباخ..... ٤٤

۲-۳-٤-انرژی نا همسانگردی- انرژی وامغناطش..... ٤۷

۲-٤-معادلات لاندائو– لیف شیتز برای Co..... ٤۸

۲-٥-معادلات لاندائو – لیف شیتز برای $CoPt$..... ٥۰

۲-٦-وابستگی خطی میدان تبادلی به میدان خارجی در دو لایه ای $Co/CoPt$..... ٥۱

۲-٦-۱-نتایج عددی در حالت وابستگی خطی میدان تبادلی به میدان خارجی..... ٥۱

۲-٦-۲-وابستگی فرکانس به ناهمسانگردی داخل صفحه..... ٥٤

۲-٦-۳-وابستگی فرکانس به میدان تبادلی ٥٥

۲-۷- دیوار بلاخ در Co وکج شدگی اسپینها در فصل مشترک..... ٥٦

۲-۷-۱- نتایج عددی در حالت وابستگی سهمی شکل میدان تبادلی به میدان خارجی..... ۵۹

۲-۷-۲-وابستگی فرکانس به ناهمسانگردی داخل صفحه..... ۶۰

۲-۷-۳- وابستگی فرکانس به میدان تبادلی..... ۶۱

۲-۷-٤-وابستگی فرکانس به ضخامت..... ۶۲

۲-۸- نتیجه گیری: ۶۳

فصل سوم محاسبه فرکانس امواج اسپینی درحالت(*FMR*)..... ٦٤

۳-۱-تشدید فرومغناطیسی..... ۶۵

۳-۱-۱-تفاوت پراکندگی نوری بریلوئن و تشدید فرو مغناطیسی..... ۶۷

۳-۲-نتایج تجربی..... ۶۸

۳-۳-مدل نظری..... ۶۹

۳-٤- تشدید فرو مغناطیسی برای *Co*..... ۶۹

۳-۵-تشدید فرو مغناطیسی برای *Co / CoPt*..... ۷۱

۳-٦-نتیجه گیری فصل سوم..... ۷۲

فصل چهارم نتیجه گیری..... ۷۳

مراجع..... ۷۵-۷۹

پیوست ها..... ۸۰-۱۱۳

مقالات..... ۱۱٤

فصل اول

مقدمه

در این فصل بطور نسبتا خلاصه برخی از اصطلاحات فیزیکی بکار رفته در این پایان نامه مورد بحث قرار می گیرد. مانند فرومغناطیس، پاد فرومغناطیس، بر هم کنشهای تبادلی، منحنی پسماند، ناهمسانگردی های مختلف. نا همسانگردی تک جهتی که در فصل مشترک دو لایه ای فرومغناطیس-پاد فرومغناطیس اتفاق می افتد، بیشتر مورد بررسی قرار می گیرد.

هنگام بررسی یک ماده فرومغناطیس در حضور میدان مغناطیسی خارجی، انرژی های زیمان و ناهمسانگردی بعنوان دو عامل تأثیر گذار نقش بسیار مهمی در جهت گیری اسپینهای ماده مغناطیسی ایفا می کنند. در حالت کلی، اگر میدان خارجی بجای اعمال بر یک فرومغناطیس، به یک دو لایه ای فرومغناطیس-پاد فرومغناطیس اعمال شود، با توجه به وجود بر هم کنشهای تبادلی بین اسپینهای دو ماده فرومغناطیس-پاد فرومغناطیس، این بر هم کنشها سهم غیر قابل انکاری در جهت گیری اسپینهای ماده فرومغناطیس خواهند داشت.

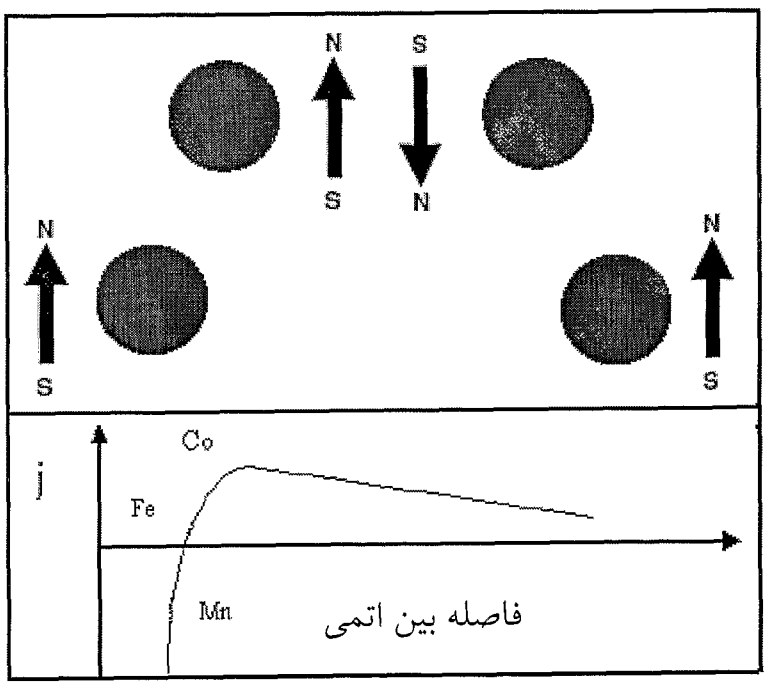
وقتی دو لایه فرو مغناطیس-پاد فرو مغناطیس در شرایط خاص جفت شوند، پدیده ها ی بسیار جالبی مشاهده می شود. یکی از جالبترین آنها، پدیده ی جفت شدگی تبادلی است که بر اساس آن یک جابجایی نسبت به مبدأ و پهنای منحنی پسماند ماده مغناطیسی بوجود می آید. با جفت شدگی یک لایه پاد فرو مغناطیس به لایه فرو مغناطیس(یا فرو مغناطیس به فرو مغناطیس)، خصوصیات بسیار مهمی در فرو مغناطیس نظیر میدان کوریسویتی، ناهمسانگردی، مغناطش و... اتفاق می افتد. توانایی کنترل این خصوصیات، مستلزم داشتن درک بالایی از قوانین حاکم بر پدیده جفت شدگی تبادلی است.

از هنگام کشف پدیده ی جفت شدگی تبادلی تاکنون، چندین مدل برای توجیه این پدیده ارائه شده است. اما هیچکدام بطور کامل نتوانسته اند تمام نتایج عملی را توجیه کنند. باکشف پدیده مقاومت مغناطیسی فوق العاده

زیادو بکار بردن پدیده ی جفت شدگی تبادلی در شیر اسپین و ضبط مغناطیسی، توجه ویـژه ای بـه مطالعـه روی این پدیده به دو صورت نظری و عملی صورت گرفته است.

۱-۱- فرومغناطیس-پاد فرومغناطیس

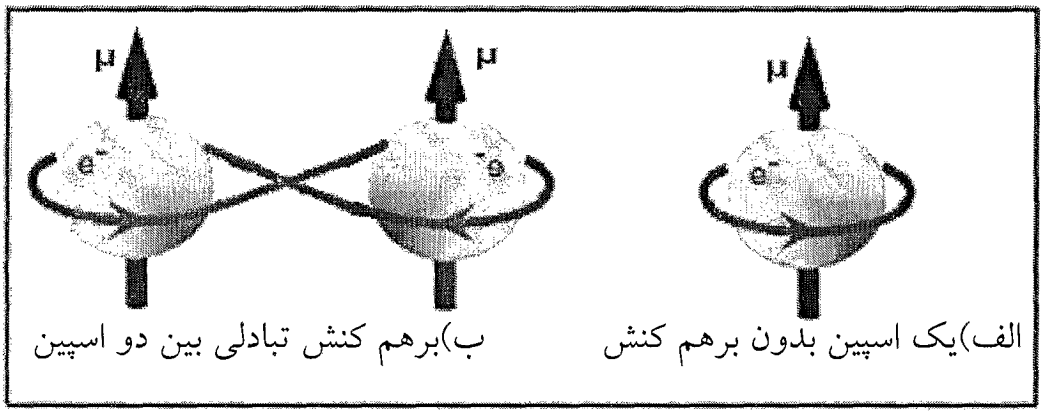
اگر دو اسپین در ماده مغناطیسی بصورت موازی قرار داشته باشند، ماده بصورت فرو مغناطیس و اگر دو اسپین در ماده مغناطیسی بصورت پاد موازی قرار داشته باشند، ماده بصورت پاد فرو مغناطیس خواهد بود. در حالت کلـی، برای وقوع پدیده فرومغناطیس- پاد فرو مغناطیس در مواد مغناطیسی، ملاکی پیشنهاد می شود که بـر طبـق اصـل طرد پائولی استوار است. این ملاک نسبت $\frac{r}{2r_a}$ است. در آن r فاصله بین دو اسپین بر هم کنشگرو r_a شعاع اتمی است. در شکل (۱-۱) تغییرات ثابت تبادلی، J، برحسب $\frac{r}{2r_a}$ بـرای فلـزات مختلـف رسـم شـده اسـت(منحنـی اسلیتر). در صورتی نسبت $\frac{r}{2r_a}$ از ۱/۵ بیشتر باشد، ماده بصورت فرو مغنـاطیس و در غیـر اینـصورت، مـاده پـاد فرومغناطیس خواهد بود[۱].



شکل (۱-۱) فرومغناطیس-پاد فرومغناطیس[۱] .

۱- ۲-بر هم کنش تبادلی

در یک اتم مغناطیسی اربیتال الکترون تحت تاثیر مؤلفه الکتریکی میدان های ناشی از یونهای مجاور، تغییرشکل می یابد. بنابراین مقدار چشم داشتی تکانه زاویه ای آن در هر جهت دلخواه در عناصر Co , Ni , Fe فضا صفر خواهد بود. در نتیجه خواص مغناطیسی در یک ماده مغناطیسی به اسپینهای جفت نشده در اربیتال آن بستگی پیدا می کند. بعلت پیچیده بودن محاسبات، می توان بجای اسپینهای جفت نشده در یک اتم مغناطیسی، یک اسپین معادل قرار داد و هر اتم مغناطیسی را معادل یک اسپین در نظر گرفت(مدل هایزنبرگ). اگر یک الکترون بین دو یون بصورت شکل (۱-۲) قرار داشته باشد، با توجه به مسیر حرکت الکترون می توان ادعا کرد که الکترون بطور مشترک متعلق به هر دو یون است. در این صورت برهم کنش بین دو یون بصورت بر هم کنش تبادلی خواهد بود.



شکل(۱-۲) بر هم کنش تبادلی بین دو اسپین

در حالت کلی دو نوع بر هم کنش تبادلی داریم:

الف) بر هم کنش تبادلی مستقیم

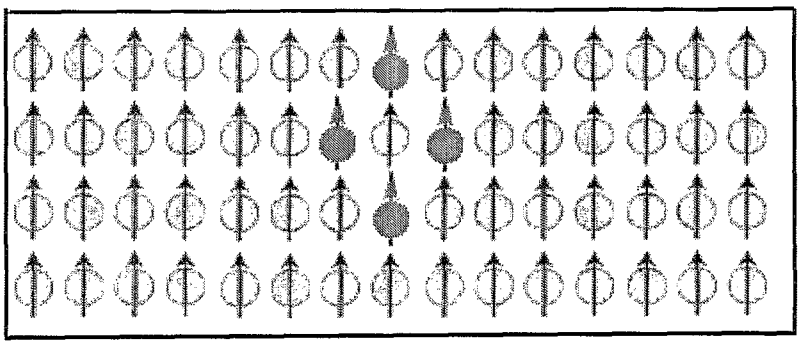
ب) بر هم کنش تبادلی غیر مستقیم

۱-۲-۱-بر هم کنش تبادلی مستقیم

انرژی مربوط به برهم کنش تبادلی مستقیم برای دواسپین می تواند بصورت زیر نوشته شود:

$$E_{exch} = \sum_{<i,j>} J_{ij}(r_{ij}) S_i(r_i).S_j(r_j) \qquad (۱-۱)$$

که در آن S_i و S_j اسپین مکانهای i ام و j ام دو الکترون و J_{ij} ثابت تبادلی است. علامت $< i,j >$ یعنی بر هم کنش تبادلی بین نزدیکترین همسایه ها را در نظر بگیریم[۲].

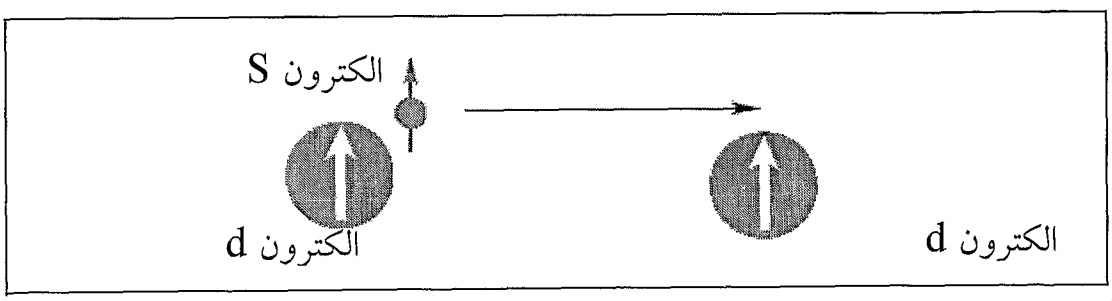


شکل (۱-۳) بر هم کنش تبادلی مستقیم بین نزدیکترین همسایه ها وجود دارد[۲].

وقتی ثابت تبادلی مثبت باشد ماده بصورت فرومغناطیس و وقتی منفی باشد ماده بصورت پاد فرومغناطیس است[۳]. J_{ij} بستگی به فاصله بین دو اسپین دارد و می توان آن را از دمای کوری بدست آورد[٤].

۱-۲-۲ برهم کنش تبادلی غیر مستقیم (*RKKY*)*

این برهم کنش می تواند بین اسپین الکترونهای آزاد ماده غیر مغناطیسی و اسپینهای چند لایه ای های مغناطیسی وجود داشته باشد. یک لایه مغناطیسی می تواند اسپین الکترونهای آزاد را پلاریزه کند. موج پلاریزه شده الکترون آزاد داخل ماده غیر مغناطیسی حرکت می کند و به لایه دوم می رسد. این قطبش روی مغناطش لایه دوم بصورت فرو مغناطیسی یا پاد فرو مغناطیسی اثر می کند. این برهم کنش را برهم کنش تبادلی غیر مستقیم می نامند[۵].



شکل (۱-٤) برهم کنش غیر مستقیم دو یون مغناطیسی توسط دریایی از الکترون های آزاد ماده غیر مغناطیسی انجام می شود[٦].

**Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida*

انرژی مربوط به برهم کنش تبادلی غیر مستقیم برای دواسپین بصورت زیراست:

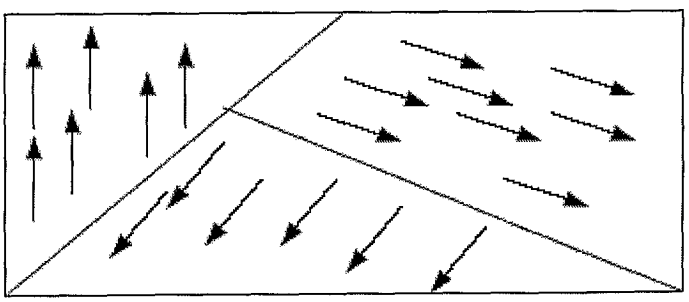
$$E_{exch} = \frac{1}{\Omega} \int J(|r - r'|) S_i(r).S_j(r') d^3r' \qquad (۲-۱)$$

در این رابطه $J(|r - r'|)$ انتگرال تبادلی و Ωحجم مورد نظر برای انتگرال گیری است.

۱-۳- تک لایه فرومغناطیس در میدان خارجی

تجربه نشان داده که در یک فرومغناطیس، بالای دمای بحرانی (که برای فرومغناطیس ها دمای کوری و برای پاد فرومغناطیس ها دمای نیل است) حرکت اسپینها بصورت کاتوره ای بوده و ماده خواص مغناطیسی از خودنشان نمی دهد[۳، ٤].

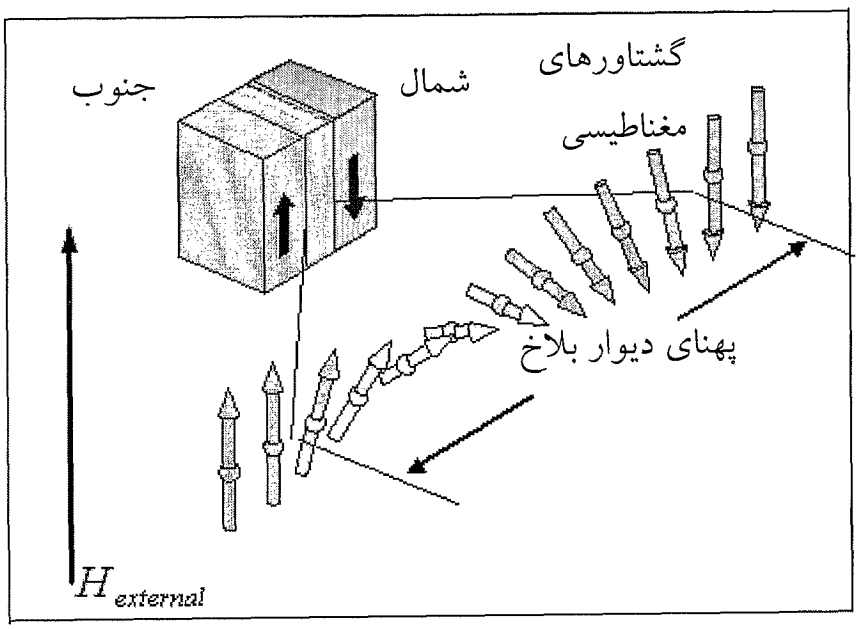
مواد فرومغناطیسی متشکل از گستره هایی هستند که اسپین های هر گستره هم جهت هستند و در هرکدام از گستره ها حدود ۱۰۹ تا ۱۰۱۵ اسپین وجود دارد[۷] (شکل ۱-۵). یک ماده مغناطیسی بصورت تک گستره میدان مغناطیسی دارای انرژی درونی زیادی است. بنابراین بمنظور کاهش انرژی، ماده مغناطیسی به چندین گستره تقسیم می شود. در این حالت مانند قبل مغناطش گستره ها هم جهت نیست. در نتیجه، با کم شدن مغناطش کل انرژی کاهش می یابد.



شکل(۱-۵) گستره های مغناطیسی در یک ماده فرومغناطیس[۷].

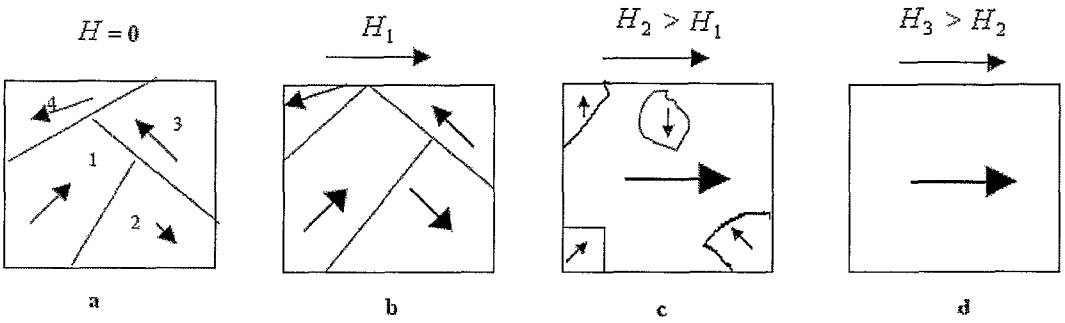
دیواره بلاخ بعنوان دیواری متشکل از اسپین و جدا کننده دو گستره مجاور تعریف می شود. انرژی نسبت داده شده به دیواره بلاخ را می توان بصورت تفاوت انرژی گشتاورهای مغناطیسی در دو گستره مجاور دیواره بلاخ

تعریف کرد. این انرژی معمولاً انرژی در واحد سطح یک دیواره بلاخ است. اگر یک میدان مغناطیسی خارجی هم جهت با اسپینهای بالا در ماده اعمال گردد(شکل ۱-٦)، اسپینهایی که در ناحیه انتهایی سمت چپ واقع هستند بعلت وجود بر هم کنش تبادلی قوی بین خودشان نمی چرخند. با افزایش میدان، گشتاور های مغناطیسی نزدیک به دیوار بعلت داشتن بر هم کنش تبادلی ضعیف تر(بعلت وجود زاویه بین اسپینهای مجاور)، اندکی می چرخند. در نتیجه چرخش این اسپینها، مقداری به سهم اسپینهای بالا در شکل(۱-٦) اضافه شده و به همین نسبت از سهم گستره مجاور(که اسپینهای آن بسمت پایین هستند) کاسته می شود. برای یک مشاهده کننده این بدان معناست که دیواره بلاخ اندکی به سمت راست حرکت می کند. در نتیجه در اثر اعمال میدان خارجی، مغناطش نمونه در راستای میدان افزایش می یابد.



شکل(۱-٦)گشتاور های مغناطیسی در ناحیه دیوار بلاخ با افزایش میدان اندکی می چرخند.
در نتیجه، مقداری به سهم اسپینهای بالا اضافه می شود[۷].

هنگام قرارگرفتن یک ماده مغناطیسی داخل میدان خارجی، از بین گستره های موجود در ماده مغناطیسی، گستره هایی که مغناطش آن ها هم جهت با میدان خارجی است بوسیله تصاحب کردن اسپین از گستره های مجاور بزرگ وبزرگ تر می شوند(شکل۱-۷).



شکل (۱-۷)گستره های ماده مغناطیسی در حضور میدان خارجی[۳، ٤].

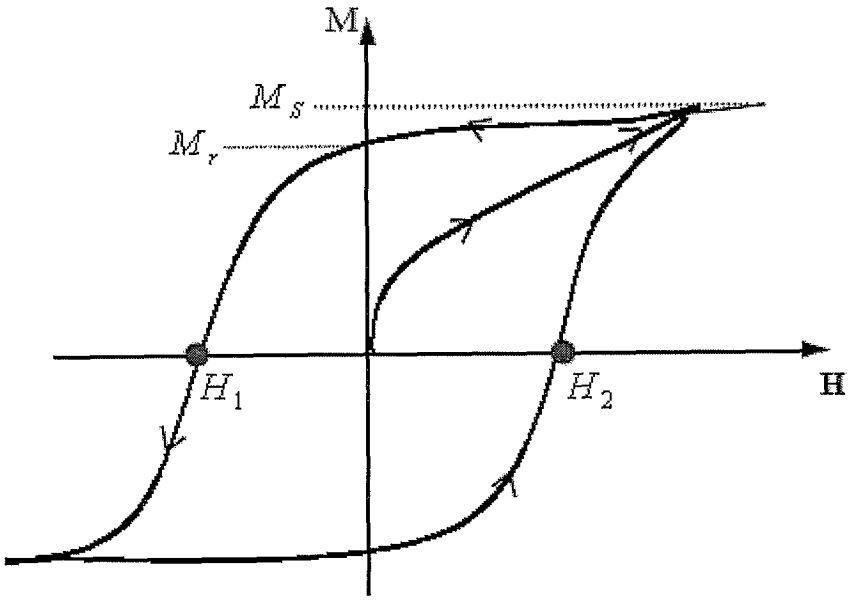
در این صورت، وقتی میدان خارجی به اندازه کافی قوی باشد تمام گستره ها به یک گستره تبدیل می شوند و مغناطش کل هم جهت با میدان خارجی خواهد بود[۳، ٤]. در این حالت مغناطش اشباع خواهیم داشت.

با کاهش میدان وارده، سهم گشتاور ناشی از اثر زیمان کاهش پیدا کرده و با چرخش اسپینها از مقدار اشباع در جهت مثبت محور کاسته می شود. با معکوس کردن جهت میدان وارده، سهم گشتاور اعمال شده به اسپینهای ماده فرومغناطیس افزایش پیدا کرده واین افزایش در گشتاور، جهت اسپینها را معکوس می کند. در نتیجه، مغناطش ماده به مغناطش اشباع ولی در جهت منفی، نزدیک خواهد شد. بطور مشابه، با کم کردن مقدار میدان اعمالی سهم گشتاور اعمال شده به اسپینهای ماده فرومغناطیس کم شده و منحنی پسماند کامل می شود.

در حالت کلی، برای کاهش مغناطش از حالت اشباع به مقدار صفر نیاز به اعمال یک میدان خارجی داریم. این میدان خارجی، به میدان وا دارنده (H_C) موسوم است. میدان وا دارنده بیانگر قدرت میدان لازم برای چرخاندن اسپین های یک ماده است وتا حدود زیادی به شرایط نمونه بستگی دارد و از عواملی مانند رفتار گرمایی و تغییر شکل اثر پذیر است. مواد مغناطیسی سخت و نرم با توجه به مقدار وا دارندگی آنها نام گذاری شده اند. مواد مغناطیسی سخت به آن دسته از مواد اطلاق می شود که دارای وا دارندگی بیش از $H_C > ۱۲/۵\ Oe$ هستند و موارد استفاده آنها در ساخت هسته های ترانسفورماتور و نوارهای مغناطیسی است. مواد مغناطیسی نرم دارای وا دارندگی کمتر از $H_C < ۱۲/۵\ Oe$ هستند و از آنها در ساخت آهنربای الکتریکی استفاده می شود[۷].

با توجه به شکل (۱-۸)، H_C بصورت زیر است:

$$H_C = \frac{H_1 - H_2}{2} \qquad (۱-۳)$$



شکل (۱-۸) حالت خاصی از منحنی پسماند. M مغناطش کل ماده و H میدان اعمالی است. M_S مغناطش اشباع است[۸].

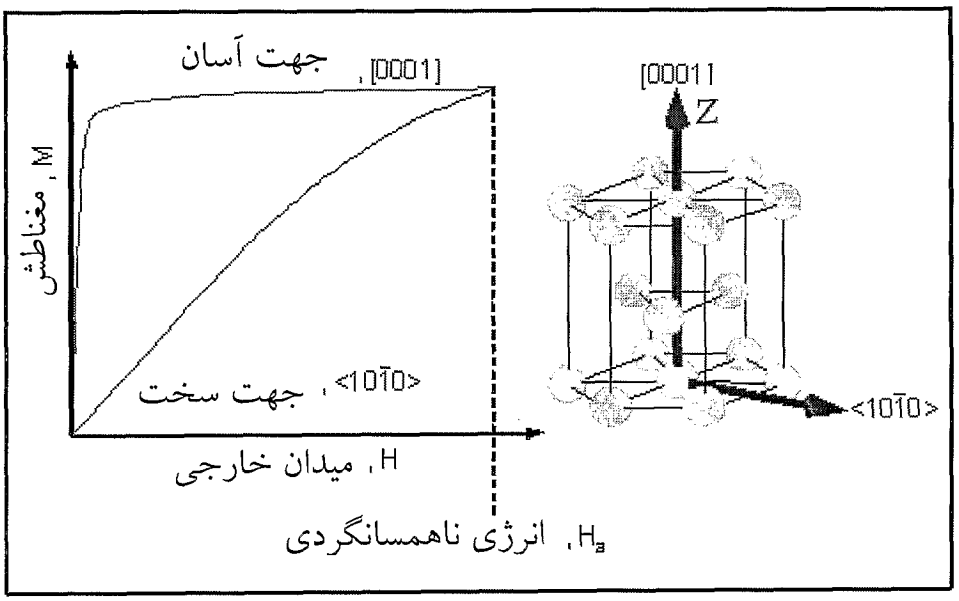
۱-٤-انرژی ناهمسانگردی

اگر اربیتال یک یون مغنا طیسی را بصورت کروی در نظر بگیریم، انرژی ناشی از بر هم کنش های اسپین- مدار و دو قطبی- دو قطبی یون مغنا طیسی با یونهای مجاور، باعث کشیده شدن اربیتال یون مغنا طیسی وخارج شدن آن از حالت کروی می شوند. در این صورت انرژی آن به جهت گیری اربیتال یون مغنا طیسی درفضا بستگی پیدا می کند[۹]. به همین علت، بسته به نوع ساختار بلوری، انرژی به جهت های مرجعی درفضا وابسته می شود. این انرژی وابسته به جهت، که باعث قرار گرفتن مغناطش کل ماده درجهت محور یا محورهایی خاص و برگزیده از ماده می شود، به انرژی ناهمسانگردی موسوم است.

در حالت عادی اسپینها در جهت محور آسان قرار دارندو انرژی مغناطیسی ماده در این حالت کمینه است. با اعمال میدان در جهت عمود بر اسپینها می توان روی اسپینها کار انجام داده و جهت آنها را تغییر داد. هنگامی که اسپینها در راستای محور سخت قرار می گیرند، کار به بیشینه مقدار خود می رسد.

۱-٤-۱-ناهمسانگردی تک محوری

ناهمسانگردی تک محوری بصورت طبیعی در بلورهای شش گوشی بوجود می آید[۹]. منحنی انرژی لازم برای این ناهمسانگردی درجهت آسان و سخت در شکل(۱-۹) رسم شده است.



شکل (۱-۹) ناهمسانگردی تک محوری. جهت اسپینها در راستای [۰۰۰۱] است[۷].

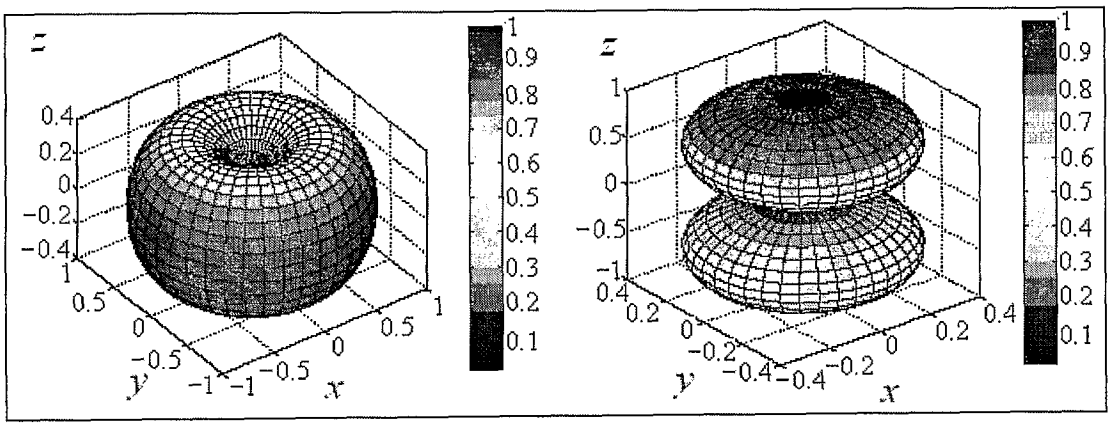
بعلت تقارن موجود در ناهمسانگردی تک محوری، انرژی این نوع ناهمسانگردی بایستی به ازای $\theta = 0$ و $\theta = \pi$، مقداری یکسان داشته باشد. بنابراین، معادله ای که این شرط در آن صادق است بصورت زیر است:

$$E_{Anis} = K_0 + K_1 Sin^2\theta + K_2 Sin^4\theta + K_3 Sin^4\theta\, Cos^4\phi + \ldots\ldots\ldots \qquad (٤-١)$$

با توجه به اینکه مقدار K_1 بسیار بزرگتر از مقادیر K_2 و K_3 است، می توان از مقادیر K_2 و K_3 در مقایسه با K_1 صرف نظر کرد[۱۰]. در این صورت در حالت تعادل خواهیم داشت:

$$\frac{\partial E_{Anis}}{\partial \theta} = 0 \Rightarrow 2K_1 Sin\theta\, Cos\theta = 0 \qquad (٥-١)$$

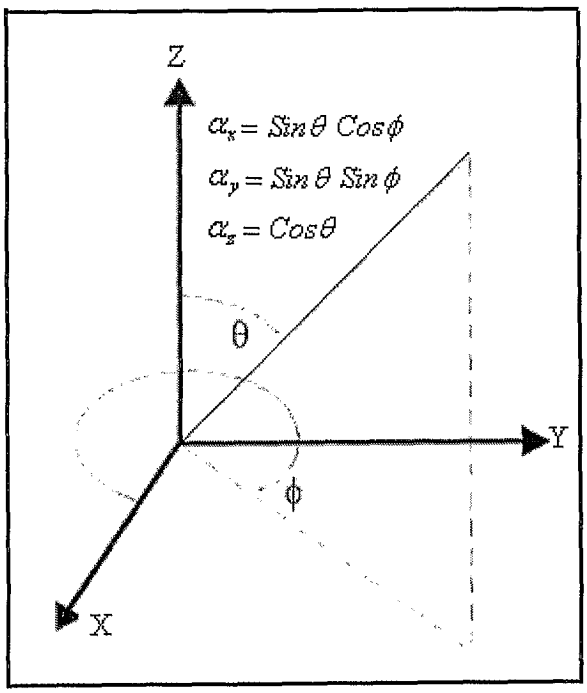
اگردر رابطه(۱-٤)، $K_2 = K_3 = 0$ باشند، مقدار چگالی انرژی ناهمسانگردی به علامت K_1 بستگی پیدا می کند[۱۰]. اگر $K_1 > 0$ باشد، انرژی ناهمسانگردی دارای دو کمینه در $\theta = 0$ و $\theta = \pi$ است که در این حالت مغناطش روی محور $z+$ یا $z-$ قرار دارد. این بدین معناست که جهت z در این حالت جهت محور آسان است. اگر $K_1 < 0$ باشد، انرژی ناهمسانگردی در حالت $\theta = \frac{\pi}{2}$ کمینه است که در این حالت هر جهتی در صفحه x-y می تواند بعنوان جهت آسان انتخاب شود(شکل۱-۱۰).



ب)　　الف)

شکل (۱-۱۰)نمودار فضایی چگالی انرژی تک محوری[۱۰]. الف) $K_1 < 0$　ب) $K_1 > 0$

اگر کسینوسهای هادی را مطابق شکل(۱-۱۱) در نظر بگیریم، می توان انرژی ناهمسانگردی تک محوری را برحسب کسینوسهای هادی مربوط به مغناطش کل ماده نوشت.



شکل (۱-۱۱) کسینوسهای هادی

$$\alpha_1 = \frac{M_x}{M_S} \ , \ \alpha_2 = \frac{M_y}{M_S} \ , \ \alpha_3 = \frac{M_z}{M_S} \qquad (۱-۶)$$

در رابطه فوق، M_i مؤلفه مغناطش درراستای محور i ام و M_S مغناطش ا شباع است.

انرژی ناهمسانگردی با توجه به روابط (۱-٤) و(۱-٦) بصورت زیر است[۹]:

$$E_{Anis} = K_1(1-\alpha_z^2) + K_2(1-\alpha_z^2)^2 + ...$$
$$E_{Anis} = K_1(1-\frac{M_z^{\ 2}}{M_S^{\ 2}}) + K_2(1-\frac{M_z^{\ 2}}{M_S^{\ 2}})^2 + ... \qquad (۱-۷)$$

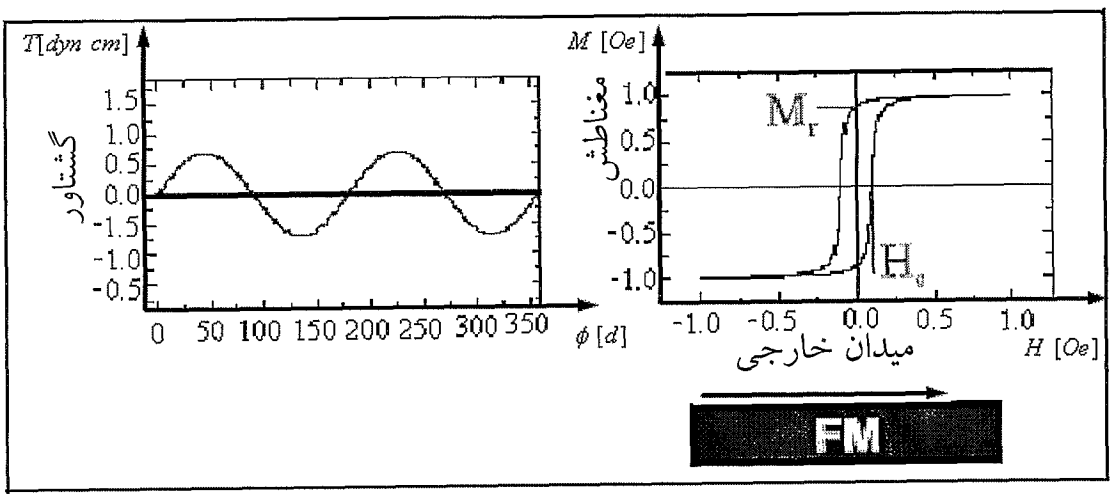
همانطورکه با اعمال میدان خارجی به یک ماده همسانگرد می توانیم باعث ایجاد یک ناهمسانگردی در ماده و بوجود آوردن یک جهت مرجع داخل آن شویم، به یک جهت مرجع بوجود آمده در ماده نیز می توانیم یک "میدان ناهمسانگردی" نسبت دهیم. بنابراین، در پایین ترین مرتبه، میدان ناهمسانگردی بصورت زیر است[۹]:

$$H_{Anis} = \frac{-1}{\mu_0}\frac{\partial E_{Anis}}{\partial M} = \frac{-1}{\mu_0}\left(\frac{\partial E_{Anis}}{\partial M_x}\hat{e}_x + \frac{\partial E_{Anis}}{\partial M_y}\hat{e}_y + \frac{\partial E_{Anis}}{\partial M_z}\hat{e}_z\right) \qquad (۸-۱)$$

$$\rightarrow H_{Anis} = \frac{2K_1 M_z}{\mu_0 M_S^2}\hat{e}_3$$

۱-٤-۲-تعیین ثابت ها در ناهمسانگردی تک محوری

توسط آزمایشهای زیر می توان ثابت های ناهمسانگردی را در رابطه(۱-٤) بدست آورد. بدین منظور، دو روش عملی برای اندازه گیری ثابت های ناهمسانگردی تک محوری یک نمونه بکار برده می شوند(شکل۱-۱۲).



شکل (۱-۱۲) تغییرات مغناطش نسبت به میدان خارجی و تغییرات گشتاوردورانی بر حسب زاویه[۱۱].

الف)در روش اول تغییرات مغناطش نسبت به میدان خارجی (منحنی پسماند) اندزه گیری می شود. ثابت ناهمسانگردی K را می توان با محاسبه میدان لازم برای قرار دادن مغناطش در جهت آسان (میدان وادارندگی) بدست آورد. در صورتی که θ_{Ani} زاویه بین محور آسان و میدان خارجی و θ_H زاویه بین میدان خارجی و جهت مغناطش باشد، انرژی ناهمسانگردی بصورت زیراست[۱۱]:

$$E = HM\ Cos(\theta - \theta_H) + K_0 + K_1 Cos^2(\theta - \theta_{Ani}) \qquad (۹-۱)$$

اگر میدان خارجی در راستای محور آسان ماده مغناطیسی اعمال شود، $\theta_H = \theta_{Ani}$ خواهد بود. وقتی که $\theta_H = \theta_{Ani}$ باشد، برای اینکه گشتاوردورانی ناشی از انرژی های زیمان و نا همسانگردی $T = \frac{\partial E}{\partial \theta}$ با یکدیگر خنثی شوند باید داشته باشیم[۱۱]:

$$T = \frac{\partial E}{\partial \theta} = -HM\ Sin(\theta - \theta_H) - 2K_1 Sin(\theta - \theta_{Ani})\ Cos(\theta - \theta_{Anis}) = 0$$
$$\rightarrow K_1 = \frac{HM}{2} \qquad (۱۰-۱)$$

ب)در این روش گشتاور بر حسب زاویه محاسبه می شود. میدان بزرگی حدود ۱ تا ۲ تسلا به نمونه اعمال می شود. نمونه در حضور میدان خارجی چرخانده می شود و گشتاور اعمال شده به نمونه توسط یک فنر حساس اندازه گیری می شود. طبق رابطه (۱-۹)، گشتاور به دو جمله $Sin(2\theta - 2\theta_{Ani})$ و $Sin(\theta - \theta_H)$ وابسته است. اگر یک میدان خارجی قوی به سیستم اعمال شود، مغناطش هم جهت با میدان بوده و $\theta = \theta_H$ است. در نتیجه سهم جمله $Sin(\theta - \theta_H)$ برابر با صفر خواهد بود. بنابراین، انرژی زیمان سهمی در ایجاد گشتاور ندارد. ثابت ناهمسانگردی از قرار دادن $\theta - \theta_{Ani} = 45$ در رابطه (۱-۹) بدست می آیدکه برابر است با[۱۱]:

$$K = \frac{T_{\theta - \theta_{Ani} = 45}}{2} \qquad (۱۱-۱)$$

۱-٤-۳-ناهمسانگردی مکعبی

بعلت وجود تقارن مکعبی در بعضی از بلورها(شکل۱-۱۳)، انرژی ناهمسانگردی در این بلورها باید دارای شرایط زیر باشد[۹]:

الف) معکوس کردن جهت مغناطش نباید تغییری در انرژی ناهمسانگردی ایجاد کند. بعبارتی، انرژی ناهمسانگردی بایستی شامل توانهای زوجی ازکسینوسهای هادی باشد.

ب) انرژی ناهمسانگردی باید تحت تعویض هردو محور هم ارز، بدون تغییر باقی بماند.

در نتیجه، معادله ای که این دو شرط در آن صادق است باید بصورت زیر باشد[۹]:

$$E_C = K_1(\alpha_x^2\alpha_y^2 + \alpha_y^2\alpha_z^2 + \alpha_z^2\alpha_x^2) + K_2\alpha_x^2\alpha_y^2\alpha_z^2 + ... \qquad (۱۲-۱)$$

انرژی ناهمسانگردی(۱-۱۲) با توجه به شکل(۱-۱۱) بصورت زیر است[۹]: