دانشگاه حکیم سبزواری

دانشکده‌ی علوم پایه

پایان‌نامه برای دریافت درجه‌ی کارشناسی ارشد (M.A)

رشته‌ی فیزیک حالت جامد

بررسی خواص الکترواپتیکی و ترموالکتریکی $HoMnO_3$ در فاز هگزاگونال و اثر افزودنی‌ها بر آن

استاد راهنما:

دکتر حسین‌اصغر رهنمای علی‌آباد

استاد مشاور:

دکتر جواد باعدی

پژوهش و نگارش:

نسرین رازقندی

تابستان ۹۱

بسم الله الرحمن الرحیم

تقدیم به

پدر و مادرم

که اقیانوس های بی کران عشقند

و مهربانی هایشان دارایی گران بهایی ست برای لحظه لحظه های زندگانیم.

همسرم، نور امیدم،

که همراهی اش پیام آور روزهای روشن است و بودنش بهانه ای برای زیستن.

سپاس‌گزاری

فراهم آمدن این پژوهش، پس از الطاف و عنایات بی‌کران حضرت حق، با راهنمایی‌ها و همراهی‌های سروران گران‌قدری حاصل شد که سپاس‌گزاری، جبران گوشه‌ی ناچیزی از زحمات این عزیزان است:

جناب آقای دکتر رهنما که در این راه متحمل زحمات فراوانی شده اند که گردآوردن این مجموعه جز با تلاشهای بی شائبه ایشان امکان پذیر نبود وهمچنین آقایان دکتر قربانی و دکتر باعدی که رهنمودهای ایشان روشنگر راهم بوده است.

و تمام عزیزانی که در نوشتن این پایان‌نامه مرا یاری نموده اند.

دانشگاه حکیم سبزواری

فرم چکیده‌ی پایان‌نامه‌ی دوره‌ی تحصیلات تکمیلی

دفتر مدیریّت تحصیلات تکمیلی

نام خانوادگی دانشجو: رازقندی **نام:** نسرین **شماره دانشجویی:** ۸۸۱۳۷۳۲۰۸۲

استادراهنما:دکترحسین‌اصغر رهنمای علی‌آباد **استاد مشاور:** دکتر جواد باعدی

دانشکده: علوم پایه **رشته:** فیزیک حالت جامد

مقطع: کارشناسی ارشد **تاریخ دفاع:** **تعداد صفحات:**

عنوان پایان‌نامه: بررسی خواص الکترواپتیکی و ترموالکتریکی $HoMnO_3$ در فاز هگزاگونال و اثر افزودنی‌ها بر آن

چکیده: خواص الکترونی، اپتیکی و ترموالکتریکی ترکیبات $HoMnO_3$، $Ho_{0.67}Y_{0.33}MnO_3$ و $Ho_{0.67}La_{0.33}MnO_3$ با استفاده از محاسبات اصول اولیه و نظریه تابعی چگالی بر اساس امواج تخت تقویت شده خطی(FP-LAPW) و تقریب های گرادیان تعمیم یافته GGA و GGA+U بررسی شده است. نتایج بدست آمده درتقریب GGA نشان می دهد که گاف نواری در $HoMnO_3$ در فاز هگزاگونال ۱/٤ الکترون-ولت می باشد که این مقدار با افزودن ناخالصی های Y و La به آن افزایش می یابد. انرژی پلاسمون محاسبه شده برای $HoMnO_3$، ۳۲/۱۳۷ الکترون ولت است. طیف های اپتیکی بدست آمده توافق خوبی با تجربه دارند. نتایج بدست آمده نشان می دهد که $HoMnO_3$ ترکیب ترموالکتریکی خوبی است.

کلید واژه:$HoMnO_3$ ، تقریب چگالی موضعی، گاف نواری، خواص الکترونی، اپتیکی، ترموالکتریکی

فهرست مطالب

فصل اوّل: بررسی ساختار و خواص HoMnO3

مقدمه.....۱۱

۱-۱ ساختاربلوری.....۱۱

۱-۱-۱ اثر یون Re^{+3} روی ساختار بلوری.....۱۱

۱-۱-۲ HoMnO3 هگزاگونال.....۱۲

۱-۱-۳ فروالکتریسیته در $ReMnO_3$ هگزاگونال.....۱۳

۱-۱-٤ ساختار مغناطیسی.....۱٤

۱-۱-۵ مواد مولتی فروییک.....۱٦

۱-۲ خواص و کاربردها.....۱۷

۱-۲-۱ فناوری جدید ضبط مغناطیسی.....۱۷

۱-۲-۲ گرماالکتریسیته چیست.....۱۹

۱-۲-۳ اثر گرماالکتریک.....۱۹

۱-۲-٤ اصول کار سیستم گرماالکتریک (TE).....۲۰

۱-۲-۵ عملکرد تولید توان در سیستم گرماالکتریک.....۲۰

فصل دوم:روش حل مسئله بس ذره ای

۲-۱ مقدمه حل مسئله بس ذره ای.....۲۳

۲-۲ سیستم های بس ذره ای.....۲٤

۲-۳ تقریب بورن اپن هایمر.....۲۵

۲-٤ نظریه تابعی چگالی.....۲٦

۲-۵ معادلات کوهن شم.....۲۷
۲-٦ تقریب چگالی موضعی.....۲۹
۲-۷ تقریب شیب تعمیم یافته.....۳۰
۲-۸ روش های حل معادلات کوهن شم.....۳۰
۲-۹ روش امواج تخت تقویت شده خطی با پتانسیل کامل.....۳۱

فصل سوم:جزئیات محاسبات اپتیکی

۳-۱ مقدمه محاسبات اپتیکی.....۳٤
۳-۲ تابع دی الکتریک.....۳٤
۳-۳ روابط کرامرز کرونیک.....۳٥
۳-٤ طیف اتلاف انرژی الکترون.....۳۸

فصل چهارم:جزئیات محاسبات گرماالکتریکی

٤-۱ مقدمه جزئیات محاسبات گرماالکتریکی.....٤۱
٤-۲ الگوریتم کد.....٤۲
٤-۳ نظریه بولتزمن:معادله نیمه کلاسیک.....٤۳

فصل پنجم:نتایج محاسبات الکترونی

٥-۱ مقدمه.....٤۸
٥-۲ روش انجام محاسبات.....٤۸
٥-۳ بهینه سازی ثابت های شبکه.....٤۹
٥-٤ ساختار نواری.....٥۳
٥-٥ چگالی حالت ها.....٥۸

فصل ششم:نتایج محاسبات اپتیکی

٦-۱ مقدمه.....٦۸

٦-٢ تابع دی الکتریک.....٦٨
٦-٣ ضریب جذب.....٧٠
٦-٤ بازتابندگی.....٧٢
٦-٥ هدایت اپتیکی.....٧٢
٦-٦ طیف اتلاف انرژی الکترون.....٧٤
٦-٧ قاعده جمع قدرت نوسانگر.....٧٥

فصل هفتم:نتایج محاسبات گرماالکتریکی

٧-١ مقدمه.....٧٨
٧-٢ ضریب سی بک.....٧٨
٧-٣ هدایت الکتریکی.....٨٠
٧-٤ هدایت گرمایی.....٨١
نتیجه‌گیری ٨٣
منابع و مآخذ.....٨٤

Abstract

Optoelectronic and thermoelectric properties of $HoMnO_3$, $Ho_{0.67}La_{0.33}MnO_3$ and $Ho_{0.67}Y_{0.33}MnO_3$ have investigated by using density functional theory base on Full Potential Linearized Augmented Plane Wave (FP-LAPW) and generalized gradient approximation GGA and GGA+U. Obtained results by GGA approximation, show that band gap of $HoMnO_3$ in hexagonal crystal structure is 1.4 eV that this value increases by adding of impurities Y and La. Calculated Plasmon energy for $HoMnO_3$ is 32.137 eV and optical spectra are good agreement with experiment. Obtained results show that $HoMnO_3$ is good thermoelectric compound.

Keywords: $HoMnO_3$, DFT; optoelectronic; thermoelectric

فصل اول

بررسی ساختار و خواص $HoMnO_3$

مقدمه:

مواد مغناطیسی خاکی – نادر در فاز هگزاگونال با فرمول شیمیایی $ReMnO_3$ (کاتیون‌های سه ظرفیتی، Re=Ho, Lu, Y) دارای ویژگی خاصی هستند که ناشی از بر هم کنش قوی بین الکترون‌های 3d، فلز واسطهٔ Mn^{3+} و الکترون‌های 4f یون‌های خاکی نادر Re^{3+}، می‌باشد.

این مواد به دلیل داشتن مولتی فروئیک[1]، مورد توجه فراوان قرار گرفته است. خواص مولتی فروئیکی ارتباط بین نظم فرومغناطیس با خاصیت فروالکتریسیته است که در $ReMnO_3$ مشاهده می‌شود. در این فصل به بررسی ساختار ترکیب $HoMnO_3$ و کاربردهای این ترکیب در صنعت پرداخته می‌شود.

۱-۱ ساختار بلوری

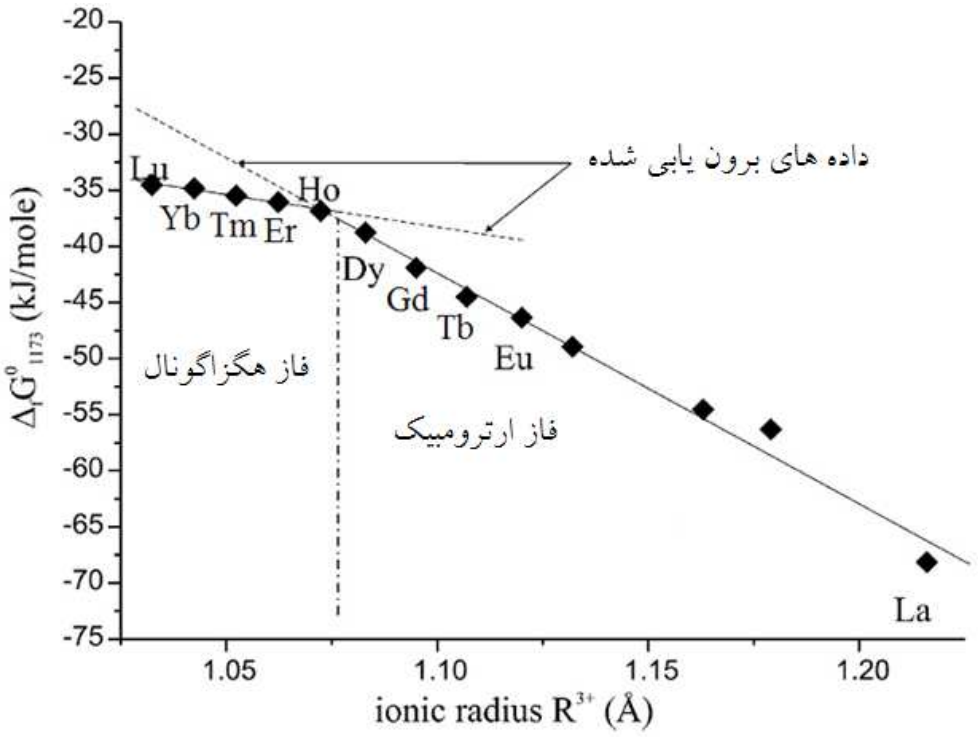
۱-۱-۱ اثر یون Re^{3+} روی ساختار بلوری

مغناطیس‌های خاکی ـ نادر در دوفاز هگزاگونال وارترومبیک متبلور می‌شوند. این پدیده به شعاع یونی Re^{3+} وابسته است. عناصرخاکی نادر با شعاع یونی بزرگ‌تر (La, Ce, Dy) به شکل ارترومبیک، در حالی که عناصرخاکی نادر با شعاع یونی کوچکتر (Ho, Lu, Y, Sc) به شکل هگزاگونال متبلور می‌شوند [۱].

بنابراین با افزایش شعاع اتمی یون‌های خاکی ـ نادر، که در نتیجهٔ افزایش عدد اتمی رخ می‌دهد، پایداری حالت ارترومبیک افزایش می‌یابد. این تمایل به طور کمی، توسط محاسبات انرژی آزاد ترمودینامیکی، برای بلور، توسط گرابی[2] نشان داده شد [۲] . آن چنان که در شکل (۱-۱) نشان داده شده است، یون Ho^{3+} در مرز ساختار هگزاگونالی و ارترومبیک قرار دارد.

1 - Multi ferroic
2 - Graboy

تفاوت انرژی پتانسیل بین ساختار هگزاگونال و ارترومبیک برای یـون Ho^{3+} خیلـی کوچـک است. این نشان می‌دهد که $HoMnO_3$ می‌تواند هم حالت هگزاگونالی و هم ارترومبیک داشته باشد.



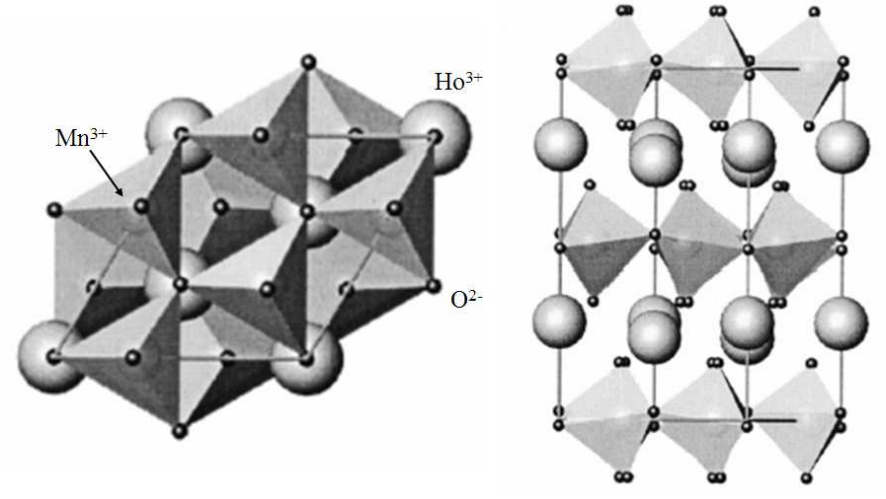
شکل ۱-۱: انرژی آزاد حجم $ReMnO_3$ متشکل از Re_2O_3 و Mn_2O_3 در ۱۱۷۳ K [۲].

۱-۱-۲ $HoMnO_3$ هگزاگونال

$HoMnO_3$ در سـاختار هگزاگونـال یـک فروالکتریـک بـا دمـای کـوری فروالکتریکـی بـالا $T_{cE} = ۸۷۵k$ می‌باشد [۳]. در حالت فروالکتریکی، $HoMnO_3$ در گروه فضایی $P\sigma_3cm$ قـرار دارد. (شکل ۱-۲)، ساختار بلوری حالت فروالکتریکی $HoMnO_3$ را نشان می‌دهد. در ایـن سـاختار، یـک اتم Mn و ۵ اتم اکسیژن، تشکیل هرم مثلثی MnO_3 را می‌دهنـد. هـر اتـم Mn مرکـز هـرم مثلثـی را اشغال می‌کنند در حالی که اتم‌های اکسیژن، رئوس این هرم مثلثی را اشغال کـرده‌انـد. یـون خـاکی ـ

نادر، در لایه‌های بین وجوه این هرم متمرکز شده‌اند.ساختار بلوری $HoMnO_3$ ، از گروه های MnO_5 و لایه‌های اتمی خاکی ـ نادر در امتداد محور c تشکیل شده است.

هرم‌های MnO_5 گوشه‌هایشان را با هرم‌های مجاور به اشتراک می‌گذارند و یک شبکهٔ سه گوش را در صفحه ab تشکیل می‌دهند به طوری که هر یون اکسیژن، با سه یون Mn مرتبط است و هر یون Mn توسط یون اکسیژن احاطه می‌شوند. (شکل ۱-۲ چپ)



شکل ۱-۲: ساختار هگزاگونالی $HoMnO_3$ در حالت فروالکتریکی [٤]. نمای بالا (چپ) در صفحهٔ ab و نمای اطراف (راست) در امتداد محور c کره‌های بزرگ یون‌های Ho^{3+} را نشان می‌دهد. کره‌های کوچک $Mn^{3+}O^{2-}$ در وسط هرم مثلثی قرار می‌گیرد.

۱-۱-۳ فروالکتریسیته در $ReMnO_3$ هگزاگونال

برتوت[1] خاصیت فروالکتریسیته را در $ReMnO_3$ هگزاگونال در سال ۱۹٦۳ کشف کرد [٥]. بعد از آن بررسی ساختار دقیق، برای درک اصول اولیه فروالکتریسیته در مغناطیس‌های خاکی نادر هگزاگونالی انجام گرفت[1,7-9] . بنابراین این طور استنباط می‌شود که فروالکتریسیته از نظر هندسی،

1 - Bertout

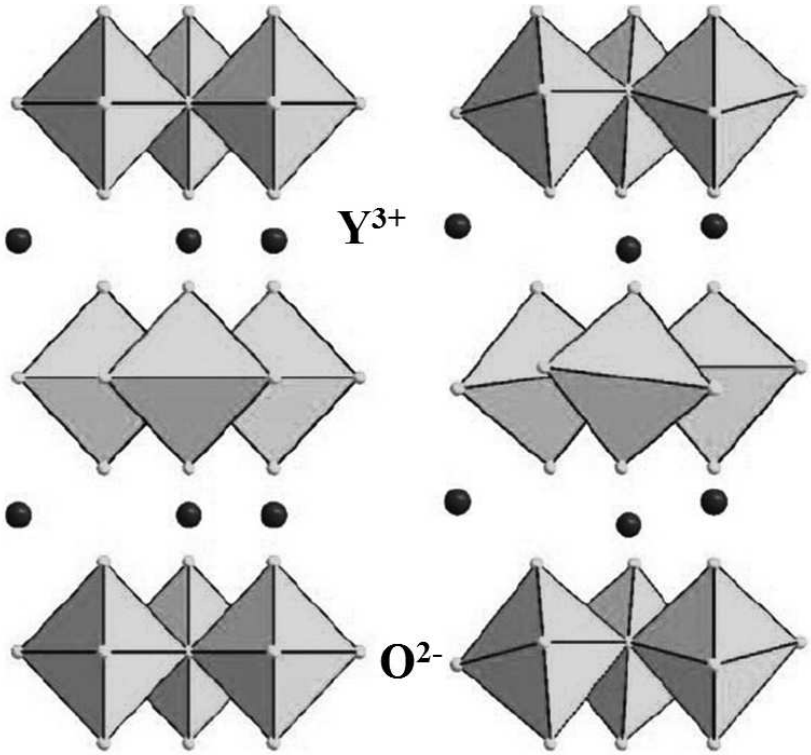
توسط جابجایی یون‌های Re^{3+} و O^{2-} در نتیجهٔ یک گذار فاز ساختاری حاصل می‌شود. $ReMnO_3$ هگزاگونال، متحمل یک گذار از ساختاری از فاز پاراالکتریک دما بالا با گروه فضایی $P\sigma_3/mmc$ به فاز فروالکتریک دما پایین با گروه فضایی $P\sigma_3cm$ به دلیل کاهش دما می‌شود. شکل (۱-۳) ساختار این دو حالت را در $YMno_3$ نشان می‌دهد. $YMno_3$ به دلیل شباهت زیاد به $HoMnO_3$ از نظر اندازهٔ یون خاکی نادر به عنوان نمایندهٔ سیستم‌های مغناطیس خاکی نادر در نظر گرفته شده است.

۱-۱-٤ ساختار مغناطیسی

ساختار مغناطیسی $ReMnO_3$، ابتدا در اواسط سال ۱۹٦۰، توسط برتوت [۱۱] و کوهلر[1] [۱۲] با آزمایش‌های پراش نوترونی بررسی شد. قبل از این آزمایشات یک تحقیق نظری از ساختار مغناطیسی بلورهای نوع ارسنایدِ نیکل انجام گرفت [۱۳].

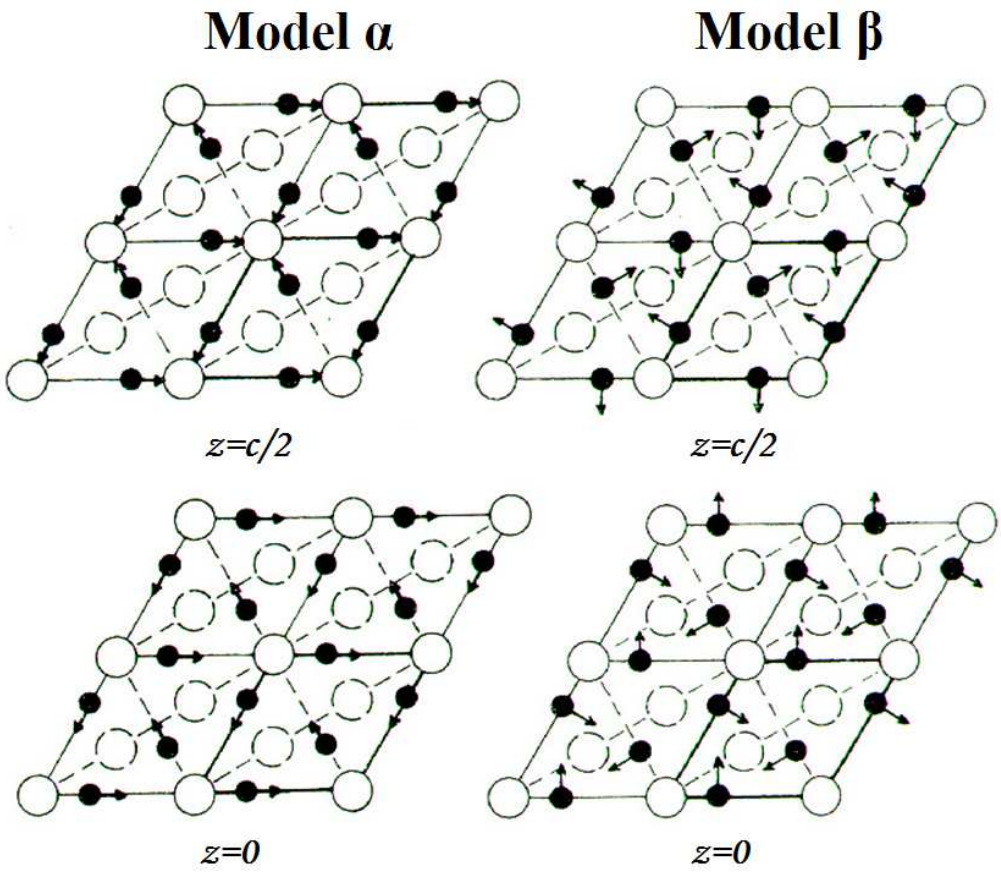
ترکیب NiAS نیز ساختاری شبیه به $ReMnO_3$ دارد. که ٤ آرایش اسپینی برای این گونه ساختارها پیشنهاد می شود. فرومغناطیس، آنتی فرومغناطیس تک محوری، و دو نظم آنتی فرومغناطیس مثلثی.

1 - Kohler



شکل ۱-۳: مرکز تقارن ساختار فروالکتریک. (راست) دما پایین، (چپ) دما بالا. جابجایی یون‌های Y^{3+} نسبت به آنیون‌های اکسیژن، تولید یک گشتاور دوقطبی می‌کند [۱۰].

براساس آزمایشات پراش نوترونی، برتوت و کوهلر پیشنهاد کردند که در میان این چهار نظم مغناطیسی تنها ساختار دو آنتی فرومغناطیس مثلثی وجود دارد. این دو نظم مغناطیسی مدل α و β هستند که بسته به این که لایه‌های Mn در z=۰ و $z = c/2$ جفت شده باشند، وابسته می باشند. که در شکل (۱-٤) نشان داده شده است. مدل α یک آرایش موازی بین صفحات z=۰ و $z = c/2$ دارد در حالی که مدل β، یک آرایش پاد موازی دارد.



شکل ۱-٤: دو مدل اسپینی که توسط برتوت بر طبق آرایش اسپینی Mn نامگذاری شد. مدل α، آرایش اسپینی موازی در صفحه (z=۰ و z =c/۲ و مدل β، آرایش اسپینی پادموازی دارد. دایره‌های باز و بسته، به ترتیب یون‌های خاکی نادر و Mn را نشان می‌دهند. پیکان‌ها، بیانگر آرایش اسپینی هستند [۱۰].

۱-۱-۵ مواد مولتی فروئیک[1]

در سال‌های اخیر، رشد عظیمی در فعالیت‌های تحقیقاتی در زمینهٔ مواد مولتی فروئیک (چند فروئی) و اثرات مغناطو ـ الکتریک صورت گرفته است. بر طبق مفاهیم کلی که توسط هانس اشمید[2] مطرح شد، مواد مولتی فروئیک، موادی هستند که دو یا چند خاصیت ساختاری به صورت نظم‌های فروئیکی را با هم دارا می باشند. مانند؛ فروالاستیک، فروالکتریسیته، فرومغناطیس، بیشتر تحقیقات

1 - Multi ferroic
2 - Hans schmid

اخیر، روی موادی متمرکز شده است که بعضی از اشکال نظم‌های مغناطیسی را (مثـل فرومغنـاطیس، آنتی فرومغناطیس) با فروالکتریسیته مربوط می‌کنند. بنابراین همهٔ مولتی فروئیک‌ها، امروزه اغلـب بـه مرز الکتریک های مغناطیسی تعبیر می‌شود.

تحقیق روی مولتی فروئیک‌ها (یا فروالکتریک‌های مغناطیسی) به صورت تحقیـق روی اثـرات مغناطوـالکتریک است. این اثر خاصیتی است که میدان مغناطیسی می تواند، یک قطبش الکتریکی القا کند و برعکس، یک میدان الکتریکی یک مغناطش را به وجود می‌آورد.

بـه طـور کلـی در ترکیبـات مغناطیسـی‌هـای بـا سـاختار هگزاگونـالی $ReMnO_3$، نظـم‌هـای فرومغناطیس و فروالکتریسیته به طور همزمان مشاهده می‌شود [۱٤].

۱-۲ خواص و کاربردها

ترکیب $HoMnO_3$، خواص متعددی از جمله مولتی فروئیکـی، فروالکتریکـی، ترمـوالکتریکی، دارد که در صنعت به دلیل داشتن این خواص، کاربردهای متفاوتی دارا می باشـد، در ایـن بخـش بـه بررسی کاربردهای این ترکیب می پردازیم.

۱-۲-۱ فناوری جدید ضبط مغناطیسی

ضبط مغناطیسی ، ذخیره‌سازی داده‌ها در رایانه‌های شخصی، لپ‌تاپ‌ها و قطعات کوچک دیگر می باشد. پژوهشگران به دنبال راه‌های جدیدی برای بهبود این فنـاوری مـی باشـند، بـه طـوری کـه چگالی ضبط کنونی به ۱۵۰ گیگابایت در اینچ مربع در محصولات صنعتی و ۳۰۰ گیگابایت در ایـنچ مربع در جدیدترین نمونه‌ها ساخته شده رسیده است.

دستگاه‌های ضبط مغناطیسی امروزی هدها یا حسگرهایی هستند که با قرار گـرفتن بـر سـطح دیسک اطلاعات را می خوانندکه اساس کار این قطعات مبتنی بر اثرهای مغناطو ـ مقاومت است.

با اعمال میدان مغناطیسی به بعضی مواد، مقاومت الکتریکی آن‌ها افزایش یـا کـاهش مـی‌یابـد. پس می‌توان داده‌ها را به صورت سیگنال‌های الکتریکی ذخیره کرد. اخیراً پژوهشگران آزمایشگاه ملی فیزیک در ترینگتون بریتانیا، رهیافت متفاوتی را مطرح و بهبود قابل ملاحظه‌ای را کشف کرده‌اند.

این دانشمندان مبنای طراحی خـود را بـه جـای اثـر مغنـاطو ـ مقاومـت (MR) بـر مغنـاطو ـ الکتریک (ME) مبتنی ساخته‌اند. این نخستین بار است که چنین ابزاری بـه صـورت عمـومی مطـرح می‌شود.ME اغلب در مواد مولتی فروئیک نمایان می‌شود. گروهی از مواد ویژگی فروئیـک چندگانـه (مانند فروالکتریسیته، فرومغناطیس، فروکشسانی) از خود نشـان مـی‌دهنـد. در ME هـا، میـدان‌هـای الکتریکی و مغناطیسی جفت شده‌اند. این موضـوع تبـدیل انـرژی‌هـای ذخیـره شـده در میـدان‌هـای الکتریکی و مغناطیسی را آسان می‌کند. این پدیده نویدبخش کاربردهای جدید گوناگونی است.

در هدهای با قابلیت خواندن اطلاعات، دانشمندان از اثر ME بهره گرفته انـد کـه بـه صـورت مغناطیسی القا شده بود و برای ایجاد تغییرات در قطبش الکتریکی ماده مولتی فروئیک از هر دو میدان ac و dc استفاده می شود. هد خواندن واقعی از هفت لایه (در مقایسه با ۱۵ لایهٔ موجود در یک نمونه هد MR) با ضخامت کل حدود ٤٠nm تشکیل شده بود.

پژوهشگران توضیح می‌دهند که با حرکت هد بر روی بیت‌های سطح دیسک، بیـت‌هـا میـدان برانگیزنده ی لازم را بر حسگر اعمال کرده و ولتاژ واکنش‌ها را القا می‌کنند که از طرح بیت‌ها پیـروی می‌کنند. میدان dc مورد نیاز که پیچیده‌تر است «مغناطوتنگش» القا می‌کند، که این اثر تغییر شکل مواد حسگری مولتی فروئیک تحت تأثیر میدان مغناطیسی است. در نتیجه محیط انرژی مغناطیسـی را بـه انرژی جنبشی تبدیل می کند.

در طرح ME، داده‌ها به صورت مغناطیسی روی مناطق مغناطیده کوچک ، ۲/۳بیت‌های حافظهٔ مغناطیسی است، ذخیره می‌شوند. فرآیند خواندن هنوز به صورت سیگنال الکتریکی (یعنی تابع موج)

به همان ترتیب کار هدهای خواندن مغناطو ـ مقاومتی انجام می‌گیرد. اما وقتی از هدهای خواندن ME، استفاده می‌شود پاسخ الکتریکی به صورت متفاوتی تولید می‌گردد.

در هدهای ME، داده‌ها مستقیماً به صورت ولتاژ القا شده بازخوانده می‌شود. در حالی که هدهای MR، معمولاً به یک جریان آزمون ثابت dc برای اندازه‌گیری تغییر مقاومت نیاز دارد. این تفاوت به هدهای ME این مزیت را می‌دهد که عملکرد گرمایی بهتر و توان مصرفی کمتری داشته باشد [۱۵].

۱-۲-۲ گرماالکتریسیته چیست؟

گرماالکتریسیته همان طور که از نام آن برمی‌آید به پدیده‌هایی اشاره دارد که هم شامل انرژی گرمایی (یا حرارت) هستند و هم شامل الکتریسیته. گرماالکتریسیته، فرآیندی تعادلی نیست بلکه از نوع فرآیند حالت پایا مانند رسانندگی الکتریکی است که به حضور بارهای الکتریکی متحرک نیاز دارد. در نبود میدان مغناطیسی سه اثر ترمودینامیک در پدیده گرما الکتریسیته به صورت زیر است: اثر سی‌بک، اثر پلیته، اثر تامسون.

۱-۲-۳ اثر گرماالکتریک

اوایل قرن نوزدهم، آقایان توماس سی‌بک و جین پلیتر، توانستند پدیده‌ای را که پایهٔ صنعت گرماالکتریک امروز است کشف کنند. سی‌بک یافت که اگردر محل اتصال دو رسانا غیرمشابه، اختلاف دما ایجاد نماید، جریان الکتریکی جاری می‌شود.

از طرف دیگر، پلیتر ثابت کرد که جریان عبوری از میان دو رسانا غیرمشابه، باعث می‌شود که گرما یا منتشر شود و یا در محل اتصال جذب شود. به هر حال، پس از پیشرفت‌های نیمهٔ قرن بیستم در فن‌آوری نیمه رساناها کاربردهای عملی وسایل گرماالکتریک ممکن گردید. به عنوان نمونه از این

وسایل برای تولید توان DC، مانند تبدیل گرمای تلف شده به جریان الکتریکی، استفاده می شود کاربردهای جدید و اغلب جالب ترموالکتریک هر روز در حال پیشرفت است.

۱-۲-٤ اصول کار سیستم گرماالکتریک (TE)

یک سیستم گرماالکتریکی معمولی از یک رشته قرص نیمه رسانای تلوراید بیسموت تشکیل گردیده است و به گونه‌ای تعبیه شده‌اند که یک نوع از حامل‌های بار (مثبت یا منفی) بخش زیادی از جریان را حمل نماید. زوج‌های قرص به گونه‌ای شکل داده شده‌اند که از نظر الکتریکی با هم سری ولی از نظر گرمایی با هم موازی می‌باشند، لایه‌های بیرونی سرامیکی آن‌ها فلزی شده تا بتواند سطح پوششی برای قرص‌ها ایجاد نموده و آن‌ها را از لحاظ الکتریکی به یکدیگر متصل نماید، به این ترتیب، قرص‌ها و لایه‌های بیرونی یک ساختار لایه‌ای را تشکیل می‌دهند.

طرح‌های گرماالکتریکی می‌توانند به صورت منفرد و یا به صورت گروهی با اتصالات سری، موازی و یا سری ـ موازی به کار روند. در بعضی از کاربردها از طرح‌های چند حالته استفاده می‌کنند.

۱-۲-۵ عملکرد تولید توان در سیستم گرماالکتریک

با بکار بردن طراحی که سی‌بک کشف کرد مولدهای انرژی گرماالکتریک انرژی گرمایی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند وقتی که اختلاف دما در اطراف یک وسیلهٔ گرماالکتریک تولید می‌شود یک ولتاژ DC دوسر ترمینال آن ایجاد می‌گردد و چنانچه یک بار به طور مناسب وصل شود جریان الکتریکی برقرار می‌گردد. کاربردهای این فن‌آوری شامل تأمین انرژی برای سیستم‌های مخابرات راه دور، دریانوردی و تأسیسات نفتی می‌باشد.

مواد گرماالکتریکی توسط ناسا برای تولید انرژی در فضاپیماهایی که دوربرد هستند مورد استفاده قرار گرفته است. این مواد همچنین توسط تولید کننده‌های صندلی ماشین برای خنک‌سازی