

۱۳۹۰/۱۲/۷

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

۱۶۴۹۵.



دانشگاه رازی

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته فیزیک گرایش

حالت جامد

بررسی ویژگی های مغناطیسی نیم رساناهای مغناطیسی رقیق شده

استاد راهنما:

دکتر رستم مرادیان

نگارش:

یاور محمدی

بهمن ۱۳۸۴

۱۴۴۹۵۰

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارت و  
نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه  
متعلق به دانشگاه رازی است.



## بررسی خواص آلیاژهای نیمه رسانای مغناطیسی

پایان نامه جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد فیزیک

توسط :

یاور محمدی

تصویب و ارزشیابی شده توسط کمیته پایان نامه با درجه ۷۰

..... (استادیار) آقای دکتر رستم مرادیان : استاد راهنما و رئیس کمیته

..... (استادیار) آقای دکتر مهدی حاج ولیئی

..... (دانشیار) آقای دکتر سیدمحمد الهی

دانشکده علوم دانشگاه رازی

کرمانشاه - ایران

بهمن ۱۳۸۴

## چکیده

هدف این پایان نامه بررسی خواص مغناطیسی نیمرساناهای مغناطیسی رقیق شده است بر پایه ی مدل تنگ بست قوی است. فصل اول چند موضوع را در بر دارد. نخست ما گونه های مختلف نیمرساناها را معرفی می کنیم. در بخش بعدی این فصل در مورد نیمرساناهای مغناطیسی رقیق شده بحث می کنیم. سپس بحث خود را نوع ویژه ای از نیمرساناهای رقیق شده، یعنی نیمرساناهای فرومغناطیس ترکیب گروه سه و پنج، متمرکز می کنیم و ساختارها و روش های رشد دادن آنها را بررسی می کنیم. در ادامه ی این فصل خواص مغناطیسی و مقاومت مغناطیسی این نیمرساناها را بررسی می کنیم.

فصل دوم به بدست آوردن معادله ی حرکت اختصاص داده شده است. برای بررسی خواص مغناطیسی نیمرساناهای مغناطیسی رقیق شده از مدل هایزبرگ استفاده می کنیم. روش محاسباتی ما برای این کار روش تابع گرین است. چون سیستم مورد بحث ما یک سیستم بی نظم است معادله ی حرکت آن به صورت دقیق قابل حل نمی باشد و باید از روش های تقریبی استفاده کرد. فصل بعد به حل معادله ی حرکت در یک روش تقریبی اختصاص داده شده است. برخی از جزئیات این محاسبات در پیوست ارائه شده است.

تقریب پتانسیل همدوس تقریب مناسبی برای حل معادله ی حرکت سیستم های نامنظم است. اولین گام ما در فصل سوم معرفی روش تقریبی پتانسیل همدوس و بازنویسی معادلات با استفاده از این تقریب است. در این معادلات ما به جای مولفه ی  $Z$  اسپین ناخالصی، میانگین دمایی آن را قرار می دهیم. در باقیمانده ی این بخش ما مراحل الگوریتم خود را به منظور محاسبه ی دمایی گذار فرومغناطیسی گالیوم آرسنایدی که در آن منگنز تزریق شده است، ارائه می کنیم.

در روش تابع گرین برای محاسبه ی کمیت های مختلف انتگرال گیری جمع بستن بر روی بردار موج های منطقه ی اول بریلوئن لازم است. بنابراین ما باید حدود ناحیه اول بریلوئن را بدست آوریم. ما فصل چهارم را به این کار اختصاص داده ایم. سرانجام در فصل پنجم نتایجی را که در محاسبه ی دمایی گذار فرومغناطیسی بدست آورده ایم ارائه می کنیم.

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: ویژگیهای مغناطیسی نیمرساناهای مغناطیسی رقیق شده
۲	۱-۱- مقدمه
۳	۲-۱- مغناطیسی کردن نیمرساناهای غیر مغناطیسی
۴	۳-۱- نیمرساناهای فرو مغناطیسی III-V
۵	۴-۱- رشد و آراستی پرتو مولکولی
۶	۵-۱- ساختار بلور گالیوم آرسناید
۶	۶-۱- ثابت شبکه ی (Ga,Mn)As
۷	۷-۱- ویژگیهای مغناطیسی نیمرساناهای مغناطیسی رقیق شده
۸	۸-۱- ویژگیهای ترابری مغناطیسی
۱۰	۹-۱- منشا فرومغناطش
۱۱	۱۰-۱- مکانیزم فرو مغناطش
۱۱	۱-۱۰-۱- مدلی بر پایه ی میدان میانگین
۱۱	۲-۱۰-۱- مدلی بر پایه ی d-الکترونها
۱۲	۱۱-۱- نتیجه گیری
۱۳	فصل دوم: معادله ی حرکت
۱۴	۱-۲- معادله ی حرکت
۲۶	فصل سوم: حل معادله ی حرکت با تقریب پتانسیل همدوس
۲۷	۱-۳- حل معادله ی حرکت با تقریب پتانسیل همدوس
۳۳	۲-۳- مراحل الگوریتم
۳۶	فصل چهارم: بررسی حدود ناحیه ی اول بریلوئن
۳۷	۱-۴- بررسی حدود ناحیه ی اول بریلوئن
۴۷	فصل پنجم: نتایج و نمودارها
۴۸	۱-۵- نتایج و نمودارها
۵۱	پیوست:

## فهرست شکل ها و نمودارها

صفحه	عنوان
۳	شکل ۱-۱ انواع نیمرساناها .....
۶	شکل ۲-۱ نمودار فاز طرح وار.....
۷	شکل ۳-۱ ساختار بلوری گالیوم آرسناید .....
۳۷	شکل ۱-۴ ساختار بلوری گالیوم آرسناید .....
۳۸	شکل ۲-۴ سلول پایه ی ساختار مکعبی مرکز سطحی .....
۳۹	شکل ۳-۴ بردارهای پایه ی بسیط شبکه مکعبی مرکز سطحی .....
۳۹	شکل ۴-۴ بردارهای پایه ی بسیط شبکه مکعبی مرکز حجمی .....
۴۰	شکل ۵-۴ منطقه اول بریلوئن شبکه مکعبی مرکز سطحی .....
۴۱	شکل ۶-۴ نمای ناحیه ی اول بریلوئن در راستای محور Z صفحات بالا .....
۴۲	شکل ۷-۴ نمای ناحیه ی اول بریلوئن در راستای محور Z صفحات پایین .....
۴۳	شکل ۷-۴ نمای ناحیه ی اول بریلوئن در صفحه ی X-Y .....
۴۴	شکل ۸-۴ بردارهای واصل نزدیکترین همسایه های AS .....
۴۸	شکل ۱-۵ نمودار دمای کوری بر حسب پرشدگی باند یه ازای $j=-t$ و $c=0.005$ .....
۴۹	شکل ۲-۵ نمای بزرگ شده ی نمودار دمای کوری بر حسب پرشدگی باند یه ازای $j=-t$ و $c=0.005$ .....
۴۹	شکل ۳-۵ نمودار دمای کوری بر حسب پرشدگی باند یه ازای $j=-2t$ و $c=0.005$ .....
۵۰	شکل ۴-۵ نمای بزرگ شده ی نمودار دمای کوری بر حسب پرشدگی باند یه ازای $j=-2t$ و $c=0.005$ .....

# فصل اول

ویژگیهای مغناطیسی نیمرساناهای مغناطیسی

رقیق شده



## ۱-۱ مقدمه

اخیراً پیشرفتهای چشمگیری در زمینه ی الکترونیک و تکنولوژی اطلاعات صورت گرفته است که از ویژگی های بار و اسپین الکترون بهره می گیرد. جرم، بار و اسپین الکترون در حالت جامد پایه و اساس تکنولوژی اطلاعاتی است که ما امروزه از آن استفاده می کنیم [۱]. ابزارهای نیم رسانا مانند مدارهای مجتمع و وسایل فرکانس بالا از بار الکترون به منظور پردازش اطلاعات استفاده می کنند، در حالیکه مواد مغناطیسی مانند هاردیسکها و نوارهای مغناطیسی، اسپین الکترون را برای ذخیره و ثبت اطلاعات- که در تکنولوژی اطلاعات ضروری است- مورد استفاده قرار می دهند [۱]. اکنون این سؤال پیش می آید که آیا می توان هم اسپین و هم بار الکترون را به منظور بالابردن کارایی وسایل با هم بکار برد، تا همزمان بتوان اطلاعات را ذخیره و پردازش کرد.

اسپینهای قطبیده ی درون نیم رساناها می توانند حالتهای اسپین حاملهای بار را کنترل کنند و در نتیجه می توان با بهره گرفتن از آن به ذخیره اطلاعات پرداخت. به خاطر دلایلی که اکنون آنها را بیان می کنیم معلوم می شود که چرا تا کنون امکان انجام چنین کاری فراهم نشده است.

۱- چون مواد نیم رسانای مورد استفاده مانند سیلیسیم و گالیوم آرسناید شامل یونهای مغناطیسی نمی باشد و غیر مغناطیسی هستند (شکل ۱-پ).

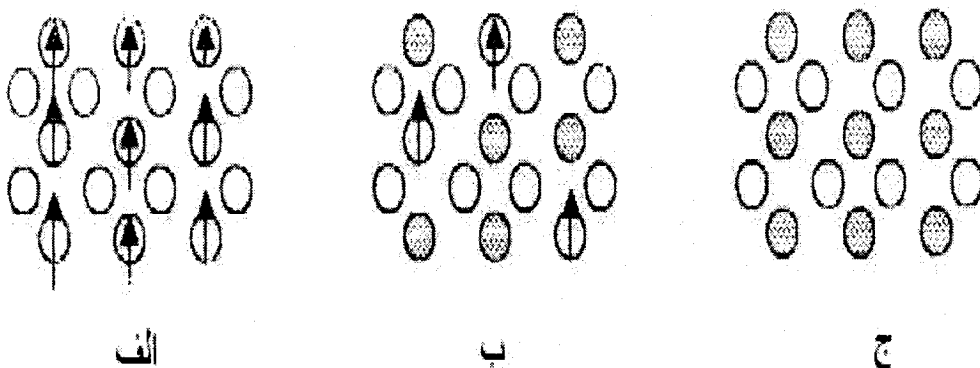
۲- فاکتور  $g$  مغناطیسی این نوع نیم رساناها نسبتاً کوچک است.

۳- در وسایل الکترونیکی به منظور ایجاد اختلاف قابل ملاحظه و مفید بین انرژی دو جهت ممکن اسپین الکترون باید میدان مغناطیسی بزرگی اعمال شود که بسیار بزرگتر از میدانهایی است که امروزه به آنها دسترسی داریم.

۴- ساختار بلوری مواد مغناطیسی کاملاً متفاوت با ساختار مواد نیم رسانایی است که در وسایل الکترونیکی از آنها استفاده می شود که این عامل ترکیب دودسته مواد را با هم کاملاً ناسازگاری کند.

در نیم رساناهای مغناطیسی شکل (۱-الف) که شامل آرایه ای تناوبی از عناصر مغناطیسی هستند ویژگیهای نیم رسانایی و فرومغناطیسی به صورت همزمان وجود دارد. در این نوع نیم رساناها که در فاصله ی سالهای ۱۹۶۰ تا ۱۹۷۰ [۲] به صورت وسیعی مورد مطالعه قرار گرفتند. برهم کنش تبادلی بین الکترونهای موجود در

نوارهای نیم رسانا و الکترونهای جایگزیده در یونهای مغناطیسی سبب پیدایش ویژگیهای جالبی مانند شیفیت طیف قرمز می شود. اما متأسفانه ساختار بلوری چنین نیم رساناهایی با ساختار بلوری سلسیوم و گالیوم آرسناید که در وسایل الکترونیکی از آنها استفاده می شود کاملاً متفاوت است به علاوه رشد بلوری این ترکیبات بسیار کند صورت می گیرد.



شکل ۱-۱: انواع نیم رساناها: (الف) نیم رسانای مغناطیسی (ب) نیم رسانای مغناطیسی رقیق شده (پ) نیم رسانای غیرمغناطیسی

## ۲-۱ مغناطیسی کردن نیم رساناهای غیرمغناطیسی

فایده ی استفاده از نیم رساناها در این است که می توان ناخالصی ها را به درون آنها تزریق کرد و ویژگیهای آنها را تغییر داد و آنها را به نیم رساناهای نوع  $p$  و  $n$  تبدیل کرد. این کار می تواند به این صورت نیز انجام گیرد که عناصر مغناطیسی را به درون مواد نیم رسانا تزریق کرد و اتم های نیم رسانای غیرمغناطیسی را با عناصر مغناطیسی جایگزین کرد و آنها را مغناطیسی کرد. این گونه نیم رساناها را نیم رساناهای مغناطیسی رقیق شده (شکل ۱-ب) می نامند.

این نیم رساناها آلیاژ نیم رساناهای غیرمغناطیسی و عناصر مغناطیسی هستند. در سال ۱۹۸۰ تحقیقات درباره نیم رساناهای مغناطیسی رقیق شده عمدتاً بر روی نیم رساناهای  $IV-II$  مانند  $CdTe$  و  $ZnSe$  متمرکز بود [۳]. در یک نیم رسانای  $II-VI$  عنصرهای گروه  $II$  را با یک فلز واسطه مغناطیسی با لایه ی والانس یکسان مانند منگنز جایگزین می کنند تا یک نیم رسانای مغناطیسی رقیق شده مانند  $(Cd,Mn)Te$  یا  $(Zn,Mn)Se$  بدست آید. نیم رساناهای مغناطیسی رقیق شده ی  $II-VI$  ویژگیهای نوری مانند [۴] اثر فارادی ناشی از میدانهای مغناطیسی که به خاطر برهمکنش تبادل (بر همکنش  $sp-d$ ) بین اربیتالهای  $s$  و  $p$  اتم های غیرمغناطیسی و اربیتالهای  $d$  اتم مغناطیسی می باشد را به خوبی نشان می دهند. در نیم رساناهای

مغناطیسی رقیق شده ی II-VI کنترل جریان با تزریق ناخالصی و تبدیل آنها به نیم رساناهای نوع n و p مشکل است و این یکی از موانع اصلی استفاده از این نوع نیم رساناها در وسایل الکترونیکی است. همچنین برهمکنش تبادل در نیم رساناهای مغناطیسی رقیق شده ی II-V [5] تحت تاثیر برهمکنش پاد فرومغناطیسی اسپین اتم های منگنز قرار می گیرد و منجر به پیدایش رفتارهای پارامغناطیس و پادفرومغناطیسی در این مواد می شود، به علاوه تا کنون ممکن نبوده است که این نوع نیم رساناها در دماهای کم (دمای کمتر از ۲ کلوین) فرومغناطیس شوند این مشکلات سبب شد تا تحقیقات بر روی گونه های دیگر نیم رساناهای مغناطیسی رقیق شده متمرکز شود.

### ۳-۱ نیم رساناهای فرومغناطیسی III-V

به منظور استفاده از نیم رساناهای غیرمغناطیسی و با هدف ذخیره اطلاعات لازم است درصد بالای از یونهای مغناطیسی را به درون این نیم رساناها تزریق کنیم تا آنها را مغناطیسی و یا حتی فرومغناطیسی کنیم. نیم رساناهای III-V مانند گالیوم آرسناید امروزه در گستره وسیعی از تجهیزات الکترونیکی به منظور ساخت وسایل الکترونیکی و اپتوالکترونیکی شامل ترانزیستورهای میکروویو و دیسکهای فشرده و ... بکار می روند<sup>۱</sup>، بنابراین با مغناطیسی کردن نیم رساناهای III-V امکان استفاده ی وسیعی از پدیده های مغناطیسی در وسایل اپتیکی و الکترونیکی که در نیم رساناهای غیرمغناطیسی III-V وجود نداشت فراهم می شود. مشکل اصلی در مغناطیسی کردن نیم رساناهای III-V قابلیت حل پایین عناصر مغناطیسی (مانند منگنز) در این ترکیبات است، زیرا اثرات مغناطیسی تقریباً با درصد یونهای مغناطیسی متناسب هستند و با قابلیت حل پایین ناخالصی های مغناطیسی در حدود  $10^{18}$  اتم بر سانتی متر مکعب یا کمتر از آن، انتظار تغییر چندانی در ویژگیهای مغناطیسی نمی رود. همچنین در روش معمولی رشد بلوری نیز امکان وارد کردن درصد بالایی از یونهای مغناطیسی در نیم رساناهای غیرمغناطیسی وجود ندارد. این مشکل را می توان با استفاده از روش ورآراستی پرتومولکولی که یک روش رشد فیلم نازک در خلاست و این امکان را فراهم می کند که دور از نقطه ی تعادل کار کرد، حل کرد. وقتی درصد بالایی از عناصر مغناطیسی - بیش از حد قابلیت محدود - به درون نیم رسانا تزریق می شود اگر شرایط نزدیک به نقطه ی تعادل باشد، تشکیل فاز دوم رخ می دهد؛ ولی وقتی که بلور در دمای پایین با روش ورآراستی پرتومولکولی رشد کند انرژی گرمایی کافی برای تشکیل فاز دوم وجود ندارد ولی به خاطر وجود یک پتانسیل محلی هنوز امکان رشد ورآراستی یک آرایه ی بلوری ساده فراهم است.

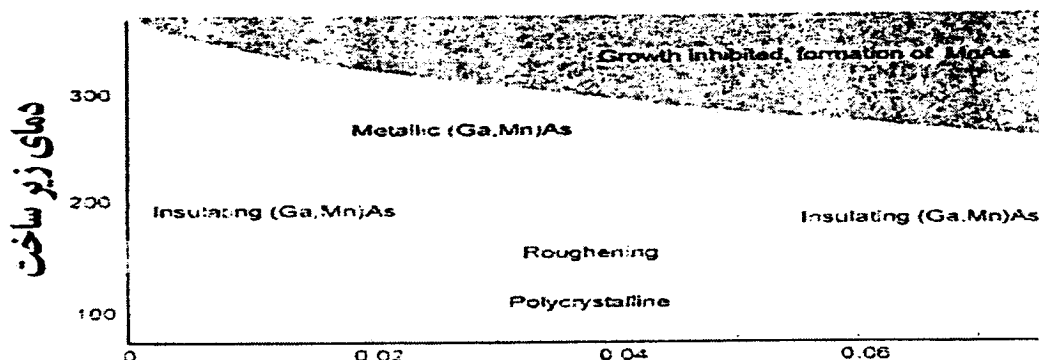
مونکاتا [6] در سال ۱۹۸۹ روش ورآراستی پرتومولکولی دمای پایین را به منظور انجام رشد بلوری

غیرتعادلی بکاربرد و به وسیله ی آموفق شد که بر جداسازی سطحی منگنز و تشکیل فاز دوم غلبه کند و توانست که رشد و آراستی یک آرایه از ایندیوم آرسناید و منگنز را برای تشکیل  $(\text{In,Mn})\text{As}$  کشف کند. در سال ۱۹۹۶ رشد و آراستی  $(\text{Ga,Mn})\text{As}$  و گذار فرومغناطیسی نوع p برای  $(\text{Ga,Mn})\text{As}$  گزارش شد [۷]. بالاترین دمای گذار فرومغناطیسی دمای کوری که برای  $(\text{Ga,Mn})\text{As}$  با  $x = 0.053$  درصد منگنز) بدست آمده در حدود ۱۱۰ کلوین می باشد.

## ۱-۴ رشد و آراستی پرتو مولکولی

در این روش [۸] فیلم های  $(\text{Ga,Mn})\text{As}$  را روی زیر ساخت های نیمه عایق (۰۰۱) گالیوم آرسناید در یک اتاق رشد و آراستی پرتو مولکولی که مجهز به منابع جامد عناصر گالیوم، منگنز، آلومینیوم و آرسنیک می باشد رشد می دهند و به منظور کنترل بازسازی سطحی در حین رشد از الگوی شکست الکترون پراثری بازتابی (RHEED) که در تمام تحت شرایط تثبیت شده آرسنیک (فراوانی آرسنیک) است، استفاده می کنیم [۵]، در این روش پیش از رشد  $(\text{Ga,Mn})\text{As}$  یک لایه ی محافظ گالیوم آرسناید و یا یک لایه ی محافظ  $(\text{Al,Ga})\text{As}$  به وجود می آید. در تشکیل لایه ی محافظ گالیوم آرسناید اگر دمای زیر ساخت،  $T_s$ ، به  $250^\circ\text{C}$  کاهش یابد ابتدا لایه ی محافظ گالیوم آرسناید با ضخامت ۱۰۰ نانومتر و سپس یک لایه ی  $(\text{Ga,Mn})\text{As}$  با ضخامت ۱۵ نانومتر تا ۲۰ نانومتر رشد می کند در صورتی که برای تشکیل لایه ی محافظ  $(\text{Al,Ga})\text{As}$  دمای رشد باید در حد بالایی در حدود  $600^\circ\text{C}$  تا  $700^\circ\text{C}$  حفظ شود و سپس برای رشد لایه ی  $(\text{Ga,Mn})\text{As}$ ،  $T_s$  کاهش داده می شود. هنگامی رشد لایه ی محافظ گالیوم آرسناید در دمای  $250^\circ\text{C}$  شروع می شود، مدل  $4 \times 4$  بازسازی سطحی  $(\text{Ga,Mn})\text{As}$  به یک مدل  $1 \times 1$  تغییر می یابد. ضمناً هنگام تبدیل رشد دمای بالا گالیوم آرسناید به رشد دمای پایین گالیوم آرسناید هیچ نیازی به تغییر در شار پرتوها نمی باشد. رشد  $(\text{Ga,Mn})\text{As}$  با شروع از یک مقدار کم از پرتو، منگنز را و در یک دمای کم لایه ی گالیوم آرسناید باید ثابت نگه داشتند.  $T_s$  در  $250^\circ\text{C}$  شروع می شود در ضمن هیچ احتیاط و توجه خاصی در شروع رشد  $(\text{Ga,Mn})\text{As}$  نیاز نیست. نرخ های رشد نمونه در فیلم های  $(\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x)\text{As}$  (x درصد منگنز) با درصدی بالاتر از ۷٪ درصد در حدود  $0.6$  میکرو متر بر ساعت است. اگر چه ویژگیهای رشد  $(\text{Ga,Mn})\text{As}$  وابسته به پارامترهای رشد مانند  $T_s$  و فشار بالای آرسنیک هستند تا هنگامی که شیوه ی رشد تثبیت شده دنبال شود ویژگیهای فیلم های  $(\text{Ga,Mn})\text{As}$  قابل بازتولید است. به عنوان مثال برای یک درصد منگنز معین، دمای گذار فرومغناطیسی همیشه در حدود  $2000 \pm 10$  کلوین می باشد. وقتی که شار منگنز و یا دمای زیر ساخت،  $T_s$  و یا هر دو خیلی بالا باشد، مدل شکست الکترون پراثری بازتابی پیچیده

آشکار می شود که ظهور فاز دوم منگنز آرسناید (ساختار نیکل آرسناید) را روی سطح نشان می دهد. شکل ۲- نمودار فاز طرح وار رشد و آراستی پرتو مولکولی را برای (Ga,Mn)As نشان می دهد.



شکل ۲-۱: نمودار فاز طرح وار نشان دهنده ی رابطه ی بین پارامترهای رشد (دمای زیر ساخت و منگنز) و ویژگیهای رشد (Ga,Mn)As با و آراستی پرتو مولکولی درصد.

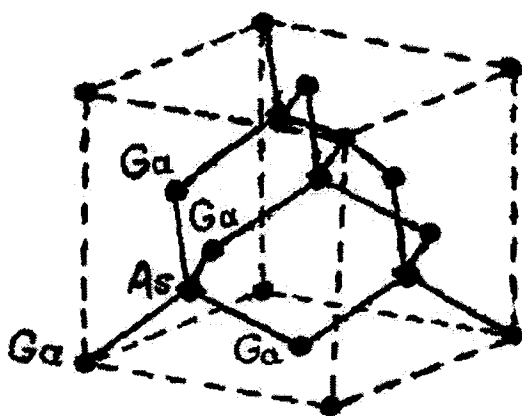
### ۱-۵ ساختار بلوری گالیوم آرسناید

گالیوم آرسناید دارای ساختار الماسی است. ساختار الماسی را می توان به صورت دو ساختار مکعبی مرکز سطحی که نسبت به یکدیگر به اندازه ی یک چهارم قطر اصلی جا به جا شده است. در نظر گرفت. ساختار مکعبی گالیوم آرسناید همانگونه که در شکل ۳- نشان داده شده است از قرار دادن اتم های گالیوم روی یک شبکه ی مکعبی مرکز سطحی و اتم های آرسنیک روی شبکه ی مکعبی مرکز سطحی دیگر نتیجه می شود. یاخته قرار دادی یک مکعب است. مختصات اتمهای گالیوم عبارتند از  $(0, 0, 0)$ ،  $(0, 0, 1/2)$ ،  $(1/2, 0, 0)$  و مختصات اتمهای آرسنیک عبارتند از  $(0, 1/2, 1/2)$ ،  $(1/2, 0, 1/2)$ ،  $(1/2, 1/2, 0)$ ،  $(0, 1/2, 1/2)$ ،  $(1/2, 0, 1/2)$ ،  $(1/2, 1/2, 0)$  شبکه ی فضایی مکعبی مرکز سطحی است. در هر یاخته ی قراردادی چهار مولکول گالیوم آرسناید وجود دارد. در اطراف هر اتم و در فاصله های مساوی از آن چهار اتم از نوع مخالف قرار دارند که در گوشه های یک چهار وجهی منظم مرتب شده اند

### ۱-۶ ثابت شبکه (Ga,Mn)As

ثابت شبکه ی لایه های (Ga,Mn)As را به روش شکست پرتو ایکس و به صورت تابعی از X (درصد ناخالصی) تعیین می کنند که نتایج حاصل از آن همراه با نتایج بدست آمده برای (In,Mn)As در بعضی از

منابع نشان داده شده است. شکست پرتو ایکس حاصل از بازتاب (۱۱۵) نشان می دهد که لایه های (Ga,Mn)As کاملاً کشیده اند که این بیان کننده ی اتصال مشترکی با کیفیت بالاست. این نتیجه با استفاده از روش تحلیلی پرتو X برای ساختارهای ابر شبکه ی GaAs/(Ga,Mn)As مورد تایید قرار گرفته است. پیروقانون وگارد، a با افزایش درصد ناخالصی افزایش می یابد. ثابت های شبکه ی بدست آمده برای ساختار الماسی منگنز آرسناید (۰/۵۹۸ نانومتر) در توافق خوبی با ثابت شبکه ی منگنز آرسناید است که از (In,Mn)As (۰/۶۰۱ نانومتر) بدست می آید این ثابت شبکه با مقداری که برای یک ساختار الماسی فرضی منگنز آرسناید بدست می آید تایید می شود. توافق نتایج نشان می دهد که همه ی اتم های منگنز با آلیاژ ساختار الماسی ترکیب شده اند که این توسط شیودا (shioda) به اثبات رسید او نشان داد که عملاً منگنز به صورت جانشینی به زیر شبکه ی گالیوم ملحق می شود و آن را با اندازه گیری در آشامی پرتو ایکس برای کوچک به اثبات رساند.



شکل ۱-۳ ساختار بلوری گالیوم آرسناید

### ۱-۷ ویژگیهای مغناطیسی نیمرساناهای رقیق شده

اندازه گیریهای مغناطیسی با یک محاسبه گر مغناطیسی SQUID (وسیله ی ابر رسانای تداخل کوانتومی) وجود نظم فرومغناطیسی را در فیلم های (Ga,Mn)As در دماهای کم نشان می دهد. وجود حلقه های هیستریزس تیز و مسطح نشان دهنده ی یک ساختار فرومغناطیس منظم است که در منحنی های مغناطیس بر حسب میدان مغناطیسی ظاهر می شود وقتی که میدان مغناطیسی در سطح فیلم (موازی با سطح فیلم) (۰۰۱) بکار می رود این هیستریزس تیز با یک افزایش پارامغناطیسی در ادامه ی آن همراه است. به نظر می رسد این پاسخ دوم به ویژگیهای ترابری فیلم که در ادامه مورد بحث قرار می گیرد مربوط می شود. بیشتر

نمونه های فلزی اثر پارامغناطیسی اندکی را نشان می دهد در حالیکه در نمونه های عایق اثر پارامغناطیسی بالایی در حدود ۵۰٪ کل مغناطیس مشاهده می شود.

وقتی میدان مغناطیسی عمود بر سطح نمونه اعمال می شود یک مغناطیس گسترده و کشیده با هیستورزیس کم بدست می آید که این نشان دهنده ی این است که جهت آسان برای مغناطیس شدن عمود بر سطح نمی باشد بلکه موازی سطح است. این نتیجه با آنچه که در مورد سطح  $(\text{In,Mn})\text{As}$  (۰۰۱) مشاهده می شود- جهت عمود تنها جهت آسان مشاهده شده برای مغناطیس شدن است- کاملاً متفاوت است. ممکن است این تفاوت با استفاده از اثر کشسانی مغناطیسی شرح داده شود. لایه های  $(\text{In,Mn})\text{As}$  تحت تاثیر فشار کششی دو سوبه (دو محوری) هستند که در اثر آن ثابت شبکه در فضای عمود بر سطح کوچکتر از ثابت شبکه در سطح می شود در حالیکه لایه های  $(\text{Ga,Mn})\text{As}$  تحت تاثیر فشار تراکمی هستند که سبب می شود تا ثابت شبکه در سطح کوچکتر از ثابت شبکه در فضای عمود باشد. توضیح بالا به وسیله ی رشد یک لایه ی محافظ  $(\text{In,Mn})\text{As}$  بر روی لایه ی  $(\text{Ga,Mn})\text{As}$  تایید می شود چون ثابت شبکه ی  $(\text{In,Mn})\text{As}$  بزرگتر از ثابت شبکه ی  $(\text{Ga,Mn})\text{As}$  است در نتیجه فشار کششی دو محوری حاصل می شود و از طریق آن می توان جهت آسان مغناطیس شدن را اندازه گرفت که نتیجه ی اندازه گیریها، جهت موازی سطح را جهت آسان مغناطیس شدن نشان می دهد.

دمای گذار فرومغناطیس را می توان از راههای گوناگون تعیین کرد همچون:

۱- بستگی دمایی پسماند مغناطیسی

۲- نمودار کوری- وایز پذیرفتاری مغناطیسی در دماهای بالای ناحیه ی پارامغناطیس.

همه ی این روشها مقدار یکسانی را برای دمای گذار فرومغناطیسی بدست می دهد رابطه ی بین  $T$  و  $X$  به صورت  $T=2000XK$  برای  $X$  در حدود ۰/۰۵۳ و با افزایش دمای گذار فرومغناطیسی  $X$  کاهش می یابد. دلیل این کاهش هنوز شناخته نشده است.

## ۸-۱ ویژگیهای ترابری مغناطیسی

با استفاده از یک روش اندازه گیری ترابری dc استاندارد، وابستگی دمایی (۲۰۰ تا ۲ کلوین) و وابستگی به میدان مغناطیسی (تا ۷ تسلا) برای مقاومت ورقه،  $R_{\text{sheet}}$  و مقاومت هال،  $R_{\text{hall}}$  برای لایه های  $(\text{Ga,Mn})\text{As}$  با ضخامت ۱۵۰ تا ۲۰۰ نانومتر اندازه گیری شده است. بسته به نوع ترکیب منگنز  $(\text{Ga,Mn})\text{As}$ ، هم رسانش نوع فلزی و هم رسانش نوع عایق را از خود نشان می دهد. بستگی دمایی  $R_{\text{sheet}}$  در نمونه های با ترکیب متوسط منگنز ( $X$  از ۰/۰۳۵ تا ۰/۰۵۳) نشان می دهد که این نمونه ها در ناحیه

ی فلزی گذار عایق- فلز قرار دارند. در حالیکه نمونه های با رصدهای بالا و پایین X در ناحیه ی عایق قرار می گیرند.

اگر چه دقت نتایج اندازه گیریها برای نمونه های فلزی به همان خوبی حاصل اندازه گیریها برای نمونه های عایق است به منظور پرهیز از پیچیدگی ناشی از اثرهای جایگزینی کار بر روی نمونه های فلزی به خصوص بر روی نمونه های با درصد ۰/۰۵۳ متمرکز می شود. مقاومت هال، را می توان به صورت

$$R_{hall} = \frac{R_0}{d} B + \frac{R_s}{d} M \quad 1-1$$

بیان کرد که  $R_0$ ، ضریب هال عادی و  $R_s$ ، ضریب هال غیرعادی،  $d$ ، ضخامت نمونه است و  $M$ ، مغناطش نمونه می باشد. در نمونه های بررسی شده  $R_s$  با  $R_{sheet}$  متناسب است و  $\frac{R_s}{d} = cR_{sheet}$  که  $c$  یک ثابت است.

چون تا حدود دمای اتاق عبارت هال غیرعادی، عبارت غالب است،  $M$  نمونه را می توان از  $R_{hall}$  تعیین کرد  $(M \approx \frac{1}{c} \frac{R_{hall}}{R_{sheet}})$  برای تعیین نوع رسانش و درصد حاملها، ضریب ها عادی را که شیب منحنی  $B-R_{hall}$

است در دمای کم تحت تاثیر میدان مغناطیسی قوی آنجا که مغناطش متوسط اشباع است اندازه می گیریم. با توجه به نمودارها داریم: در ابتدا همانطور که دما،  $T$ ، با افزایش مقاومت ویژه منفی می یابد، مقاومت ورقه نیز،  $R_{sheet}$ ، افزایش می یابد. (مقاومت ویژه منفی) کاهش در مقاومت با افزایش میدان مغناطیسی. مقاومت ویژه در میدان صفر در اطراف دمای گذار فرومغناطیسی ابتدا بسیار زیاد می شود. و سپس کاهش می یابد. همچنین مقاومت مغناطیسی منفی در دمای گذار فرومغناطیسی بسیار افزایش می یابد. از آن نمودار همچنین می توان برای بدست آوردن بستگی دمایی دمای گذار فرومغناطیسی و دمای گذار فرومغناطیسی استفاده کرد که برای نمونه ی نشان داده شده در شکل دمای گذار فرومغناطیسی برابر با ۱۱۰ کلوین می باشد که بالاترین، دمای گذار فرومغناطیسی مشاهده شده برای نمونه های مطالعه شده است. توجه کنید که با مغناطش متناسب است. بستگی دمایی  $M_s$  می تواند با یک تابع استاندارد بریلوئن متناسب شد، که به نظر می رسد نشان دهنده ی این نکته است که فرومغناطش در  $(Ga,Mn)As$  را می توان در چارچوب نظریه ی میدان میانگین مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. اندازه گیری شیب  $B-R_{hall}$  در دمای ۱۱۰K نشان می دهد که برای حالتی که درصد حفره ها در حدود  $1/5 \times 10^2$  بر سانتی متر مکعب است گونه ی رسانش از نوع  $P$  می باشد.

منحنی  $T-R_{sheet}$  یک ماکزیمم را در حدود دمای گذار فرومغناطیسی نشان می دهد که با افزایش میدان مغناطیسی به دماهای بالاتر انتقال می یابد. این رفتار  $R_{sheet}$  را می توان به پراکندگی حاملهای بار به وسیله افت و خیز مغناطیسی ناشی از برهمکنش های تبادلی نسبت داد، که در نیم رساناهای مغناطیسی مشاهده



می شود. مقدار منفی مشاهده شده در مقاومت مغناطیسی را می توان از طریق کاهش پراکندگی با صفر کردن اسپین خالص به وسیله ی میدان مغناطیسی تحلیل کرد. وابستگی  $R_{sheet}$  به میدان مغناطیسی را می توان با فرمول مقاومت ویژه پراکندگی ذاتی که به صورت زیر است نشان داد.

$$\rho_s = 2\pi^2 \frac{k_f}{ne^2} \frac{m^2 \Gamma^2}{h^3} n_s [S(S+1) - \langle \vec{S} \rangle^2] \quad 2-1$$

که  $k_f$  بردار موج فرمی،  $n$  درصد حفره ها،  $M$  جرم موثر،  $\Gamma$  برهمکنش تبادل  $p-d$ ،  $n_s$  درصد منگنز،  $e$  بار یک الکترون،  $h$  ثابت پلانک و بالاخره  $\langle S \rangle$  اسپین متوسط است و  $S = \frac{5}{2}$ . با استفاده از درصد حفره های اندازه گیری شده و جرم موثر برابر نصف جرم موثر الکترون آزاد است. تناسب معادله ی بالا در مورد نتایج آزمایشگاهی برای همه ی نمونه های فلزی نتیجه می دهد.  $\Gamma = 150 \pm 40 \text{ eV A}^0$  و  $N_0 \beta = 3/3 \text{ eV}$  بر حسب  $N_0 \beta$  که برای توصیف برهمکنش  $P-d$  در نیمرسانا های مغناطیسی رقیق شده استفاده می شود.

## ۹-۱ منشأ فرومغناطش

همانطور که نشان داده شده، در غیاب حفره ها، برهمکنش مغناطیسی میان منگنز در نیم رسانای نوع  $n$   $(\text{In, Mn})\text{As}$  و  $(\text{Ga, Mn})\text{As}$  ترمیمی با حاملها از نوع پاد فرومغناطش است. این نتایج نشان می دهد که برهمکنش از نوع برهمکنش مغناطیسی حفره القایی است. اهنو [۹] نشان داد که این نوع فرو مغناطش در چارچوب برهمکنش RKKY قرار می گیرد و این برهمکنش مسبب فرومغناطش حامل القایی در ترکیب  $\text{Te, IV-IV (pb, Sn, Mn)}$  است. دمای کوری را می توان از ثابت برهمکنش محاسبه کرد و درصد حفره ها را می توان از اندازه گیریهای ترابری مغناطیسی تعیین کرد. اگر چه نتیجه بستگی کمی به طول قطع برهمکنش RKKY دارد. دمای کوری محاسبه شده سازگاری خوبی با دمای کوری دارد که از طریق آزمایش تعیین شده است. به خاطر این توافق کمی به نظر می رسد که برهمکنش RKKY محتملترین عامل ظهور فرومغناطش در  $(\text{Ga, Mn})\text{As}$  است. علت اینکه ماهیت نوسانگری برهمکنش RKKY در خاصیت فرومغناطش ظاهر نمی شود احتمالاً به خاطر درصد کم حفره هاست، نشانه ی برهمکنش RKKY در حقیقت تنها وجود خاصیت فرومغناطش است زیرا نخستین صفر نوسانگر که در آن خاصیت پارامغناطیسی ظاهر می شود، در مسافتی بسیار بزرگتر (به خاطر درصد کم حفره ها) از طول قطع برهمکنش RKKY رخ می دهد. فرومغناطش مشاهده شده در گونه های عایق را هم شاید بتوان در همان چارچوب برهمکنش میان حاملی و برهمکنش شبه RKKY توضیح داد زیرا در نمونه های عایق نزدیک به ناحیه گذار عایق-فلز طول جایگزینی بیشتر از ابعاد چند نمونه افزایش نمی یابد (چند میلیمتر) که این هنوز در مقایسه با طول معیار

برهمکنش مغناطیسی (چند نانومتر) کاملاً بزرگ است بنابراین عملاً برهمکنش شبه RKKY در نمونه های عایق نیز کاربرد دارد.

## ۱-۱۰ مکانیزم فرومغناطش

### ۱-۱۰-۱ مدلی بر پایه ی میدان میانگین

در مدلی بر پایه ی نظریه ی میدان میانگین فرض می شود بستگی دمایی پذیرفتاری مغناطیسی بالاتر از دمای گذار با استفاده از قانون کوری- وایز داده می شود و برهمکنش های sp-d به عنوان یک میدان مغناطیسی موثر که بر روی سیستم حاملهای بار اثر می کنند به حساب آورده می شود. وقتی مغناطش خودانگیخته و حفره ها حضور دارند شکافتگی اسپینی در لایه ی والانس رخ می دهد و در نتیجه ی آن انرژی سیستم حاملهای بار کاهش می یابد و همزمان با آن مغناطش خودانگیخته، انرژی آزاد اسپینهای مغناطیسی جایگزیده را افزایش می دهد این اختلاف در انرژی آزاد، با پایین آوردن دما کاهش می یابد تا اینکه در یک دمای معین افزایش و کاهش انرژی یکسان می شود. این دما، دمای کوری با استفاده از فرمول میدان میانگین است. این به فرومغناطش زئر معروف است.

یک هامیلتونی  $6 \times 6$  را که برهمکنش p-d را در برمی گیرد به منظور محاسبه ی انرژی حاملها در نوار والانس بکار می بریم که فقط نوار والانس  $(\text{Ga}, \text{Mn})\text{As}$  که از نوع p است به عنوان نوار رسانش در نظر گرفته می شود. به منظور محاسبه در مورد  $(\text{Ga}, \text{Mn})\text{As}$  فرض می کنیم که پارامترهای نوار همانهایی باشند که برای GaAs داریم. و برای  $N_0 \beta$  که برای برهمکنش p-d با استفاده از طیف نمایی گسیل فوتونی تر از- هسته تعیین شده است داریم:  $N_0 \beta = - 1/2 \text{ eV}$  چگالی سایت های موثر و  $\beta$  انتگرال تبادل p-d است). همچنین فرض می کنیم که یک فاکتور افزایشی برابر  $1/2$  به خاطر برهمکنش حامل - حامل که از تقریب چگالی اسپین محلی بدست می آید داشته باشیم. مقدار  $T_c$  که از این راه محاسبه می شود به خوبی با مقدار خوبی در توافق است اما در مواد از نوع n خاصیت فرومغناطیسی به خاطر مقدار کوچک برهمکنش sp-d،  $N_0 \alpha = - 0.2 \text{ eV}$  برابر با  $-0.2$  الکترون ولت است (که  $\alpha$  انتگرال تبدلی s-d است) به سختی ایجاد می شود.

### ۱-۱۰-۲ مدلی بر پایه نظریه ی d-الکترونها

آکایی با استفاده از یک محاسبه ی پایه ای ابتدایی برای حالت های الکترونی  $(\text{In}, \text{Mn})\text{As}$  نشان داد که وقتی حفره های حضور دارند حالت های فرومغناطیسی نیمه فلزی، پایا می شوند، او پیشنهاد کرد که می توان

فرومغناطش را به عنوان نتیجه ی برهمکنش های تبادلشی ناشی از پرش حفره های d در نظر گرفت. محاسبات نشان داد که خاصیت فرومغناطش در ابرشبکه ی ساختار الماسی فرضی GaAs/MnAs پایاست. علاوه بر آن مکانیزم تشدید دوگانه برای فرومغناطش (Ga,Mn)As از حالت های الکترونی که با تقریب بستگی قوی محاسبه شده است گزارش شد.

## ۱-۱۱ نتیجه گیری

با استفاده از روش وراآراستی پرتو مولکولی در دمای کم، عنصر مغناطیسی منگنز را بیشتر از حد قابلیت حل محدود آن به درون شبکه ی میزبان غیرمغناطیسی گالیوم آرسناید، که در وسایل الکترونیکی نیم رسانا استفاده وسیعی دارد، تزریق می کنند در این آلیاژ همگن، (Ga,Mn)As، عنصر منگنز که سایت های گالیوم را اشغال می کند به همان خوبی حفره ها، ویژگی های مغناطیسی را ایجاد می کند و سبب رسانندگی (Ga,Mn)As می شود. برهمکنش فرومغناطیسی میان حفره ای منجر به خاصیت فرومغناطیسی با دمای گذاری به بزرگی ۱۱۰ کلوین می شود. (Ga,Mn)As را می توان بر روی یک زیر ساخت گالیوم آرسناید رشد داد که پدید آوردن ساختار ترکیبی نیم رسانا و خاصیت فرومغناطش را با هم امکان پذیر می کند بنابراین نیمرساناهای مغناطیسی رقیق شده ی جدید را می توان به منظور بررسی کردن زمینه ای جدید در فیزیک نیم رسانا ها که در آن هم ویژگی های مغناطیسی و هم نیم رسانایی نقش حیاتی بازی می کنند مورد استفاده قرار داد.

# فصل دوم

## معادله ی حرکت