



دانشگاه حکیم سبزواری

دانشگاه حکیم سبزواری

دانشکده علوم پایه

پایان نامه جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد فیزیک گرایش حالت جامد

تاثیر نانو کربن و سیلیکون کارباید بر روی خواص ابررسانایی MgB_2

استاد راهنما :

دکتر شعبان رضا قربانی

استاد مشاور:

دکتر بهنام آزادگان

نگارش :

غزاله فرشیدنیا

بهمن ۱۳۹۱



دانشگاه حکیم سبزواری

سوگند نامه دانش آموختگان دانشگاه تربیت معلم سبزواری

به نام خداوند جان و خرد کزین برتر اندیشه بر نگذرد

اینک که به خواست آفریدگار پاک ، کوشش خویش و بهره گیری از دانش استادان و سرمایه های مادی و معنوی این مرز و بوم، توشه ای از دانش و خرد گردآورده ام، در پیشگاه خداوند بزرگ سوگند یاد می کنم که در به کارگیری دانش خویش، همواره بر راه راست و درست گام بردارم. خداوند بزرگ، شما شاهدان، دانشجویان و دیگر حاضران را به عنوان داورانی امین گواه می گیرم که از همه دانش و توان خود برای گسترش مرزهای دانش بهره گیرم و از هیچ کوششی برای تبدیل جهان به جایی بهتر برای زیستن، دریغ نورزم. پیمان می بندم که همواره کرامت انسانی را در نظر داشته باشم و همنوعان خود را در هر زمان و مکان تا سر حد امکان یاری دهم. سوگند می خورم که در به کارگیری دانش خویش به کاری که با راه و رسم انسانی، آیین پرهیزگاری، شرافت و اصول اخلاقی برخاسته از ادیان بزرگ الهی، به ویژه دین مبین اسلام، مبادینت دارد دست نیازم. همچنین در سایه اصول جهان شمول انسانی و اسلامی، پیمان می بندم از هیچ کوششی برای آبادانی و سرافرازی میهن و هم میهنانم فروگذاری نکنم و خداوند بزرگ را به یاری طلبم تا همواره در پیشگاه او و در برابر وجدان بیدار خویش و ملت سرافراز ، بر این پیمان تا ابد استوار بمانم.

نام و نام خانوادگی و امضای دانشجو



دانشگاه حکیم سبزواری

فرم چکیده‌ی پایان‌نامه‌ی دوره‌ی تحصیلات تکمیلی

مدیریت تحصیلات تکمیلی

نام خانوادگی دانشجو: فرشیدنیا	نام: غزاله	ش دانشجویی: ۸۹۲۳۷۳۲۰۱۰
استاد راهنما: دکتر شعبان رضا قربانی	استاد مشاور: دکتر بهنام آزادگان	
دانشکده: علوم پایه	رشته: فیزیک	گرایش: حالت جامد
مقطع: کارشناسی ارشد	تاریخ دفاع:	تعداد صفحات:

عنوان پایان‌نامه: تاثیر نانو کربن و سیلیکون کارباید بر روی خواص ابررسانایی MgB_2

کلیدواژه‌ها: ابررسانایی - MgB_2 - چگالی جریان بحرانی - میدان بحرانی

چکیده

برای کاربردهای تجربی ابررسانای MgB_2 ، دستیابی به جریان‌های بالا در حضور میدان مغناطیسی موضوع پژوهش‌های کلیدی قرار گرفته‌است، که با بهبود ویژگی‌های ابررسانایی همچون میدان بحرانی بالایی، میدان برگشت‌ناپذیری و چگالی جریان بحرانی حاصل می‌شود. یک روش مؤثر برای بهبود این ویژگی‌ها، ایجاد مراکز میخکوبی شار در MgB_2 می‌باشد. یافته‌های حاصل از پژوهش‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که آرایش شیمیایی با مواد غیرمغناطیسی مناسب‌ترین رویکرد برای افزایش قابلیت MgB_2 در حمل جریان‌های بالا می‌باشد. پژوهش حاضر به بررسی تأثیر افزودن آلاینده‌های ۵ درصد وزنی نانوکربن و ۱۰ درصد وزنی سیلیکون کارباید به MgB_2 ، روی خواص ابررسانایی آن می‌پردازد. مشاهده شد آرایش MgB_2 در هردو نمونه، مقادیر میدان بحرانی بالایی و میدان برگشت‌ناپذیری به‌ازای میدان‌های بالا افزایش می‌یابد. چگالی جریان بحرانی نیز در هردو نمونه‌ی آلاییده نسبت به نمونه‌ی خالص، افزایش می‌یابد. اما افزودن SiC به MgB_2 باعث بهبودی بیشتر در پارامترهای ابررسانایی می‌شود. برای مطالعه‌ی سازوکار میخکوبی در نمونه‌های مورد بررسی، سه مدل میخکوبی دو-هوگس، شی و گرایسن بر داده‌های تجربی برازش داده شدند. نتیجه‌ی حاصل این بود که مدل‌های دو-هوگس و شی قادر به توصیف سازوکار میخکوبی در این نمونه‌ها نیستند. بررسی مدل گرایسن حضور ترکیبی از هردو سازوکار میخکوبی δI_c و δT_c را در هردو نمونه تأیید می‌کند. در بخش آخر، با استفاده از نظریه‌ی تراوش، تغییرات چگالی جریان بحرانی در هردو نمونه مورد بررسی قرار گرفت و فقط در میدان‌های میانی توافق بین داده‌های تجربی و نظریه‌ی تراوش مشاهده شد.

امضای استاد راهنما

فهرست

صفحه

عنوان

فصل اول: مقدمه‌ای بر ابرسانایی

- ۱-۱ پیشگفتار..... ۱
- ۲-۱ ویژگی‌های منحصر بفرد ابرساناها..... ۳
- ۱-۲-۱ مقاومت الکتریکی..... ۳
- ۲-۲-۱ دیامغناطیس کامل..... ۵
- ۳-۱ دسته بندی ابرسانا..... ۶
- ۱-۳-۱ ابرسانای نوع I..... ۷
- ۲-۳-۱ ابرسانای نوع II..... ۷
- ۳-۳-۱ ابرسانای دمای بالا..... ۸
- ۴-۱ پارامترهای بحرانی در یک ماده ابرسانا..... ۹
- ۱-۴-۱ میدان بحرانی..... ۹
- ۲-۴-۱ چگالی جریان بحرانی..... ۱۰
- ۳-۴-۱ نظریه تراوش..... ۱۱

فصل دوم: خواص ابرسانای MgB_2 و تأثیر آلاینده‌های شیمیایی

- ۱-۲ خواص ابرسانای MgB_2 ۱۵
- ۲-۲ تأثیر آلاینده‌های شیمیایی بر ابرسانای MgB_2 ۱۷
- ۱-۲-۲ تأثیر فلزات بر ابرسانای MgB_2 ۱۸
- ۱-۱-۲-۲ آهن..... ۱۸
- ۲-۱-۲-۲ آلومینیوم..... ۱۸
- ۳-۱-۲-۲ لیتیم..... ۲۰

- ۲-۲-۱-۴ لانتانیم..... ۲۱
- ۲-۲-۲ تأثیر ترکیبات حاوی کربن بر ابررسانای MgB_2 ۲۲
- ۲-۲-۳ میخکوبی شار مغناطیسی..... ۲۳
- ۲-۲-۱-۳ مدل میخکوبی دو-هوگس..... ۲۵
- ۲-۲-۲-۲ مدل میخکوبی شی..... ۲۶
- ۲-۲-۳-۴ مدل میخکوبی δI و δT_c ۲۷

فصل سوم: نتایج

- ۳-۱ مقدمه..... ۳۱
- ۳-۲ روش آماده‌سازی نمونه‌ها..... ۳۲
- ۳-۳ بررسی ساختار بلوری با تحلیل الگوی پراش پرتو X ۳۲
- ۳-۴ مقاومت الکتریکی و دمای بحرانی..... ۳۴
- ۳-۵ میدان برگشت‌ناپذیری و میدان بحرانی بالایی..... ۳۷
- ۳-۶ چگالی جریان بحرانی..... ۴۰
- ۳-۷ سازوکارهای میخکوبی..... ۴۵
- ۳-۷-۱ مدل میخکوبی دو هوگس..... ۴۶
- ۳-۷-۲ مدل میخکوبی شی..... ۴۹
- ۳-۷-۳ مدل میخکوبی δI و δT_c ۵۰
- ۳-۸ نظریه‌ی تراوش..... ۵۶
- مراجع..... ۵۸
- مقالات..... ۶۲

۱-۱ پیشگفتار

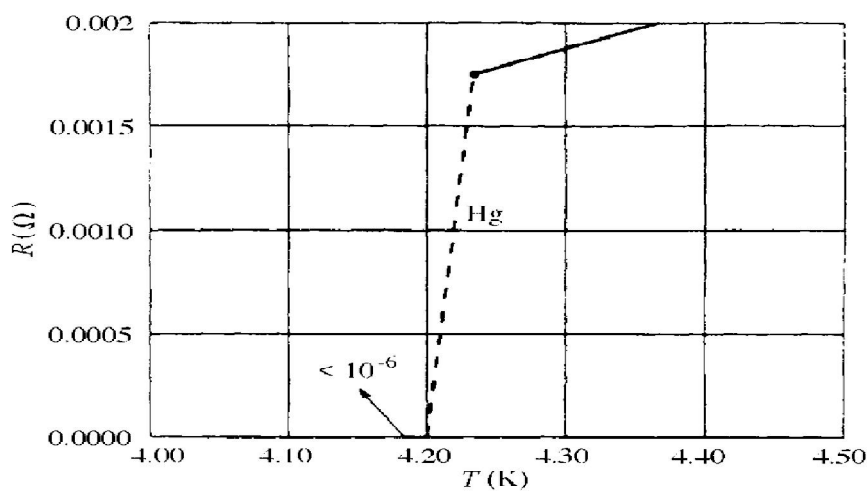
مایع سازی موفقیت آمیز هلیوم در سال ۱۹۰۸ منجر به دسترسی به دماهای پایین حدود ۱ کلوین شد. سه سال بعد کامرلینگ اونس^۱ در دانشگاه لیدن که بر روی وابستگی دمایی مقاومت ویژه الکتریکی جیوه مطالعه می کرد، متوجه سقوط ناگهانی مقاومت در دمای نزدیک ۴K شد^[۱]. این پدیده را ابرسانایی نامیدند. افت ناگهانی مقاومت الکتریکی جیوه در شکل (۱-۱) نشان داده شده است.

ابرساها نسبت به رساناهای معمولی دارای ۴ وجه اساسی متمایز هستند. این مواد بدون هدر دادن انرژی، الکتریسته را هدایت می کنند، بنابراین می توانند جایگزین بسیار خوبی برای رساناهای معمولی، به منظور صرفه جویی در انرژی، شوند. ابرساناها به سبب اینکه مقاومت الکتریکی ندارند گرم نمی شوند، در صورتی که در یک رسانای معمولی، به علت داشتن مقاومت، انرژی به شکل گرما هدر می رود. این گرما خود مشکلاتی را در مدارهای الکتریکی ایجاد می کند. لذا به کارگیری ابرساناها در چنین

^۱Kamerling Onnes

مدارهایی بسیار مطلوب خواهد بود. سومین مزیت ابرساناها، توانایی آن‌ها در تولید میدان‌های مغناطیسی قوی است، به طوری که آهنرباهای الکتریکی ابرسانایی خیلی کوچک قادرند، میدان‌های مغناطیسی بسیار قوی ایجاد کنند. سرانجام مزیت چهارم ابرساناها کاربرد آنها در ساخت پیوندهای جوزفسون است.

پس از کشف ابرسانایی و علی‌رغم شناخت اهمیت آن، برای چندین دهه هیچ‌گونه تلاشی در جهت استفاده‌ی عملی از آن انجام نشد. عدم امکان دستیابی به سرمای فوق‌العاده زیاد، مانع بزرگی در به‌کارگیری ابرساناها بود. اولاً وسایل و تجهیزاتی که برای تهیه هلیوم مایع و سرد کردن ماده ابرسانا لازم است پیچیده و پرهزینه می‌باشد، که حتی امروزه هم به‌عنوان یک مشکل خودنمایی می‌کند. ثانیاً کاهش خاصیت ابرسانایی با افزایش میدان مغناطیسی و جریان‌های عبوری از آن است. این مشکلات در حدود سال ۱۹۴۰ تا اندازه‌ای حل شد و در سال‌های اخیر با ساخت وسایل پیشرفته و کشف ابرساناهای با دمای بحرانی بالا، مسأله رسیدن به دمای پایین مورد نیاز برای ظاهرشدن پدیده‌ی ابرسانایی تا حدی برطرف گردیده است [۲].



شکل (۱-۱): افت ناگهانی مقاومت الکتریکی جیوه.

اولین ماده ابرسانا، که توسط اونس کشف شد، فلز جیوه بود. چون جیوه به‌وسیله‌ی تقطیر مکرر خالص می‌شود [۳]. مطالعات و نتایج به‌دست‌آمده بر روی ابرساناهای متعارف (ابرساناهای دمای پایین) را به سه دوره تقسیم کرد. در دوره اول مطالعات بر روی جریان عبوری از ابرساناها در حضور میدان

مغناطیسی و جریان‌های ماندگار انجام گرفت. این مطالعات نشان داد که نمی‌توان یک جریان نامحدود را در حضور میدان‌های مغناطیسی بزرگ از ابرسانا عبور داد و یا میدان‌های مغناطیسی بزرگ را به آن اعمال نمود. به عبارت دیگر یک جریان بحرانی و میدان مغناطیسی بحرانی وجود دارند که بالاتر از آنها خاصیت ابرسانایی از بین می‌رود. در دوره دوم رفتار غیرعادی ظرفیت گرمایی و اثر مایسنر مشاهده شد و نظریه‌های الکترومغناطیسی لندن و ترمودینامیکی کارتر^۱-کازیمیر^۲ ارائه شد. در دوره سوم نظریه گینزبرگ لاندائو و نظریه BCS جهت ارائه مبانی نظری ابرسانایی مطرح شد.

در این فصل خصوصیات اساسی مربوط به ابرسانا مورد بحث قرار می‌گیرد. در فصل دوم اثر آلاینده‌ها روی خواص MgB_2 توضیح داده می‌شود و در فصل سوم نتایج به دست آمده ارائه می‌گردد.

۲-۱ ویژگی‌های منحصر بفرد ابرساناها

مقاومت الکتریکی صفر و دیامغناطیس کامل مهمترین خواص حالت ابرسانایی هستند که در ادامه به توضیح هر یک از این ویژگی‌ها پرداخته می‌شود.

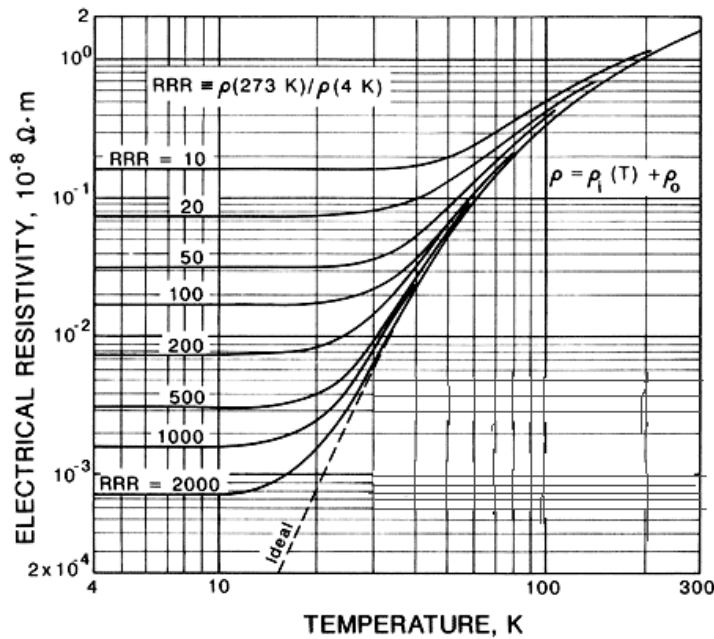
۱-۲-۱ مقاومت الکتریکی صفر

مقاومت الکتریکی رسانای کامل به اندازه‌ی کافی کوچک می‌باشد، به طوری که قابل اندازه‌گیری نیست. مقاومت الکتریکی فلزات به علت وجود ناخالصی‌ها و نواقص شبکه و نوسانات شبکه ایجاد می‌شود. اگر این عوامل مستقل فرض شوند، مقاومت فلزات را می‌توان به صورت زیر نوشت [۴]:

$$\rho(T) = \rho_0 + \rho_1(T) \quad (1-1)$$

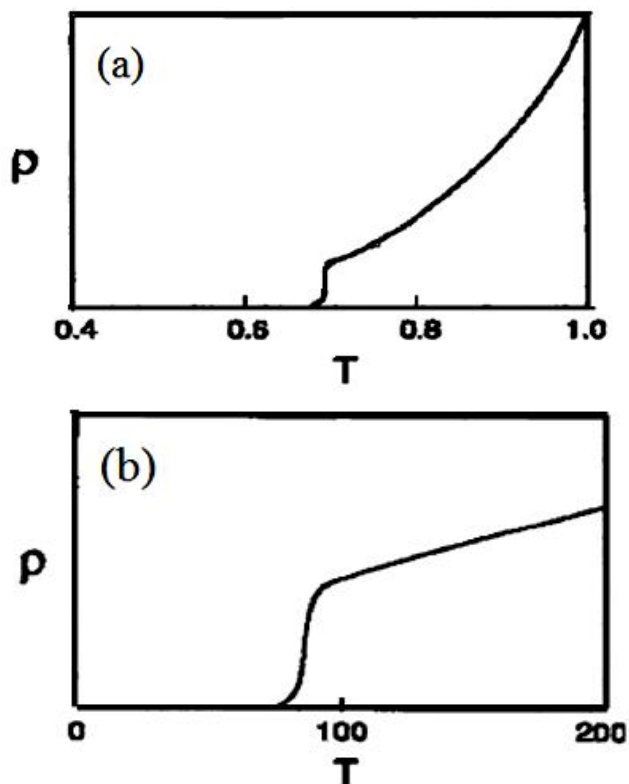
که در آن ρ_0 مقاومت باقیمانده نامیده می‌شود که ناشی از ناخالصی و نواقص شبکه است و $\rho_1(T)$ مقاومت ویژه الکتریکی ذاتی است که ناشی از برهمکنش الکترون-فونون می‌باشد. شکل (۱-۲) مقاومت مس را برحسب دما و درجه خلوص نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش درجه خلوص، مقاومت الکتریکی کاهش می‌یابد. طوری که برای درجات خلوص بالا می‌توان مقدار مقاومت را برای یک بلور کامل تقریباً صفر فرض نمود.

^۱ Garter
^۲ Cassimir



شکل (۱-۲): مقاومت الکتریکی مس برحسب دما [۵].

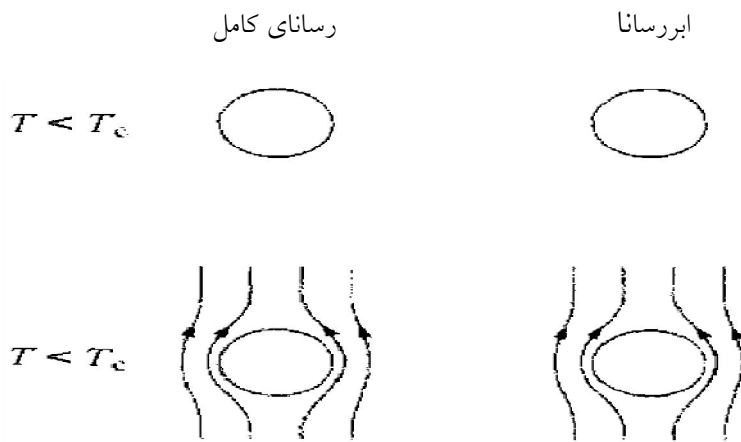
همان‌طور که گفته شد مقاومت الکتریکی رساناهای خالص در دمای صفر تقریباً صفر است. در حالی که مقاومت الکتریکی ابررساناها در زیر یک دمای معین به نام دمای بحرانی، صفر است. شکل (۱-۳) تغییر مقاومت الکتریکی را به صورت تابعی از دما برای یک ابررساناهای دمای پایین و بالا را نشان می‌دهد. مقامت الکتریکی حالت عادی برای ابررسانای دمای پایین به صورت T^5 ولی برای ابررسانای دمای بالا به طور خطی تغییر می‌کند [۶].



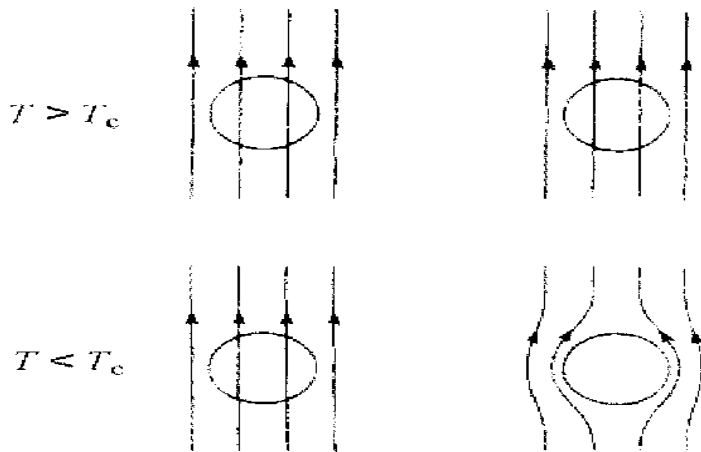
شکل (۳-۱): تغییر ناگهانی مقاومت برای یک (a) ابرسانای دمایی پایین و (b) ابرسانای دمایی بالا [۶].

۲-۲-۱ دیا مغناطیس کامل

با کشف اثر مایسنر مشاهده گردید که یک رسانای کامل لزوماً ابررسانا نیست. زیرا وجود میدان مغناطیسی صفر در داخل آن‌ها بستگی به تقدم و تأخر سرد کردن در حضور یا عدم حضور میدان مغناطیسی دارد. همان‌طور که در شکل‌های (۴-۱) و (۵-۱) نشان داده شده است اگر ابتدا ماده تا زیر دمایی بحرانی سرد شود و سپس میدان مغناطیسی اعمال گردد، میدان نمی‌تواند به داخل آن نفوذ کند. در حالیکه اگر ابتدا میدان اعمال شود و سپس سرد گردند، میدان به داخل ابررسانا نفوذ نمی‌کند ولی در داخل رسانای کامل حبس می‌گردد.



شکل (۴-۱): اعمال میدان مغناطیسی بعد از سرد کردن رسانای کامل و ابرسانا [۷].



شکل (۵-۱): اعمال میدان مغناطیسی و بعد سرد کردن رسانای کامل و ابرسانا [۷].

۳-۱ دسته بندی ابرسانا

ابرساناها پاسخهای متفاوت به میدانهای مغناطیسی خارجی دارند [۸]. باتوجه به توانایی یک ابرسانا در دفع میدان مغناطیسی می‌توان ابرساناها را به دو نوع I و II تقسیم کرد. یکی از روشها جهت تعیین نوع ابرسانا مقایسه طول همدوسی و عمق نفوذ است. طول همدوسی^۱ مقیاسی از کمینه فضای لایه گذار بین حالت ابرسانایی و عادی می‌باشد. عمق نفوذ مغناطیسی^۲ عبارت است از فاصله‌ای که در آن فاصله $(x = \lambda_0)$ ، میدان مغناطیسی به طور نمایی به $\frac{1}{e}$ مقدار اولیه‌اش در سطح ابرسانا کاهش می‌یابد [۳]. اگر طول همدوسی ξ بزرگتر از عمق نفوذ مغناطیسی λ باشد، ابرسانای نوع I ولی برعکس اگر

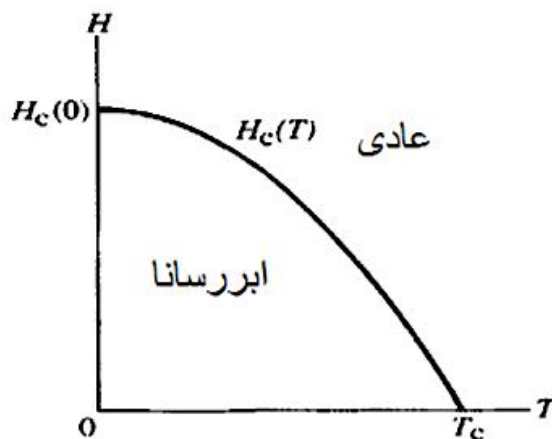
^۱ Coherence Length

^۲ Magnetic Penetration Depth

کوچکتر باشد ابرسانای نوع II می‌باشد [۹].

۱-۳-۱ ابرسانای نوع I

فلزات ساده و خالص از قبیل قلع و سرب از نوع اول هستند. چنین ابرساناهایی میدان مغناطیسی خارجی را تا یک مقدار معین تحمل می‌کنند. این مقدار آستانه، میدان بحرانی، H_c ، نامیده می‌شود که برای مواد مختلف متفاوت است و به دما بستگی دارد. چنانچه اندازه میدان مغناطیسی از این مقدار بحرانی بیشتر شود ابرسانا به حالت معمولی خود برمی‌گردد و خاصیت ابرسانایی خود را از دست می‌دهد [۱]. دیاگرام فاز ابرسانای نوع I در شکل (۶-۱) نشان داده شده است.



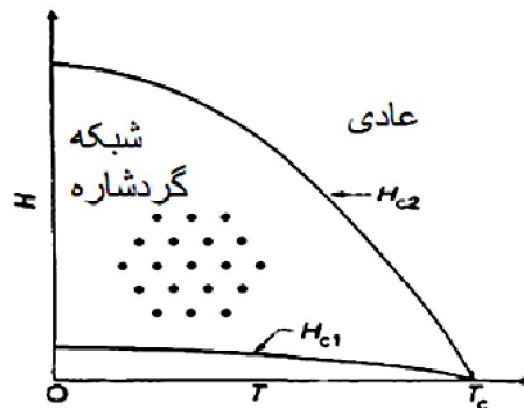
شکل (۶-۱): میدان بحرانی در ابرسانای نوع I.

۱-۳-۲ ابرسانای نوع II

رفتار ابرسانای نوع II کمی متفاوت از نوع اول است. این دسته از ابرساناها اغلب آلیاژهای فلزات واسطه را شامل می‌شود. در ابرسانای نوع II یک میدان بحرانی بالایی، H_{c2} ، هم وجود دارد که مقدار آن بزرگتر از میدان بحرانی پایینی، H_{c1} ، می‌باشد.

زمانی که میدان مغناطیسی از اولین میدان بحرانی بیشتر شود، ابرسانا میدان مغناطیسی خارجی را به‌طور کامل دفع نکرده و خطوط شار مغناطیسی، گردشاره‌ها، به‌صورت کوانتوم‌های شار به داخل ابرسانا نفوذ می‌کنند. وقتی اندازه میدان به دومین مقدار بحرانی می‌رسد، ماده ابرسانا به حالت معمولی خود بر-

می‌گردد. بیشتر ابرساناهایی که امروزه از نظر کاربردی مورد توجهند از نوع II می‌باشد. شکل (۷-۱) دیاگرام فاز ابرسانای نوع II را نشان می‌دهد. همان‌طورکه در شکل مشاهده می‌شود، بالاتر از میدان بحرانی پایینی، گردش‌ها در یک شبکه شش گوشه‌ای به علت داشتن کمترین انرژی حالت پایه، نظم یافته‌اند.



شکل (۷-۱): میدان بحرانی در ابرسانای نوع II [۷].

۳-۳-۱ ابرسانای دمای بالا

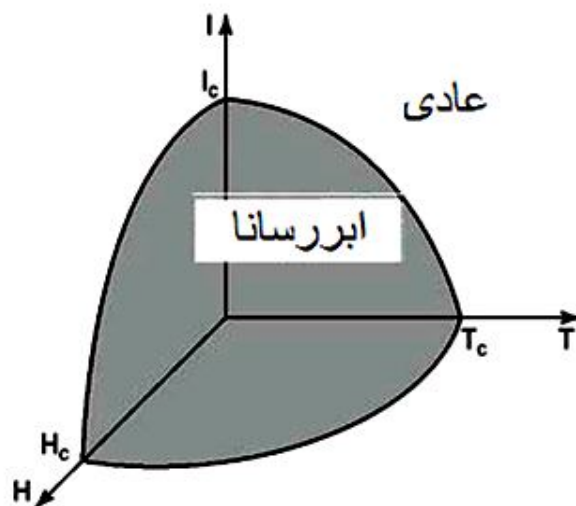
در سال ۱۹۸۴ راور، میشل و دیگر همکارانش آغاز به ساخت یک‌سری ترکیبات مرکب از لانتانیم، باریوم، مس و اکسیژن کردند. اگر بعضی از این مواد را تا دمای نزدیک ۴۰ K سرد می‌کردند ممکن بود، مشاهده کنند که این مواد در برابر شارش جریان هیچ مقاومتی از خود نشان نمی‌دهند. تا اینکه در سال ۱۹۸۶ متوجه شدند این سرامیک‌ها دسته جدیدی از ابرساناها با دمای گذار بالا [۹] حدود ۳۰ K می‌باشند. این سرامیک‌ها، ابرساناهای با دمای بحرانی بالا نامیده شدند. زیرا دمای بحرانی آن‌ها از دمایی که توسط نظریه BSC پیش‌بینی می‌شد، بالاتر هستند [۱۰]. بعلاوه این ابرساناها دارای جریان‌ها و میدان‌های مغناطیسی بحرانی بزرگتری نیز هستند. این ترکیبات دارای ساختار لایه‌ای شامل صفحات CuO_2 می‌باشند.

یک سال بعد از کشف ابرسانا با دمای گذار بالا، ترکیب $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ با دمای بحرانی ۹۰ K کشف شد. به فاصله یک سال بعد از این کشف در سال ۱۹۸۸ دو ترکیب جدید Bi-Ca-Sr-Cu-O و

Ti-Ca-Ba- Cu-O کشف شدند. در سال ۱۹۹۳ ترکیبات اکسید مس جیوه با دمای گذار حتی بالاتر از ترکیبات تالیوم کشف شد. همه‌ی این ترکیبات در ناهمسانگردی، ساختار بلوری لایه لایه و دارا بودن صفحات CuO_2 مشترک هستند [۱۰].

۱-۴ پارامترهای بحرانی در یک ماده ابرسانا

حالت عادی از حالت ابرسانایی در دیاگرام فاز یک ماده ابرسانا، که بواسطه پارامترهای دمای بحرانی، چگالی جریان بحرانی و میدان مغناطیسی بحرانی تعیین می‌شود، توسط یک سطح جدا می‌شود. این پارامترهای بحرانی به یکدیگر وابسته هستند. این وابستگی در شکل (۱-۸) برای یک نمونه ابرسانا نشان داده شده است. در ادامه هر کدام از این پارامترها توضیح داده می‌شوند.



شکل (۱-۸): نمودار فاز میدان مغناطیسی، چگالی جریان و دما.

۱-۴-۱ میدان بحرانی

همان‌طورکه در شکل (۱-۶) نشان داده‌شد ابرسانای نوع I دارای میدان بحرانی H_c می‌باشد که این میدان مرز بین ناحیه ابرسانایی و ناحیه عادی را تعیین می‌کند و به فرم زیر در نظر گرفته می‌شود [۳]:

$$H_c = H_0 \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right] \quad (۲-۱)$$

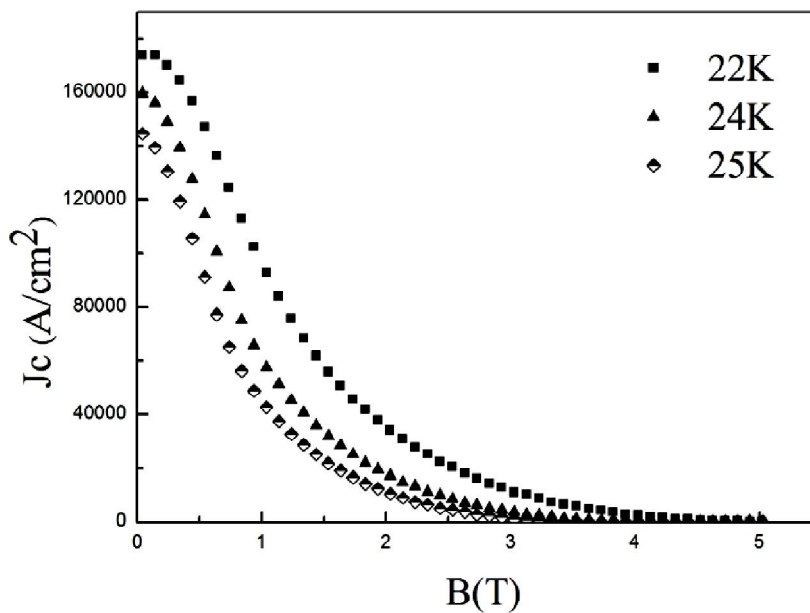
H_0 میدان بحرانی در صفر مطلق می‌باشد.

در ابرسانای نوع II (شکل (۷-۱)) دو نوع میدان بحرانی وجود دارد. میدان بحرانی پایینی، یعنی کمترین میدانی که در میدان‌های بزرگتر از آن یک شبکه‌ی گردشاره در ابرسانا ایجاد می‌شود و میدان بحرانی بالایی که مرز بین ناحیه با حالت آمیخته و ناحیه عادی تشکیل می‌دهد.

۱-۴-۲ چگالی جریان بحرانی

اعمال میدان مغناطیسی با شدت بالا تنها راه حذف خاصیت ابرسانایی نیست، عبور جریان الکتریکی به قدر کافی بزرگ از یک ابرسانا نیز می‌تواند سبب برگشت آن به حالت عادی‌اش گردد. بیشترین مقدار جریانی که می‌تواند، بدون آن‌که حالت ابرسانایی از بین برود، از داخل یک ابرسانا عبور کند، جریان الکتریکی بحرانی نامیده می‌شود. در حضور میدان مغناطیسی یا عدم وجود میدان مغناطیسی ثابت، چگالی جریان بحرانی تابعی از دماست [۸]. شکل (۹-۱) چگالی جریان ابرسانای MgB_2 آلاییده به سیلیکون‌کارباید را بصورت تابعی از میدان مغناطیسی در چند دمای مختلف نشان می‌دهد.

رساناهای معمولی مانند مس غالباً از نظر رسانش الکتریکی همسانگردند به عبارت دیگر جریان الکتریکی در تمام جهات به خوبی هدایت می‌شود و به جهت خاصی وابسته نیست. در حالی که بسیاری از ابرساناهای جدید با دمای بحرانی بالا ناهمسانگردند و در آنها جریان الکتریکی در یک جهت خاص بهتر از جهت‌های دیگر هدایت می‌شود. یکی از نظریه‌هایی که براساس آن می‌توان جریان الکتریکی بحرانی را محاسبه کرد نظریه تراوش است که در زیر مختصراً بررسی می‌گردد.



شکل (۹-۱): چگالی جریان بحرانی ابرسانای MgB_2 آلاییده به SiC.

۱-۴-۳ نظریه تراوش

ابتدا در نظریه‌ی گراف، از نظریه تراوش استفاده شد. دیویدسون^۱ و تینکهام^۲ [۱۱] اولین بار برای توصیف ابرساناها، این نظریه را، که ساده‌ترین مدل برای نمایش گذار فاز بود، به کار گرفتند. همچنین در ابرساناهای دمای بالا و ترکیب ابرسانای MgB_2 ، برای توصیف جریان نشی از نظریه تراوش استفاده گردید [۱۲]. ابرسانای MgB_2 دارای طول هم‌دوسی نسبتاً بالایی می‌باشد، بنابراین اتصالات مرزدانه‌ای ابرسانای MgB_2 نسبت به ابرساناهای دمای بالا قویتر می‌باشد [۱۳]. جریان از طریق همین مرزدانه‌ها در داخل ماده جاری می‌شود [۱۳]. در این پروژه به بررسی این نظریه در مورد ابرسانای MgB_2 آلاییده پرداخته می‌شود. در ابرسانای MgB_2 به علت ناهمسانگردی ذاتی خواص مغناطیسی، جهت‌گیری متفاوت دانه‌ها باعث جاری شدن ابرجریان‌ها به صورت ناهمگن می‌شود. مرزدانه‌ها در این ماده به عنوان مراکز میخکوبی مؤثر رفتار می‌کنند [۱۴-۱۹] و شارش جریان را محدود نمی‌کنند [۲۰-۲۲]. اما اغلب فازهای ثانویه باعث کاهش سطح مؤثر و در نتیجه کاهش شارش جریان می‌شود.

میدان بحرانی بالایی در دمای ثابت براساس رابطه‌ی ناهمسانگردی گینزبرگ-لانداو، به زاویه‌ی بین لایه‌های بورن در دانه و میدان مغناطیسی اعمال شده بستگی دارد [۲۳]. رابطه زیر براساس اندازه-

^۱ Davidson

^۲ Tinkham

گیری گشتاور مغناطیسی به صورت تجربی به دست آمده است که نشان دهنده‌ی متفاوت بودن میدان بحرانی بالایی و بنابراین چگالی جریان بحرانی در دانه‌ها است [۱۳]:

$$B_{c2}(\theta) = \frac{B_{c2}(\pi/2)}{\sqrt{\gamma^2 \cos^2(\theta) + \sin^2(\theta)}} \quad (۳-۱)$$

در رابطه بالا θ زاویه بین میدان اعمالی و محور c است. γ فاکتور ناهمسانگردی میدان بحرانی بالایی می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\gamma = \frac{B_{c2}(\pi/2)}{B_{c2}(0)} = \frac{B_{c2}^{\parallel}}{B_{c2}^{\perp}} \quad (۴-۱)$$

در رابطه بالا B_{c2}^{\parallel} و B_{c2}^{\perp} به ترتیب، میدان بحرانی بالایی در راستای موازی و عمودی بر محور c نمونه هستند. با توجه به جهت‌گیری دانه‌ها کاهش دما باعث افزایش تعداد دانه‌هایی می‌شود که ابرسانا می‌گردند. اگر p احتمال ابرسانا شدن یک دانه باشد p_c آستانه تراوش نامیده می‌شود که وقتی $p < p_c$ باشد مقاومت محدود می‌ماند. زمانی که $p = p_c$ شود، اولین جریان ابرسانایی ایجاد شده و مقاومت ناپدید می‌شود. آستانه تراوش به شرایط آماده‌سازی نمونه و تعداد اتصالات دانه‌های همسایه بستگی دارد.

برای به دست آوردن چگالی جریان‌های بحرانی برحسب میدان اعمال شده، فرض می‌شود که برای میدان‌های کوچکتر از میدان بحرانی بالایی [۲۴]، در نمونه‌های بس بلور، مرزدانه‌ها مراکز میخکوبی غالب هستند و برای میدان‌های بزرگتر از میدان بحرانی بالایی چگالی جریان بحرانی صفر است، در این صورت:

$$J_c \propto \frac{[1 - B/B_{c2}(\theta)]^2}{\sqrt{B_{c2}(\theta)B}} \quad (۵-۱)$$

رابطه (۵-۱) برای ابرسانای همسانگرد برقرار است [۲۵]. پارامتر ناهمسانگردی از طریق وابستگی پارامترهای بازگشت‌پذیر به زاویه وارد معادله (۵-۱) می‌شود. برای ساده‌سازی، از جزئیات میخکوبی مرزدانه‌ای و تأثیر کیفی یک مرزدانه‌ی معین چشم‌پوشی می‌شود. جریان بحرانی در میدان‌های بالا براساس رابطه‌ی $[1 - B/B_{c2}(\theta)]^2$ و در میدان‌های پایین متناسب با $B^{-0.5}$ کاهش می‌یابد [۱۳]. جهت به دست آوردن چگالی جریان بحرانی، نمونه به صورت شبکه‌ای تصادفی از مقاومت‌ها فرض می‌گردد [۲۶ و ۲۷].

در یک ابرسانای مرزدانه‌ای، اگر p با چگالی جریان بزرگتر از J به‌عنوان کسری از دانه‌ها تعریف شود، رسانندگی σ_{eff} تابعی از چگالی جریان J می‌شود. رسانندگی با بهنجارش مناسب و با در نظر گرفتن $p=1$ با رابطه زیر تعیین می‌شود [۱۳]:

$$I = \sigma_{\text{eff}} = \sigma_0 \left(\frac{p(J) - p_c}{1 - p_c} \right)^t J = \sigma_p J \quad (۶-۱)$$

در رابطه (۶-۱)، σ_0 را سطح مقطع نمونه، t پارامتری است که به ابعاد نمونه بستگی دارد و مقدار آن در سیستم‌های سه بعدی برابر $1/76$ به‌دست آمده است [۲۸] و σ_p را سطح مقطع کل مسیرهای جریان در یک کسر معین p دانه‌های رسانا می‌باشد. اگر جریان کوچکتر از حد معینی باشد، $p=1$ شده و در کل ابرسانا جریان همگنی شارش می‌کند. با افزایش جریان به اندازه‌ی ΔI ، p کوچکتر از یک می‌شود و چگالی جریان به‌اندازه‌ی $\Delta J = \Delta I / \sigma_p$ افزایش می‌یابد. تا موقعی که p برابر p_c شود جریان افزایش می‌یابد. چگالی جریان ماکروسکوپی با انتگرال‌گیری روی همه‌ی ΔI های بی‌نهایت کوچک و تقسیم آن بر σ_0 به‌دست می‌آید [۲۸ و ۱۳]:

$$J_c(B) = \int_0^{J_c^{\text{max}}(B)} \left(\frac{p(J) - p_c}{1 - p_c} \right)^t dJ \quad (۷-۱)$$

در رابطه بالا $J_c^{\text{max}}(B)$ به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$p[J_c^{\text{max}}(B)] = p_c \quad (۸-۱)$$

$p(J)$ کسری از دانه‌ها است که چگالی جریان بحرانی آن‌ها از J بیشتر است و مقدار میانگین تقریبی بین p_c و p_{max} دارد که p_{max} بیشترین مقدار $p(J)$ است. با این رابطه می‌توان چگالی جریان را به‌دست آورد با این تفاوت که جمع روی چگالی جریان‌های گسسته دانه‌ها جایگزین انتگرال می‌شود. در این روش چهار پارامتر، میدان بحرانی بالایی B_{c2} ، قدر مطلق چگالی جریان بحرانی در رابطه‌ی (۵-۱)، احتمال بحرانی p_c و ناهمسانگردی γ مطرح هستند. میدان بحرانی بالایی را می‌توان به‌صورت مستقیم در دماهای بالا محاسبه کرد و به دماهای پایین تعمیم داد و دیگر پارامترها از طریق برازش لگاریتم $J_c(B)$ از رابطه‌ی (۷-۱) با داده‌های تجربی با روش کمترین مربع‌ها به‌دست می‌آیند.

۱-۲ خواص ابررسانای MgB_2

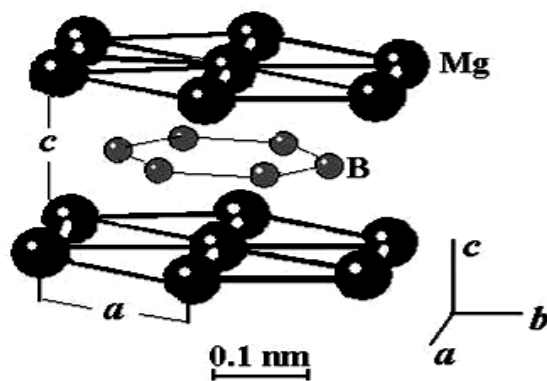
یکی از جالب‌ترین پرسش‌های مطرح در پژوهش‌های ابررسانایی این است که " T_c در ابررساناها تا چه اندازه می‌تواند بالا باشد؟". تا زمان کشف MgB_2 در ابررساناهای دمای بالا، دمای گذار حدود 30 K گزارش شده بود [۲۹-۳۱] و هیچ ابررسانایی با دمای بحرانی بالاتر از این پیدا نشده بود [۳۰]. آکیمیتسو^۱ کشف کرد که ترکیب MgB_2 دمای گذاری حدود $T_c = 39\text{ K}$ دارد که بیشترین مقداری است که تا آن زمان به ثبت رسیده بود [۳۲]. این ترکیب دوتایی، به دلیل دمای گذار بالا، وجود دو گاف ابررسانایی، نبود مشکل اتصال‌های ضعیف و قیمت کم مواد اولیه توجه زیادی را در زمینه‌ی تحقیقات بنیادی و کاربردی در دنیا به خود جلب کرد [۳۳-۳۶]. این ماده برای کاربردهایی مثل تصویرسازی با تشدید مغناطیسی (MRI)، آهن‌رباهای قوی، برخی انواع کابل‌ها و هادی‌های جریان انتخاب مناسبی می‌باشد.

^۱Akimitsu

فصل دوم: خواص ابررسانای MgB_2 و تأثیر آلاینده‌های شیمیایی

بنا به پژوهش‌های انجام‌شده، MgB_2 طول همدوسی بلندی در حدود $5/2 \text{ nm}$ دارد [۳۷]. این موضوع ابررسانای MgB_2 را با مشکل وجود اتصال ضعیف در مواد ابررسانای دمای بالا مواجه نمی‌کند و بنابراین ایجاد چگالی جریان‌های بالا را ممکن می‌سازد. لذا بیشتر مطالعاتی که روی MgB_2 انجام شده بر محاسبه‌ی چگالی جریان بحرانی متمرکز شده‌اند. برای انتقال چگالی‌های بالای جریان در میدان‌های مغناطیسی بالا از نمونه‌های کلوخه‌سازی استفاده می‌شود.

هرچند که ابررسانای MgB_2 مشابه ابررساناهای دمای بالا می‌باشد ولی براساس نظریه BCS خواص این ترکیب مشابه ابررسانای دمای پایین قابل توصیف است [۳۸-۳۹]. ساختار بلوری این ماده به صورت هگزاگونال (از نوع $A1B_2$ ، با گروه فضایی $P6/mmm$) می‌باشد. مشابه ساختار گرافیت، صفحات شش‌گوشی بورون در بین صفحات سه‌گوشی منیزیم جای گرفته‌اند. در شکل (۱-۲) ساختار لایه‌ای این فلز نشان داده شده است. اتم‌های Mg الکترون‌های خود را در اختیار اتم‌های B قرار می‌دهند و ترکیب یونی (B^-) و (Mg^{2+}) ایجاد می‌شود. یک اتم Mg و دو اتم B سلول واحد MgB_2 را تشکیل می‌دهند.



شکل (۱-۲): ساختار بلوری MgB_2 [۳۸].

ساختار این ابررسانای گرافیت مانند دارای دو گاف انرژی σ و π می‌باشد و عمدتاً اربیتال‌های بور مقید به σ یا π هستند که پیوندهای قوی σ در صفحات بور و پیوندهای ضعیف π در بین‌شان وجود دارد. چون توزیع بار حالت‌های مقید σ با توجه به مکان اتم‌های بور در صفحه متقارن نیست، حالت‌های مقید σ خیلی قوی جفت می‌شوند که این جفت شدگی قوی در تشکیل زوج الکترون قوی حالت‌های مقید σ با یک گاف انرژی میانگین Δ حدود $6/8 \text{ meV}$ نتیجه می‌شود [۴۰]. این جفت شدگی