



دانشگاه تربیت معلم سبزوار

# دانشگاه تربیت معلم سبزوار

دانشکده علوم پایه

پایان نامه جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد فیزیک گرایش حالت جامد

سازوکار میخکوبی در ابررسانای  $MgB_2$  آلائیده با روغن سیلیکون  
**Pinning mechanism in superconductor silicon oil doped  $MgB_2$**

استاد راهنما :

دکتر شعبان رضا قربانی

استاد مشاور:

دکتر بهنام آزادگان

نگارش :

سید محمد فهیمی

بهمن ۱۳۹۰

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه گجرات  
مرکز تحقیقات  
فیزیک

بسمه تعالی

فرم ۱۱۴-ت

شماره:

تاریخ:

صورتجلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

با تلاوت آیاتی چند از کلام ... مجید جلسه دفاع از پایان نامه آقای سید محمد فهیمی دانشجوی رشته فیزیک (حالت جامد) با عنوان **خواص اپرسانایی  $TMgB_2$  لاییده با روغن سیلیکون** در ساعت ۱۱ روز دوشنبه مورخ ۲۴/۱۱/۹۰ در محل دانشکده علوم پایه (اتاق ۲۵۰) تشکیل گردید .  
پس از استماع گزارش ارائه شده توسط دانشجو و استاد راهنما هیات داوران و حاضران استوالاتی را مطرح و آقای سید محمد فهیمی به دفاع از موضوع پرداخت و به استوالات آنها پاسخ گفت .  
سپس پایان نامه توسط هیات داوران مورد ارزشیابی قرار گرفت و نمره **۱۹٫۵۰** برابر درجه **عالی** برای آن تعیین گردید .

به این ترتیب ضمن تصویب پایان نامه مزبور از این تاریخ آقای سید محمد فهیمی به عنوان کارشناس ارشد در رشته فیزیک (حالت جامد) شناخته می شود .

ردیف	نام و نام خانوادگی	سمت	امضا
	دکتر شعبان رضا قربانی	استاد راهنما	
	دکتر بهنام آزادگان	استاد مشاور	
	دکتر وحید دادمهر	استاد داور	
	دکتر جواد باعدی	استاد داور	
	دکتر براتعلی فیض آبادی	نماینده تحصیلات تکمیلی	

نام و نام خانوادگی و امضای مدیر گروه

نورانی آزادگان

رونوشت

- ۱- معاونت آموزشی و تحصیلات تکمیلی دانشگاه جهت اطلاع
- ۲- معاونت پژوهشی دانشگاه جهت اطلاع
- ۳- آموزش دانشکده جهت درج در پرونده دانشجو
- ۴- دانشجو

تقدیم بہ پدر عزیزم و مادر مہربانم



### سوگند نامه دانش آموختگان دانشگاه تربیت معلم سبزوار

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، مبیانت 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.

## فهرست مطالب

صفحه

عنوان

### فصل اول: خواص فیزیکی ابرساناها

۲	۱.۱ مقدمه
۳	۲.۱ ویژگی‌های منحصر بفرد ابرساناها
۳	۱.۲.۱ مقاومت الکتریکی صفر در برابر جریان مستقیم
۴	۲.۲.۱ دیامغناطیس کامل
۵	۳.۱ پارامترهای بحرانی در یک ماده ابرسانا
۵	۱.۳.۱ دمای بحرانی
۶	۲.۳.۱ چگالی جریان بحرانی
۷	۳.۳.۱ میدان بحرانی
۸	۴.۱ مبانی نظری پدیده ابرسانایی
۸	۵.۱ دسته بندی ابرساناها
۹	۱.۵.۱ ابرسانای نوع I
۱	۲.۵.۱ ابرسانای نوع II
۱	۶.۱ میخکوبی شار مغناطیسی
۱	۱.۶.۱ مدل میخکوبی دو- هوگس
۱	۲.۶.۱ مدل میخکوبی $\delta I$ و $\delta T_c$
۱	۷.۱ نظریه تراوش

### فصل دوم: خواص ابرسانای $MgB_2$ و روش‌های اندازه‌گیری

۱۹	۱.۲ خواص ابرسانای $MgB_2$
۲۱	۲.۲ ناهمسانگردی
۲۱	۳.۲ دمای بحرانی

۲۱	-----	۴.۲ جریان بحرانی
۲۲	-----	۵.۲ روش‌های اندازه‌گیری
۲۳	-----	۶.۲ چگالی جریان بحرانی
۲۴	-----	۷.۲ میدان برگشت ناپذیری و میدان بحرانی بالایی
۲۵	-----	۸.۲ انرژی فعال‌سازی
۲۶	-----	۹.۲ محاسبه جریان نشتی

### فصل سوم: نتایج و کارهای انجام شده

۳۱	-----	۱.۳ مقدمه
۳۱	-----	۲.۳ روش ساخت نمونه
۳۱	-----	۳.۳ بررسی ساختار بلوری ابررسانای $MgB_2$ آلاییده به روغن سیلیکون
۳۳	-----	۴.۳ چگالی جریان بحرانی
۳۶	-----	۵.۳ مقاومت الکتریکی $MgB_2$ آلاییده به روغن سیلیکون
۳۸	-----	۶.۳ خزش شار مغناطیسی
۴۰	-----	۷.۳ میدان برگشت ناپذیری و میدان بحرانی بالایی
۴۱	-----	۸.۳ سازوکارهای میخکوبی در ابررسانای $MgB_2$ آلاییده به روغن سیلیکون
۴۳	-----	۹.۳ . مدل میخکوبی $\delta I$ و $\delta T_c$
۴۶	-----	۱۰.۳ دیاگرام فاز ابررسانای $MgB_2$ آلاییده به روغن سیلیکون
۴۸	-----	۱۱.۳ نظریه تراوش
۵۱	-----	جمع‌بندی
۵۲	-----	مراجع
۵۵	-----	مقالات

## چکیده:

با کشف ابررسانایی در ترکیب  $MgB_2$  و مزایای فراوانی که این ماده در کاربردهای صنعتی دارد، تلاش‌های زیادی جهت عملی‌سازی این کاربردها صورت گرفت. چگالی جریان ابررسانایی در این ماده بزرگ است اما بدلیل میخکوبی ضعیف شار مغناطیسی، با افزایش میدان مغناطیسی خارجی، چگالی جریان سریعاً افت می‌کند. برای برطرف کردن این مشکل و به منظور افزایش حد بالای میدان بحرانی می‌توان از آرایش استفاده کرد. این رساله به بررسی ویژگی‌های ابررسانای  $MgB_2$  آلائیده به روغن سیلیکون می‌پردازد. در این پایان نامه دو نمونه کلوخه‌سازی شده در دماهای  $600^\circ C$  و  $900^\circ C$  مورد بررسی قرار گرفته شده است. با اضافه کردن آرایش، چگالی جریان بحرانی و میدان بحرانی بالایی افزایش یافته است. در نمونه کلوخه‌سازی شده در دمای  $900^\circ C$  بهبود پارامترهای مدنظر بشکل بهتری صورت گرفته است. انرژی فعالسازی در دو نمونه محاسبه گردید و مشخص شد که پارامترهای بحرانی در نمونه  $900^\circ C$  بهبود یافته‌اند. دو مدل میخکوبی بر داده‌های تجربی برازش شده‌اند و نتایج نشان می‌دهد که مدل دو هوگس نمی‌تواند بدرستی رفتار میخکوبی را در این دو نمونه توضیح دهد. با اعمال مدل گرایسن مشخص شد سازوکار میخکوبی  $\delta l$  و  $\delta T_c$  در این دو نمونه اهمیت دارند. در دماهای پائین سازوکار میخکوبی غالب، سازوکار  $\delta l$  است و با افزایش دما سازوکار میخکوبی  $\delta T_c$  اهمیت پیدا می‌کند. در عین حال هیچکدام از دو سازوکار فوق به تنهایی قادر به توصیف فرآیند میخکوبی در این دو نمونه نبودند. با در نظر گرفتن همزمان دو سازوکار میخکوبی  $\delta l$  و  $\delta T_c$ ، می‌توان به درک بهتری از فرآیند میخکوبی در این دو نمونه رسید. در پایان چگالی جریان بحرانی در دو نمونه با استفاده از نظریه تراوایش مورد بررسی قرار گرفته است و پارامترهای ناهمسانگردی و احتمال بحرانی در دماهای مختلف بدست آمده‌اند.



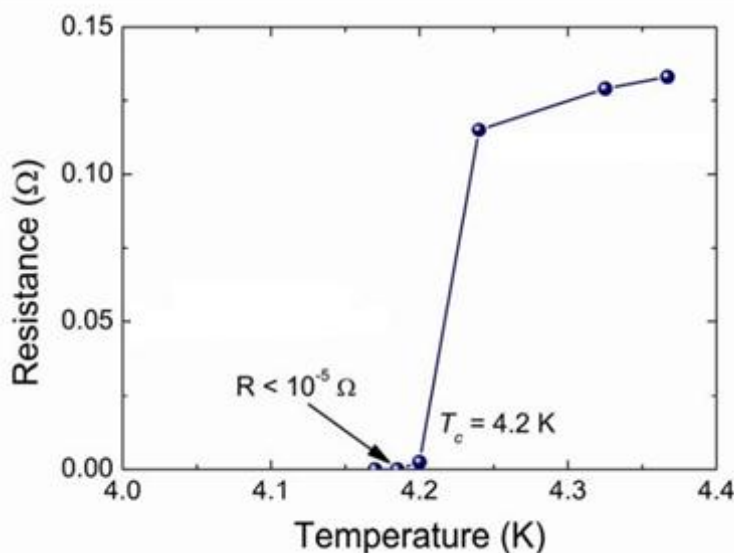
# فصل اول

ویژگی‌های فیزیکی ابررساناها

## ۱.۱. مقدمه:

ویژگی‌های فیزیکی مواد، به دمای محیطی که در آن مورد آزمایش قرار می‌گیرند وابسته است. فیزیکدانان از گذشته این مطلب را می‌دانستند و همیشه در پی بررسی خواص الکتریکی، مغناطیسی و مکانیکی مواد در دماهای مختلف بودند. تمایل دانشمندان برای رسیدن به دماهای پائین و در کنار آن تلاش آنان برای مایع سازی هلیوم، تنها عنصر جدول تناوبی که تا سال ۱۹۰۸ به شکل مایع در نیامده بود، منجر به دستیابی به فاز مایع هلیوم شد [۱]. در این سال کامرلینگ اونس<sup>۱</sup> با مایع سازی هلیوم و رسیدن به دماهایی در حدود یک درجه کلوین، دریچه‌ای جدید از تحقیقات را به روی دانشمندان گشود [۲].

در سال ۱۹۱۱ اونس در پی بررسی خواص فیزیکی جیوه خالص، در دماهایی در حدود دمای هلیوم مایع بود، که با پدیده جالبی روبه‌رو شد که امروزه ابررسانایی نامیده می‌شود. او مشاهده کرد که در دمای  $4/2$  کلوین مقاومت ویژه الکتریکی جیوه خالص به یک مقدار غیر قابل اندازه‌گیری افت می‌کند، در حالی که تحقیقات قبلی برای عناصری مثل طلا و پلاتین که رساناهای خوبی در دمای اتاق هستند یک مقاومت باقیمانده را در دماهای پائین نشان می‌دهد [۳]. در پی این کشف تلاش‌ها برای پیدا کردن دیگر عناصر جدول تناوبی که خاصیت ابررسانایی، از خود نشان دهند آغاز شد. در شکل (۱) افت ناگهانی مقاومت الکتریکی جیوه نشان داده شده است.



شکل ۱. افت ناگهانی مقاومت الکتریکی جیوه [۴]

<sup>۱</sup>KamerlingOnnes

بررسی خواص فیزیکی ترکیبات بین فلزی<sup>۱</sup> در سالهای دهه ۳۰ منجر به کشف پدیده ابررسانایی در این مواد شد، بالاترین دمای بحرانی برای این مواد ۲۳ کلوین بود. به مدت ۵۶ سال این دما بالاترین دمای گذار در بین مواد ابررسانا باقی ماند. اما تمایل دانشمندان برای رسیدن به دماهای گذار بالاتر و کاربردهای فراوانی که مقاومت الکتریکی صفر در صنایع، برای تولید میدانهای مغناطیسی بزرگ و خطوط انتقال نیرو دارد، باعث شد این تلاش‌ها ادامه یابد تا اینکه در سال ۱۹۸۶ دو دانشمند به نامهای بدنورز<sup>۲</sup> و مولر<sup>۳</sup> در آزمایشگاه IBM در زوریخ، پدیده ابررسانای را در سرامیکی با دمای گذار ۳۰ کلوین مشاهده کردند [۵]. پس از این کشف دستیابی به دماهای بالاتر به سرعت اتفاق افتاد بطوریکه در یک نمونه از سرامیک‌های پروسکایت<sup>۴</sup>، دمای گذار در حدود دمای ۱۶۴ کلوین در فشار ۳۱ گیگا پاسکال ثبت شده است [۶]. ابررساناها را با توجه به دمای گذارشان به دو دسته ابررساناهای دمای پائین و ابررساناهای دمای بالا می‌توان تقسیم بندی کرد. ابررساناها مستقل از نوع دسته‌بندی، دو ویژگی منحصر بفرد دارند که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

## ۲.۱. ویژگی‌های منحصربفرد ابررساناها:

در ابتدا تصور بر این بود که مقاومت الکتریکی صفر تنها ویژگی منحصربفرد ابررساناهاست اما با کشف دیامغناطیس کامل در این دسته از مواد، تعداد ترکیبات و عناصری که به عنوان ابررسانا شناخته می‌شدند کاهش یافت. در این بخش به بررسی این ویژگی‌های منحصربفرد پرداخته شده است.

### ۱.۲.۱. مقاومت الکتریکی صفر در برابر جریان مستقیم:

کشف الکترون توسط تامسون تاثیر بسزایی در نظریه‌های ساختار ماده و مدل‌های رسانش الکتریکی در فلزات داشت. یکی از موفق‌ترین مدل‌ها برای توضیح رسانش الکتریکی در فلزات، نظریه درود بود که بر مبنای نظریه جنبشی گازها ارائه شد، بر طبق شکل‌های تکمیل شده این نظریه، مقاومت الکتریکی فلزات ناشی از وجود منابع پراکندگی الکترون است [۴]. این منابع پراکندگی می‌توانند ناخالصی‌ها، نواقص شبکه و فونون‌ها باشند. اگر هر یک از منابع پراکندگی الکترون در فلز، مستقل از دیگری باشد، رابطه کلی مقاومت را می‌توان بشکل زیر نوشت [۸]

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

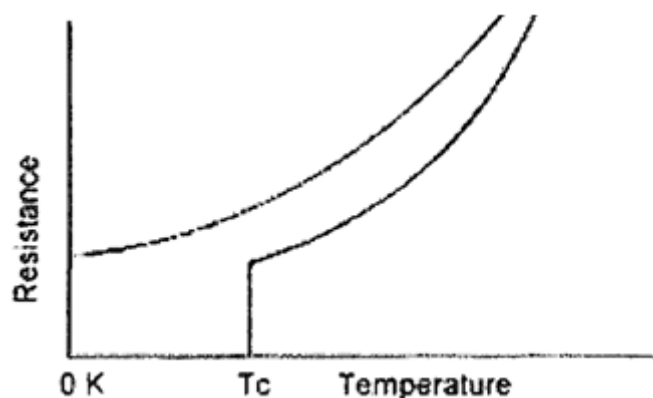
<sup>1</sup>Intermetallic Composition

<sup>2</sup>J. Bednorz

<sup>3</sup>A. Muller

<sup>4</sup>Proskite ceramic

که در آن  $\rho_0$  مقاومت باقیمانده و  $\rho_1(T)$  نشان دهنده پارامترهای وابسته به دما در مقاومت الکتریکی کل می‌باشد. شکل (۲) نمودار بالایی نشان دهنده تغییرات مقاومت الکتریکی یک فلز و نمودار پائینی نشان دهنده تغییرات مقاومت الکتریکی یک ابررسانا است. در این شکل مقاومت الکتریکی فلزات و ابررساناها به صورت تابعی از دما نشان داده شده است، همانطور که مشاهده می‌شود، در فلزات غیر ابررسانا با کاهش دما، مقاومت الکتریکی بشکل پیوسته کاهش می‌یابد تا در دمای صفر کلومین به یک مقدار ثابت می‌رسد. این مقدار ثابت، مقاومت باقیمانده نامیده می‌شود. کاهش دما باعث کم شدن تعداد فونون‌ها و در نتیجه کم شدن احتمال پراکندگی الکترون توسط فونون‌ها در بلور می‌شود و این منجر به کاهش مقاومت الکتریکی فلز می‌گردد [۸]. اما در ابررساناها مقاومت الکتریکی ماده ابررسانا در یک دمای مشخص که دمای گذار و یا دمای بحرانی<sup>۱</sup> خوانده می‌شود، ناگهان به یک مقدار غیر قابل اندازه‌گیری سقوط می‌کند [۹].



شکل ۲. مقایسه تغییرات مقاومت الکتریکی در یک فلز و یک ابررسانا

### ۲.۲.۱. دیامغناطیس کامل

یک ماده ابررسانا علاوه بر اینکه یک رسانای کامل است اگر در یک میدان مغناطیسی خارجی قرار گیرد خطوط میدان مغناطیسی را از خود دفع می‌کند، یعنی دیامغناطیس کامل است [۹]. مایسنر<sup>۲</sup> و اوکسنفلد<sup>۳</sup> در سال ۱۹۳۳ این اثر را کشف کردند و به نام اثر مایسنر شناخته می‌شود. در حضور میدان مغناطیسی خارجی رسانای کامل و ابررسانا، رفتاری کاملاً متفاوت از خود نشان می‌دهند.

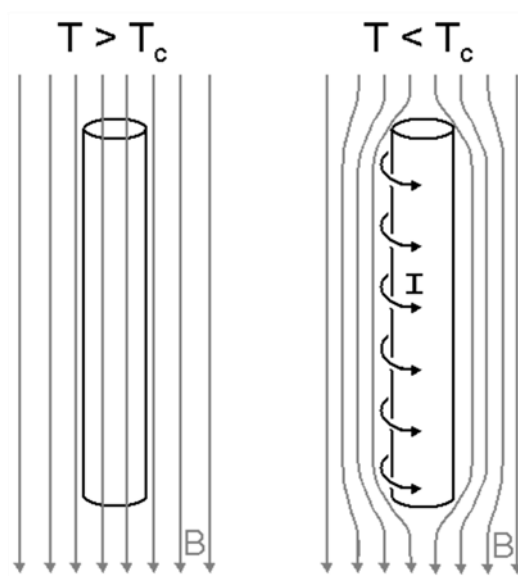
اگر دو ماده ابررسانا و رسانای کامل، ابتدا تا دمایی زیر دمای بحرانی سرد شوند و سپس میدان مغناطیسی به آنها اعمال گردد، خطوط میدان مغناطیسی توسط هر دو ماده دفع می‌شود اما اگر ابتدا میدان مغناطیسی اعمال گردد و سپس تا زیر دمای بحرانی سرد شوند، مجدداً خطوط میدان مغناطیسی از ماده

<sup>۱</sup>Critical temperature

<sup>۲</sup>W. Meissner

<sup>۳</sup>O. Ochsenfeld

ابررسانا دفع می‌شود اما خطوط میدان مغناطیسی در رسانای کامل محبوس می‌شود [۲]. شکل (۳) رفتار دیامغناطیس کامل یک ابررسانا را نشان می‌دهد.



شکل ۳. رفتار دیامغناطیسی ابررسانا

### ۳.۱. پارامترهای بحرانی در یک ماده ابررسانا :

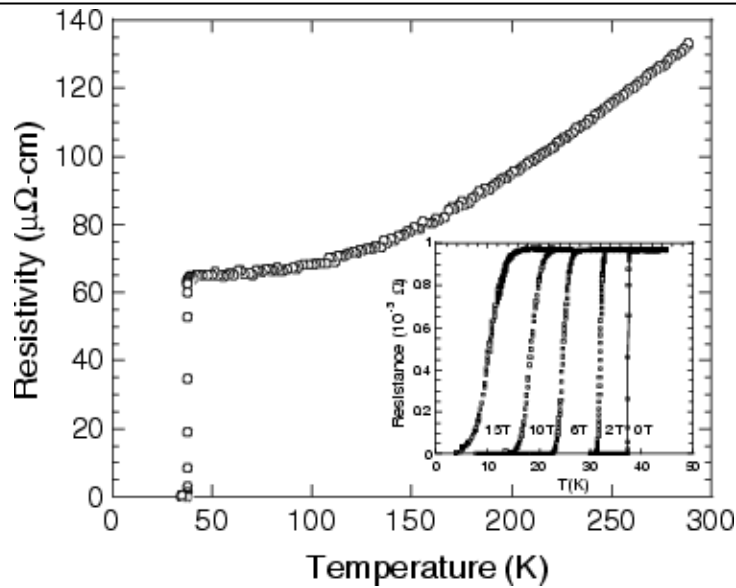
در دیاگرام فاز یک ماده ابررسانا، حالت عادی از حالت ابررسانایی بوسیله یک سطح جدا می‌شود. پارامترهای اصلی در تعیین دیاگرام فاز یک ماده ابررسانا، دمای بحرانی، چگالی جریان بحرانی و میدان مغناطیسی بحرانی هستند که در ادامه به شرح هرکدام پرداخته می‌شود.

#### ۱.۳.۱. دمای بحرانی

دمایی که در آن مقاومت الکتریکی ابررسانا به یک مقدار غیر قابل اندازه‌گیری افت می‌کند را دمای بحرانی گویند [۱۰]. تاریخ علم ابررسانایی پر است از تلاش‌های محققان برای افزایش دمای بحرانی ابررساناها، که هدف آن کاربرد صنعتی این مواد است. البته دمای بحرانی تنها عامل تعیین‌کننده در کاربردهای صنعتی این مواد نمی‌باشد و اندازه‌های جریان بحرانی و میدان بحرانی نیز عواملی تعیین‌کننده هستند [۲].

پهنای گذار<sup>۱</sup> و دمای بحرانی برای مواد ابررسانای مختلف، متفاوت است. در شکل (۴) مقاومت الکتریکی بصورت تابعی از دما و میدان مغناطیسی برای یک نمونه ابررسانا نشان داده شده است.

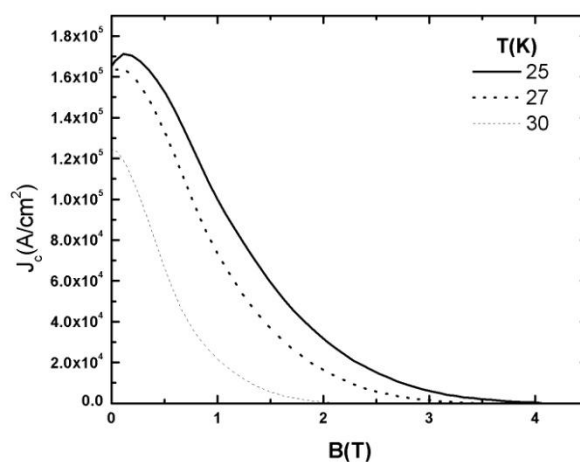
<sup>1</sup>Width transition



شکل ۴. تغییرات مقاومت الکتریکی در یک ابررسانا [۲۲]

### ۲.۳.۱. چگالی جریان بحرانی

اونس در مطالعاتش بر روی خواص الکتریکی جیوه در دماهای پائین به این مطلب پی‌برد که وقتی جیوه در حالت ابررسانا قرار دارد هر جریان دلخواهی را نمی‌توان از آن عبور داد [۳، ۶]. بیشترین چگالی جریانی را که از یک ماده ابررسانا می‌توان عبور داد را چگالی جریان بحرانی<sup>۱</sup> گویند. این کمیت تابع دما و میدان مغناطیسی خارجی اعمال شده به ابررساناست [۳]. چگالی جریان بحرانی یکی از پارامترهای مهم برای صنعتی شدن کاربرد ابررساناهاست. شکل (۵) چگالی جریان یک ماده ابررسانا را بصورت تابعی از میدان مغناطیسی در چند دمای مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۵. تغییرات چگالی جریان بحرانی نسبت به میدان مغناطیسی [۲۲]

<sup>1</sup>Critical current density

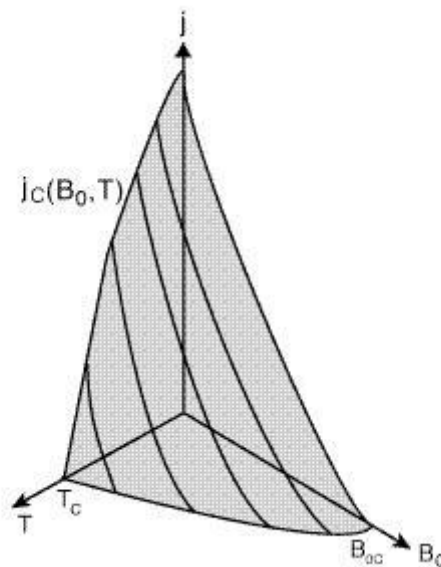
۳.۳.۱. میدان بحرانی<sup>۱</sup>

میدان مغناطیسی اعمال شده بر یک قطعه ابررسانا نیز می‌تواند ابرسانایی را از بین ببرد، اندازه این میدان به دما و شدت جریان عبوری از ابررسانا بستگی دارد [۱۳]. اونس در مطالعاتش به این نتیجه رسید که اندازه این میدان در دمای صفر کلونین بیشترین مقدار را دارد و در دمای بحرانی به مقدار صفر می‌رسد [۴]. بطور تجربی نشان داده شده است که میدان بحرانی برای یک ابررسانا در دماهای مختلف از رابطه زیر پیروی می‌کند [۱۰].

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

که در آن  $H_0$  میدان بحرانی در صفر مطلق و  $T_c$  دمای بحرانی ماده است.

پارامترهای بحرانی ابررساناها، پارامترهای وابسته به یکدیگر هستند. در شکل (۶) وابستگی این سه پارامتر به یکدیگر برای یک نمونه ابررسانا نشان داده شده است. این سه پارامتر سطحی را در فضا تشکیل می‌دهند که حالت ابررسانای را از حالت عادی جدا می‌کند. در این شکل فضای زیر سطح هاشور خورده حالت ابررسانایی و فضای بالایی آن سطح، حالت عادی را نشان می‌دهد.



شکل ۶. دیاگرام فاز یک نمونه ابررسانا

<sup>1</sup>Critical field

## ۴.۱. مبانی نظری پدیده ابررسانایی:

مدل‌های زیادی برای توصیف نظری پدیده ابررسانایی ارائه شده است. اولین مدل در این زمینه، مدل پدیده شناختی برادران لندن<sup>۱</sup> بود. برادران لندن برای توجیه مقاومت الکتریکی صفر در رسانای کامل و ابررسانا یک معادله به معادلات ماکسول افزودند و قانون اول را طوری تغییر دادند که پدیده دیامغناطیس کامل در ابررساناها را توجیه کند [۱۴].

بدلیل ماهیت پدیده شناختی و همچنین کلاسیکی بودن مدل برادران لندن، این مدل قادر به توصیف خواص زیادی در حالت ابررسانای و بیان علت پدیده ابررسانا نبود. سیزده سال بعد فریتز لندن با استفاده از معادلات کوانتومی به اصلاح این مدل پرداخت که قادر به توضیح برخی پدیده‌ها مثل کوانتس شار بود، این مدل به مدل کوانتوم ماکروسکوپی معروف است [۱۵].

سپس جهت توصیف خواص ترمودینامیکی ابررساناها در قالب مدل کوانتوم ماکروسکوپی، مدل پدیده شناختی گینزبرگ<sup>۲</sup>-لاندائو<sup>۳</sup> ارائه شد. این مدل با تکیه بر مدل کوانتوم ماکروسکوپی و تعریف پارامتر نظم توانست خواص ترمودینامیکی ابررساناها مثل پرش در ظرفیت گرمایی ویژه در دمای بحرانی را توضیح دهد [۱۶]. اما هیچکدام از مدل‌های فوق قادر به توصیف علت ابررسانایی نبودند تا اینکه نظریه BCS در سال ۱۹۵۷ توسط باردین<sup>۴</sup>، کوپر<sup>۵</sup> و شریف<sup>۶</sup> ارائه شد. BCS یک نظریه کوانتومی میکروسکوپی است و علت پدیده ابررسانایی را بیان می‌کند. بر طبق این نظریه اندرکنش الکترون-فونون باعث بوجود آمدن یک پتانسیل منفی بین الکترون‌ها شده و منجر به جذب شدن الکترون‌ها به یکدیگر و تولید زوج کوپر می‌گردد [۱۷]. این نظریه قادر به توصیف کامل پدیده ابررسانایی در دمای پائین است. پس از سال ۱۹۸۶ و کشف ابررسانای دمای بالا، مشخص شد که اندرکنش الکترون-فونون تنها عامل تولید زوج‌های کوپر و در نتیجه پدیده ابررسانایی نیست و عواملی دیگری نیز در این بین نقش دارند [۱۸].

## ۵.۱. دسته بندی ابررساناها:

ابررساناها پاسخ‌های متفاوت به میدان‌های مغناطیسی خارجی دارند [۱۹]. اگر یک ابررسانا در یک میدان مغناطیسی قرار گیرد، میدان مغناطیسی تا عمق بسیار اندکی به درون آن نفوذ می‌کند. نفوذ میدان

<sup>1</sup>London<sup>2</sup>L. Ginsburg<sup>3</sup>D. Landau<sup>4</sup>J. Bardeen<sup>5</sup>N. Cooper<sup>6</sup>R. Schrieffer

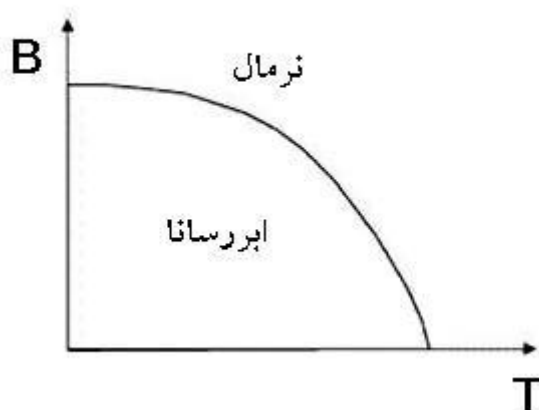


مغناطیسی در ابررسانای نوع اول با ایجاد جریان‌های سطحی در ابررسانا اثر دیمغناطیس کامل در ابررسانا را بوجود می‌آورد.

### ۱.۵.۱ ابررسانای نوع I

ابررساناهای نوع I، میدان‌های مغناطیسی کوچکتر از میدان بحرانی را از خود طرد می‌کنند و اگر میدان مغناطیسی خارجی بزرگتر از میدان بحرانی باشد، شار مغناطیسی به درون ابررسانا نفوذ کرده و حالت ابررسانایی از بین می‌رود [۲]. تمام عناصر بجز Nb در این دسته قرار می‌گیرند. در این نوع ابررسانا، میدان‌های مغناطیسی خارجی، کوچکتر از میدان بحرانی، در حد چند آنگستروم در ابررسانا نفوذ می‌کند و باعث بوجود آمدن جریان‌های سطحی در ابررسانا می‌شود. این جریان سطحی باعث می‌شود تا ابررسانا دیمغناطیس کامل باقی بماند.

دیاگرام فاز ابررسانای نوع I در شکل (۷) آمده است.



شکل ۷. میدان بحرانی در ابررسانای نوع I

### ۲.۵.۱ ابررسانای نوع II

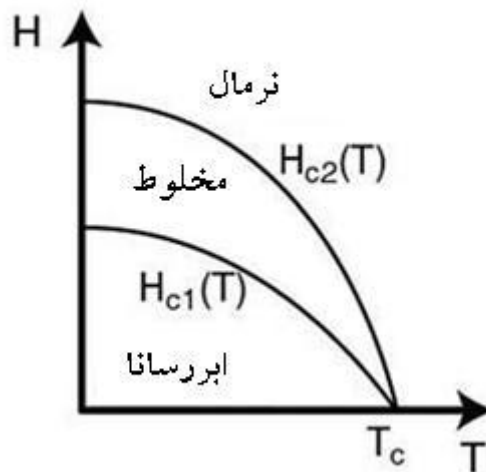
در این نوع ابررسانا دو میدان مغناطیسی وجود دارد:

- ۱- میدان بحرانی پایینی: برای میدان‌های کوچکتر از این میدان، اثر مایسنر کامل است یعنی ابررسانا خطوط شار مغناطیسی را بطور کامل از خود طرد می‌کند ( $H < H_{c1}$ ).

۲- میدان بحرانی بالایی<sup>۱</sup>: برای میدان‌های بزرگتر از این مقدار، خطوط شار مغناطیسی بطور کامل در ابررسانا نفوذ کرده و تمام حجم آن را در بر می‌گیرد و حالت ابررسانایی را از بین می‌برد ( $H > H_c$ ).  
( $H_{c2}$  در میدان‌های بین این دو میدان، ابررسانا در حالت مخلوط قرار دارد یعنی وقتی که

$$H_{c1} < H < H_{c2} \quad (۳-۱)$$

خطوط شار مغناطیسی یا گردشاره‌ها<sup>۲</sup> بصورت کوانتوم‌های شار به داخل ابررسانا نفوذ می‌کنند، در جاهایی که خطوط شار نفوذ کرده‌اند حالت عادی و در جاهای دیگر حالت ابررسانایی وجود دارد. با افزایش میدان، تعداد خطوط شار مغناطیسی نفوذ کرده افزایش می‌یابد تا اینکه کل حجم ابررسانا را در بر می‌گیرد و ابررسانایی از بین می‌رود. دیاگرام فاز ابررسانای نوع II بشکل زیر است [۲].



شکل ۸. میدان‌های بحرانی بالایی و پائینی در ابررسانای نوع II [۲]

خطوط شار مغناطیسی نفوذ کرده (گردشاره) در ابررسانا جریان‌های گردابی حول خود ایجاد می‌کنند و این جریان‌ها با کوانتوم‌های شار مغناطیسی (گردشاره‌ها) در داخل ابررسانا برهم کنش می‌نمایند، وجود نیروهای برهم‌کنش باعث می‌شود که گردشاره‌ها در یک شبکه شش گوش که کمترین انرژی حالت پایه را دارد نظم پیدا کنند [۱۰]. تفاوت اصلی بین ابررسانای نوع I و II در ابعاد میکروسکوپی، مسافت آزاد میانگین<sup>۳</sup> آنها در حالت عادی است. موادی که در حالت عادی مقاومت الکتریکی بالایی دارند یعنی مسافت آزاد میانگین کوتاهی در فاز عادی دارند، در دسته II قرار می‌گیرند.

<sup>1</sup>Upper critical field

<sup>2</sup>Vortex

<sup>3</sup>Mean free Path

در بررسی میکروسکوپی پدیده ابررسانایی با عباراتی مثل طول همدوسی<sup>۱</sup> و عمق نفوذ مغناطیسی<sup>۲</sup> مواجه می‌شویم که در اینجا فقط به تعریف آنها پرداخته می‌شود. عمق نفوذ مغناطیسی عبارت است از ضخامتی از ابررسانا که وقتی در یک میدان مغناطیسی خارجی قرار می‌گیرد، میدان مغناطیسی در آن نفوذ می‌کند و طول همدوسی عبارت است از شعاع گردش‌های نفوذ کرده در ابررسانای نوع II [۲].

تمام ویژگی‌های مغناطیسی یک ابررسانای نوع II با گاف انرژی موجود در چگالی حالت‌های الکترونی حول انرژی فرمی را می‌توان با استفاده از دو پارامتری که در تئوری پدیده شناختی گینزبرگ-لانداو تعریف می‌شود، مورد بررسی قرار داد. این دو پارامتر عبارتند از، میدان ترمودینامیکی بحرانی  $B_C$  و پارامتر گینزبرگ-لانداو که بصورت زیر تعریف می‌شود [۲۱]

$$\kappa = \frac{\lambda}{\xi} \quad (۱-۴)$$

در عبارت بالا  $\lambda$  عمق نفوذ مغناطیسی و  $\xi$  طول همدوسی است.

### ۶.۱. میخکوبی<sup>۳</sup> شار مغناطیسی:

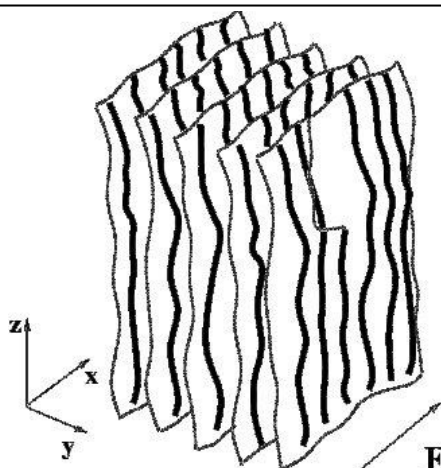
همانطور که گفته شد در ابررسانای نوع II وجود جریان، باعث وارد شدن نیرو به گردش‌ها می‌شود. حال اگر یک جریان خارجی را از ابررسانا عبور داده شود، برهم‌کنش جریان خارجی با گردش‌ها باعث به حرکت در آمدن آنها در راستای عمود بر جریان می‌شود. این حرکت باعث ایجاد مقاومت الکتریکی و اتلاف انرژی می‌گردد که گرم شدن ابررسانا، بالا رفتن دمای آن و در نتیجه از بین رفتن حالت ابررسانایی را در پی دارد. با میخکوبی شار مغناطیسی می‌توان از حرکت گردش‌ها جلوگیری نمود. ناخالصی‌ها، نواقص شبکه و مرزدهانه‌ها می‌توانند بعنوان مراکز میخکوبی عمل نموده و باعث میخکوبی شار مغناطیسی شوند [۱].

یکی از مهمترین دلایل آرایش ابررساناها نیز ایجاد مراکز میخکوبی است؛ با این کار می‌توان چگالی-های جریان بزرگتری را در میدان مغناطیسی بزرگتر از ابررسانا عبور داد. تابش ذرات پرانرژی نیز یکی دیگر از راههای ایجاد مراکز میخکوبی در ابررساناهاست؛ اما بدلیل نفوذ سطحی ذرات تابش شده، این روش بیشتر برای فیلم‌ها و یا نوارهای نازک ابررسانا مورد استفاده قرار می‌گیرد. تابش با ایجاد نواقص در بلور به میخکوبی شار مغناطیسی کمک می‌کند [۲۲]. در شکل (۹) نمونه‌ای از میخکوبی شار مغناطیسی در یک ابررسانا نشان داده شده است.

<sup>1</sup>Coherence Length

<sup>2</sup>Magnetic penetration depth

<sup>3</sup> pinning



شکل ۹. نمایش گردش‌های نفوذ کرده در ابرسانا نوع II

گردش‌ها به دو صورت با مراکز میخکوبی برهم‌کنش انجام می‌دهند. برهم‌کنش مغناطیسی و برهم‌کنش مغزی. برهم‌کنش مغناطیسی به علت برخورد سطوح ابرساناشی با سطوح غیر ابرساناشی و برهم‌کنش مغزی بدلیل وجود ذرات غیر ابرساناشی در ابرسانا ایجاد می‌شود [۲۳]. در بحث نظری، مدل‌های زیادی برای توضیح پدیده‌ی میخکوبی شار مغناطیسی وجود دارند، که مختصراً به توضیح دو مدل از آنها پرداخته شده است.

### ۱.۶.۱ مدل میخکوبی دو- هوگس<sup>۱</sup>:

دو- هوگس نیروی میخکوبی حجمی وارد بر گردش‌ها را بصورت تابعی از میدان کاهش یافته معرفی کرد. میدان کاهش یافته بصورت  $b = \frac{B}{B_{c2}}$  تعریف می‌شود که در آن  $B_{c2}$  میدان بحرانی بالایی است. در حالت نرمالیزه شده، رابطه نیروی میخکوبی طبق مدل دو- هوگس بشکل زیر می‌باشد [۲۳]

$$F_p(b) = A b^p (1 - b)^q \quad (5-1)$$

که در آن  $p$  و  $q$  ثابت‌های هستند که به نوع میخکوبی بستگی دارند و  $A$  ضریبی است که نشان دهنده قدرت میخکوبی می‌باشد. اما نتایج تجربی نشان دادند که اگر بجای  $B_{c2}$  از میدان برگشت-ناپذیری  $B_{irr}$ <sup>۲</sup> استفاده شود، داده‌های تجربی را بشکل بهتری می‌توان توصیف کرد لذا میدان کاهش یافته بصورت،  $b = \frac{B}{B_{irr}}$  تعریف می‌گردد که در  $B = B_{irr}$  گردش‌ها شروع به حرکت می‌کنند و حالت ابرسانایی از بین می‌رود [۲].

<sup>1</sup>Dew-Hughes

<sup>2</sup>Irreversibility field