

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه الزهرا
دانشکده فیزیک

پایان نامه
جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد
رشته فیزیک
گرایش ماده چگال

ساخت و مشخصه‌یابی ابررسانای دما بالای YBCO به دو روش
سل ژل و واکنش حالت جامد

استاد راهنما
دکتر وحید دادمهر

استاد مشاور
دکتر عبدالله مرتضی علی

۱۴ / ۱۱ / ۱۳۸۶

دانشجو
سارا برکت رضایی

شهریور ماه 1386

۶۹۸۶۳

مجلس اطلاعات آژانس علمی و فناوری
تهران

۱۴ / ۱۱ / ۱۳۸۶

تقدیم به پدر و مادر عزیزم
که مرا به زیور علم آراستند
و خواهران مهربانم مرضیه و سیده

خدای را شاکرم که پس از تلاش‌های فراوان توانستم پایان‌نامه خود را با راهنمایی‌ها و کمک‌های
بیدریغ اساتید گرامی، دوستان عزیز و خانواده مهربانم به اتمام برسانم.
از راهنمایی‌های ارزنده استاد گرانقدر جناب آقای دکتر وحید داد مهر ننگر فراوان می‌نمایم، که
اگر رهنمودهای ایشان را هکشتای من نبود این تحقیق به سرانجام مطلوب نمی‌رسید.
از اساتید بزرگوار جناب آقایان دکتر جعفری، دکتر مرتضی‌علی و دکتر سعیدی به خاطر زحمت
مطالعه پایان‌نامه و ارائه رهنمودهای ارزنده کمال ننگر و قدردانی را دارم.
همچنین از سرکار خانم دکتر دادرسی برای ارائه رهنمودهای ارزشمند، صمیمانه سپاسگزارم.
در آخر از دوستان خوبم به خصوص خانم حاسمیه فلاحتی و فاطمه صائب به خاطر همکاری صمیمانه در
تمام مراحل ننگر و پاس فراوان می‌نمایم.
همچنین از پدر و مادر مهربانم به خاطر حمایت‌های بیدریغشان و خواهران خوبم به خاطر
محبت‌هایشان صمیمانه سپاسگزارم.

چکیده

پس از کشف ابررسانایی دمای بالا توسط بدنورز و مولر ساخت ابررساناهای دمای بالا در آزمایشگاه‌هایی با تجهیزات کم نیز امکان پذیر شد. در طی دو دهه اخیر تلاش‌های زیادی برای ساخت ابررساناهای دما بالای با کیفیت که نتایج قابل اعتمادی را برای ارایه در مجلات علمی داشته باشند، صورت گرفته است. روشهای مختلفی برای ساخت ابررساناهای دما بالا به کار گرفته شده است. هر گروه از محققین با توجه به امکانات و نیاز خود هر کدام از این روش‌ها را بر می‌گزینند.

در این تحقیق که در قالب پایان نامه کارشناسی ارشد ارائه شده است به مقایسه و بررسی ساخت ابررسانای دما بالای YBCO به دو روش سل ژل و واکنش حالت جامد پرداخته شده است.

در روش سل ژل تأثیر pH های مختلف سل بر کیفیت محصول نهایی مورد بررسی قرار گرفته است. نمونه های تک فاز با کیفیت ساختاری خوبی در بعضی pH ها ساخته شده است. همچنین مقایسه کاملی از دو روش سل ژل و واکنش حالت جامد با استفاده از STA، XRD و SEM محصولات نهایی انجام شده است.

در بررسی اثر pH بر کیفیت محصولات در ساخت به روش سل ژل، pH نادرست باعث رسوب مقداری از کاتیونهای شامل شده که در واکنش شرکت نکرده بودند. روش سل ژل کلی‌ترین روش ساخت ذرات نانویی می باشد. دستیابی به نانو کریستالهای YBCO یکی از چشم اندازهای این تحقیق بوده است. در خلال بررسی اثر pH در $pH=5.65$ به نمونه‌ای دست یافتیم که در تصاویر SEM آن نانو کریستالها بر روی دانه‌ها تشکیل شده‌اند. XRD این نمونه خلوص محصول بدون هیچ گونه فاز ناخالصی را تأیید می‌کند. البته این نمونه احتیاج به تحقیق گسترده‌تر با انجام آنالیزهای تکمیلی را دارد. انتظار می‌رود که با ادامه تحقیق بر روی این نمونه نتایج در قالب مقاله‌ای در مجلات بین‌المللی به چاپ برسد.

نتایج این تحقیق در قالب دو مقاله در پنجمین کنفرانس بین‌المللی مواد ابررسانا و مغناطیس (MSM07) ارائه شده است. امید است نتایج این تحقیق بتواند راهگشای محققین برای ساخت نمونه‌های با کیفیت بالا واقع شود.

کلمات کلیدی:

ابررسانای دما بالا، YBCO، سل ژل، واکنش حالت جامد، اثر pH.

صفحه	فهرست مطالب
V	چکیده
VI	فهرست
1	1 ابرسانایی متعارف
2	1-1 مقدمه
5	1-2 اثر مایسنر
6	1-3 خواص مغناطیسی ابرسانا
7	1-3-1 ابرسانای نوع I
9	1-3-2 ابرسانای نوع II
10	1-4 نظریه ابرسانایی
11	1-4-1 نظریه لندن
11	1-4-2 معادلات لندن
15	1-4-3 عمق نفوذ لندن
16	1-5 طول همدوسی
16	1-6 ظرفیت گرمایی
18	1-7 گاف انرژی
19	1-8 ویژگی‌های میکرو موجی و فرو سرخی
20	1-9 اثر ایزوتوپی
21	1-10 مروری بر توسعه نظریه ابرسانایی
23	1-10-1 نظریه B.C.S
24	1-10-2 زوج کوپر
24	1-10-3 مطلب اصلی نظریه BCS
27	1-10-4 حالت پایه BCS
30	2 ابرساناهای دما بالا
30	2-1 مقدمه

34	2-2 نظریه پردازى ساز و کار ابررسانایی دما بالا
35	2-3 تحقیقات قبل از 1986
38	2-4 کشف هیجان انگیز ابررسانای دما بالا
41	2-4-1 چرا این کشف تکان دهنده بود؟
42	2-4-2 کشف ترکیب YBCO
43	2-5 خواص ابررساناهای جدید (ابررساناهای دمای بالا)
44	2-6 ساختار اصلی و خواص فیزیکی ترکیبات ابررسانای دمای بالا
45	2-6-1 ساختار ترکیبات ابررسانا
45	1. $YBa_2Cu_3O_{7.8}$
46	2. $YBa_2Cu_3O_8$ و $YBa_2Cu_4O_8$ و $YBa_4Cu_2O_{15}$
47	3. ترکیبات - Nd و - La
47	4. $TlBaCaCuO$ ، $BiSrCaCuO$
48	5. ترکیبات $HgBaCaCuO$
48	2-6-2 ساختار بلوری ابررسانا های دما بالا
50	2-6-3 ساختار بلوری پروسکیت
50	2-6-4 ساختار بلوری ترکیبات 123
67	2-7 اثرات ساختار لایه‌ای
70	3 ساخت ابررسانای دما بالا
70	3-1 ساخت نمونه 123 - YBCO
71	3-1-1 کلوخه‌سازی
73	3-2 مروری بر روشهای ساخت ابررسانای دما بالا
73	3-2-1 مقدمه
75	3-2-2 روش واکنش حالت جامد
75	3-2-3 روش قراردادی سرامیکها
77	انتخاب پیش مواد

78	3-2-4 روشهای کلسینه
78	کلسینه کردن با گرمادهی سریع
78	کلسینه کردن دو مرحله ای
78	کلسینه کردن با ماکروویو
79	کلسینه تحت فشار کم اکسیژن
80	کلسینه در خلاء
80	3-2-5 جداسازی فازها
81	3-2-6 روشهای حالت محلول
82	3-2-7 روش سل ژل
83	معرفی شیمی روش سل ژل
84	روش الکوکسیدها
85	روش ترکیبی
86	3-2-8 روشهای خشک کردن که در روش سل ژل مورد مطالعه قرار
	می گیرد
86	خشک کردن کوره ای
87	3-2-9 روشهای دیگر محلول شیمیایی
87	روش هم رسوبی
88	روش خشک شدن - سرد
89	3-3 تأثیر اندازه ذرات هنگام پرس کردن
90	3-4 تشکیل فاز در ساختار 123
94	3-5 دیاگرام فاز
94	3-6 دیاگرام های فاز YBCO
95	1. آماده سازی در اتمسفر هوا
96	2. آماده سازی در اتمسفر هوا با شرایط عدم حضور CO ₂
97	3. آماده سازی در اتمسفر اکسیژن
98	4. تأثیر فشار جزئی اکسیژن

99	3-7 تعادل فازی و پایداری
99	3-7-1 تعادل فازی Y – Ba – Cu – O در هوا
100	3-7-2 تأثیر فشار جزئی اکسیژن بر پایداری فازی
101	3-7-3 کمبود اکسیژن در $YBa_2Cu_3O_{7-8}$
104	4 ساخت نمونه‌های ابررسانای YBCO
104	4-1 ساخت نمونه ابررسانای YBCO به روش سل ژل در آزمایشگاه
104	4-1-1 استوکیومتری و توزین
106	4-1-2 تنظیم pH محلول
108	4-1-3 مرحله firing
109	4-1-4 تکلیس
110	4-1-5 فشرده کردن به شکل قرص
110	4-1-6 کلوخه‌سازی (زینترینگ)
111	4-2 ساخت نمونه YBCO به روش واکنش حالت جامد در آزمایشگاه
111	4-2-1 پودرهای اولیه
111	4-2-2 توزین پودرهای اولیه (استوکیومتری)
111	4-2-3 مخلوط کردن
114	4-2-4 تکلیس
114	4-2-5 فشرده کردن (به شکل قرص)
115	4-2-6 کلوخه‌سازی (زینترینگ)
117	5 مشخصه یابی
117	5-1 ریزساختار
118	5-1-1 ریزساختار ترکیبات ابررسانای 123
124	5-2 تحلیل حرارتی
125	5-2-1 روش انجام آزمایش TGA,DTA,DSC

126	5-2-2 تعیین دمای تکلیس و کلوخه سازی به کمک تحلیل حرارتی
128	5-3 مشخصه یابی نمونه های ساخته شده و نتیجه گیری
128	5-4 آزمایش پراش اشعه X (XRD)
129	5-4-1 تکنیک های پراکندگی اشعه X
129	5-4-2 تکنیک های پراش اشعه X
130	5-4-3 پراش پودری
131	5-4-4 شناسایی ساختار کریستالی
131	5-5 آزمایشات XRD
135	5-6 مشخصه یابی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی
135	5-6-1 میکروسکوپ الکترونی روبشی
135	5-6-2 روش ایجاد تصویر
136	5-6-3 آشکارسازی الکترون های ثانویه
136	5-7 آزمایشهای SEM
148	5-8 طیف پاشندگی انرژی اشعه X
148	5-9 تعیین دمای گذار به حالت ابررسانشی
155	5-10 نتیجه گیری و پیشنهاد ادامه کار
156	مراجع
159	Abstract

فصل اول

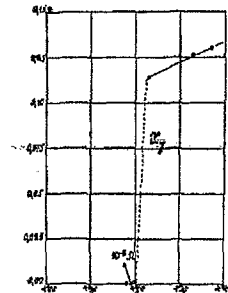
اېرسانايي متعارف

- مقدمه
- اثر مایسنر
- خواص مغناطیسی اېرسانا
- نظریه اېرسانايي
- مروری بر توسعه نظریه اېرسانايي

1 ابررسانایی متعارف

1-1 مقدمه

کشف پدیده ابررسانایی در اوایل قرن بیستم را می توان در زمره مهمترین و بزرگترین کشفیات علم فیزیک قرار داد. بی تردید این پدیده، پدیده جادویی قرن بیستم است. پس از امکان دسترسی به مایع کردن هلیوم در سال 1908 و دستیابی به دماهای پائین امکان بررسی خواص متمایز ابررساناها بدست آمد. در سال 1911 اونس [1] با کشف پدیده ابررسانایی در آزمایشگاه لیدن و کشف وجود یک جریان بحرانی و یک میدان مغناطیسی بحرانی انقلاب بزرگی را ایجاد کرد. در آن زمان هیچ بحث قابل قبولی برای پیش بینی این خاصیت وجود نداشت. اونس به هنگام مطالعه وابستگی دمایی مقاومت ویژه الکتریکی نمونه ای از جیوه مشاهده کرد در دمای نزدیک 4K مقاومت نمونه ناگهان به صفر میل می کند. در آزمایش وی مقاومت جیوه در حالت مایع در دمای 273.14K برابر 172.7Ω بود در حالیکه در دمای 4.3K این مقدار به 0.084Ω کاهش یافت و در 3K مقاومت کمتر از $3 \times 10^{-6} \Omega$ بود وقتی به 105K رسید این مقدار حد بالای مقاومت باقی ماند [2]. شکل 1 مقاومت اندازه گیری شده توسط وی را نشان می دهد.



شکل 1-1 مقاومت الکتریکی جیوه بر حسب دما، این اولین نمودار به دس آمد توسط کامرلینگ اونس است [1].

اگرچه ابتدا این صفر شدن مقاومت را به اتصال کوتاه در نقطه ای از مدار یا تصادف نسبت دادند، مشاهده اتفاقی برگشت پذیر بودن مقاومت در گذار از دمای 4.2K پدیده ابررسانایی را نمودار ساخت. دمایی که در آن نمونه با یک گذار فاز از حالت عادی با مقاومت ویژه الکتریکی معمولی به حالت ابررسانا با یک مقاومت ویژه الکتریکی صفر میرود دمای گذار T_C نامیده میشود. دمای گذار تا حدودی به درجه خلوص شیمیایی و هم به درجه کامل بودن متالورژیکی نمونه مورد آزمایش بستگی دارد، در واقع ناهمگنی ها در خلوص و شبکه بلوری نمونه به طور کلی باعث گسترش گستره دمای گذار میان حالت هنجار و ابررسانا می شود. در حالت ابررسانایی مقاومت الکتریکی dc

صفر یا بسیار نزدیک به صفر است به طوری که در حلقه های ابررسانا جریان الکتریکی ماندگاری مشاهده شده است [3].

آزمایش بعدی اونس در 1913 نشان داد که افزایش چگالی جریان به بیش از یک حد معین که جریان بحرانی (J_c) نامیده میشود و لتاژی را در نمونه ایجاد میکند. همچنین مشخص شد که این مقدار جریان بحرانی با کاهش دما افزایش پیدا میکند. وی این چگالی جریان بحرانی را از مرتبه 10^3A/mm^2 اندازه گیری کرد. در سالهای بعد از کشف ابررسانایی در عنصر جیوه، این پدیده در سایر فلزات مانند قلع، سرب، آیندیم، آلومینیوم، نیوبیوم و... یافت شد همچنین تعداد زیادی آلیاژ نیز از این مواد تهیه شد که وجود خاصیت ابررسانایی در تمام آنها تایید شد [4].

ادامه تحقیقات از سال 1911 تا 1914 در مورد جریان ماندگار منجر به کشف وجود میدان مغناطیسی بحرانی (H_c) در سال 1914 شد.

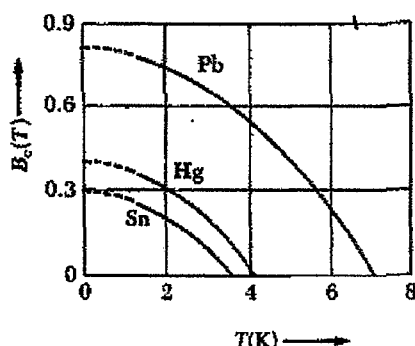
یعنی حدود بیست سال پس از [5] 1933 کشف اثر مایسنر توسط مایسنر و اوکسفلد در سال کشف ابررسانایی نگرش جدیدی را نسبت به این مواد ایجاد کرد. آنها نشان دادند که یک ابررسانا نه تنها دارای مقاومت صفر است، بلکه بطور همزمان شار مغناطیسی را نیز از خود می راند، یعنی یک کشف شد T_c دمای مغناطیس کامل است. ویژگیهای مغناطیسی ابررسانا نیز قابل توجه اند. پس از معرفی که نه تنها با گرم کردن نمونه می توان خاصیت ابررسانای را از بین برد بلکه با قرار دادن آن در میدان مغناطیسی به اندازه کافی بزرگ موازی سیم ابررسانا نیز می توان ابررسانایی را از بین برد. میدانی که یا میدان بحرانی کپه ای نامیدند. اندازه H_c باعث گذار از حالت ابررسانایی به عادی در نمونه می شود را این میدان هم به نوع ماده و هم به دما بصورت زیر بستگی دارد:

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

H_c میدان بحرانی، T دمای مطلق بر حسب کلوین، T_c و H_0 نشان دهنده مشخصات نمونه هستند. T_c دمای بحرانی در میدان صفر و H_0 میدان بحرانی در دمای صفر است. H_0 یا کاهش دما افزایش می یابد [6]. اگر میدان در جهتی غیر از موازی به نمونه اعمال شود هنگامیکه میدان در هر نقطه روی سطح به مقدار میدان بحرانی برسد نمونه به حالت هنجار بازگشت می کند.

نمودار دما - میدان اصولاً از نظر ترمودینامیکی همان معنای نمودار دما - فشار گذارهای فاز معمولی را در خود دارد به طوری که میتوان گفت نمونه مورد آزمایش در زیر منحنی ابررسانا و در بالای آن عادی است [7]. شکل 2 نمودار تغییر میدان مغناطیسی بحرانی با دما را برای سرب، جیوه

وقلغ نشان می دهد این فلزها در میدانها و دماهای زیر منحنی مشخصه خود ، ابررسانا هستند و در بالای منحنی یک فلز عادی اند.



شکل 1-2 تغییر میدان مغناطیسی بحرانی با دما را برای سرب، جیوه و قلغ نشان می دهد این فلزها در میدانها و

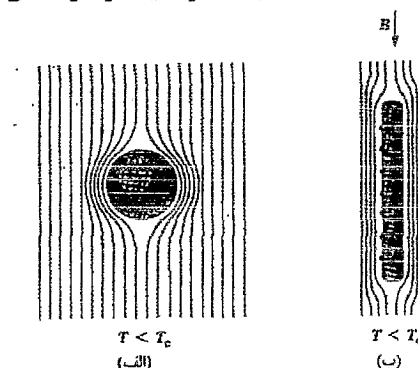
دماهای زیر منحنی مشخصه خود ، ابررسانا هستند و در بالای منحنی یک فلز عادی اند [7].

همچنین مشاهده رفتار غیر عادی ظرفیت گرمایی و اثر مایسنر ، ارائه نظریه ترمودینامیکی گورتز - کازیمیر که در آن گذار فاز مرتبه دوم و خواص دیگر را بر اساس مدل دو شماره ای از لحاظ پدیده شناختی توجیه کردند و همچنین ارائه نظریه الکترومغناطیسی برادران لندن در سال 1935 را در مورد خواص الکتروودینامیکی ابررساناها، در پی داشته.

از سال 1935 تا سال 1950 یک دوره رکود 25 ساله به چشم میخورد در طی این سال ها هیچ کار عمده نظری یا تجربی در مورد ابررسانایی صورت نگرفت . تا اینکه در سال 1950 با ارائه نظریه پدیده شناختی گیتزبرگ - لاندائو که آثار کوانتومی را به حساب می آورد [4] و آرایه نظریه الکتروودینامیک غیر موضعی پیپارد در سال 1953 قدم های مهمی در دستیابی به نظریه میکروسکوپی ابررسانایی برداشته شد . بالاخره پس از کوشش های بسیار در سال 1955 نظریه BCS ارائه شد [9] و امکان درک بنیادی پدیده ابررسانایی را فراهم آورد و پیشگویی پدیده های جدیدی را ممکن ساخت اگرچه موفقیت بی نظیر این نظریه در توجیه خواص پدیده ابررسانایی و جامع و کامل بودن آن خلاقیت علمی را برای مدت ها از پژوهشگران سلب کرد. پس از موفقیت بی نظیر نظریه BCS باید از پیشگویی اثر جوزفسون در سال 1962 به عنوان یک کار نظری مهم یاد کرد . کشف اثر ایزوتوپ در سال 1950 [7,8] و به دنبال آن آزمایش های مختلف انجام شده روی بیناب الکترونی در سال 1953 تا 1960 ، کشف کوانتس شار در سال 1961 و ... ، از طرفی کشف ابررساناهای اکسید مس در 1986 به عنوان نقطه عطفی در تاریخ ابررسانایی شناخته می شود.

2-1 اثر مایسنر

دراویل تاریخ ابرسانایی در به کاربردن معادلات ماکسول در مورد آنها با این مواد مانند رسانای کامل فلزی برخورد می گردند، کاربرد معادلات ماکسول در مورد رسانای کامل به این نتیجه منجر شد که تغییرات میدان مغناطیسی نسبت به زمان در داخل ابررسانا باید صفر باشد [6] بنابراین بسته به اینکه نمونه در حضور یا غیاب میدان مغناطیسی تا پایین تر از دمای گذار سرد شود شار مغناطیسی می بایست یا حبس شود یا طرد. این ایده اینقدر پذیرفته شده بود که مدت ها بعد در سال 1933 (22 سال پس از کشف پدیده ابرسانایی) مایسنر و آگسفلد برای اولین بار آنرا به طور تجربی آزمایش کردند نتایج تجربیات آنها نشان داد که این فرضیه غلط است و در تمام حالات صرفنظر از اینکه ضمن سرد شدن نمونه به میدان مغناطیسی داخل و یا از آن خارج شده باشد، در حضور میدان مغناطیسی، میدان مغناطیسی درون ابررسانا صفر است همچنین تفاوتی بین اعمال میدان در حال ابررسانش یا اعمال میدان در حالت به هنجار و سپس سرد کردن نمونه وجود ندارد و در هر حال شار مغناطیس از ابررسانا رانده میشود [5]. این اثر به طرد شار مغناطیسی یا اثر مایسنر معروف است و این یعنی ابررسانا چنان رفتار میکند که گویی تراوایی مغناطیسی آن صفر است یا پذیرفتاری دیامغناطیسی کامل دارد [5]. نمای شماتیک اثر مایسنر در شکل 3 نشان داده شده است.



شکل 3-1 الف) خروج شار مغناطیسی از درون یک ابررسانا، (ب) وقتی یک میدان خارجی به ابررسانا اعمال می شود یک جریان

سطحی در آن القا می شود که یک میدان مغناطیسی به وجود می آورد و آن هم میدان موجود در درون ابررسانا را خنثی می کند

اهمیت اصلی اثر مایسنر این است که نشان میدهد ابررسانا نه تنها دارای خاصیت رسانندگی

بینهایت است بلکه خواص الکترومغناطیسی پیچیده تری دارد.

برای ابررسانا نامیدن یک جسم، نه تنها رسانندگی بی نهایت بلکه دیامغناطیسی کامل بودن

($\vec{B}_{in}=0$) نیز مهم است. اثر مایسنر نشان داد گذار از حالت ابررسانایی به حالت هنجار یک فرآیند

کاملاً برگشت پذیر است . خاصیت دیامغناطیس کامل در ابررساناها نشان میدهد که ابررسانایی به معنای یک تغییر در حالت ترمودینامیکی سیستم است نه یک تغییر شدید در مقاومت الکتریکی . درانجام آزمایش های متعدد برای تایید اثر مایسنر مقدار کمی شار در نمونه های خالص باقی می ماند و این مقدار با افزایش ناخالصی افزایش می یافت در حالیکه هیچ نظریه ای برای توجیه این خاصیت در دست نبود انجام این آزمایش ها به کشف ابررسانایی نوع II منجر شد.

مفهوم طرد کامل شار یک ایده آل سازی است به جای طرد کامل ، شار مغناطیسی در لایه نازکی از سطح ابررسانا نفوذ میکند. (در عمقی به نام عمق نفوذ λ) و بر طبق نظریه پدیده شناختی لندن به طرف داخل و به طور نمایی کاهش می یابد.

از طرفی کی سام و همکارانش در 1932 در حالیکه مشغول بررسی تغییر گرمای ویژه هلیوم مایع در دمایی کمتر از نقطه جوش هلیوم بودند کشف کردند در گذار به حالت ابررسانایی یک پرش در ظرفیت گرمایی روی میدهد همچنین گذار در میدان مغناطیسی غیر صفر با یک گرمای نهان همراه است. حضور گرمای نهان با مشاهده اثر گرمامغناطیسی محرز شد. بازگشت پذیری گذار و مستقل بودن حالت ابررسانایی نمونه از آنچه بر آن گذشت امکان اینکه بتوانیم حالت ابررسانایی را به عنوان یک فاز ترمودینامیکی در نظر بگیریم فراهم می آورد [8].

3-1 خواص مغناطیسی ابررسانا

کمی پس از کشف اثر مایسنر مبنی بر دیامغناطیس کامل بودن ابررساناها ، در طی سال های 1934 و 1935 آلیاژهای ابررسانای خاصی مانند Pb-Bi و $PbTi_2$ پیدا شدند که میدان های بحرانی خیلی بالایی از خود نشان می دادند .

از این رو ابررساناها را با توجه به رفتار مغناطیسی آنها به دو دسته نوع I و نوع II تقسیم می کنیم . اختلاف اساسی بین این دو گروه در واکنش متفاوت آنها به میدان مغناطیسی خارجی نهفته است [4].

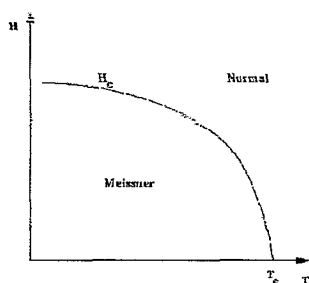
ابررساناهای اولیه (نوع I) نفوذ شار و ظهور مقاومت صفر هردو در یک میدان بحرانی یگسان $H_c(T)$ رخ می دهد. (اثر مایسنر ، صرفنظر از لایه ای در سطح نمونه با ضخامت عمق نفوذ، کامل است و تشکیل خطوط شار ، فراتر از این عمق از نظر انرژی مساعد نیست) اثر مایسنر در ابررساناهای نوع I مشاهده می شود

ابررساناهای نوع II با دو میدان بحرانی متفاوت مشخص میشوند. نفوذ شار به درون نمونه به صورت آرایه ای از خطوط شار کوانتیده در میدان بحرانی پایینی $H_{c1}(T)$ شروع میشود و در

$H_{C2}(T)$ که میدان بحرانی بالایی نامیده میشود کامل می گردد H_{C1} خیلی کوچکتر از H_{C2} است و بر خلاف ابررساناهای نوع I ، تشکیل خطوط شار در گستره بین این دو میدان از نظر انرژی مساعد است این ابررساناها تا میدان H_{C2} ویژگی های الکتریکی ابررسانشی دارند. به تدریج مشخص شد که در حضور میدان مغناطیس ابررساناهای نوع II عملاً دو فاز متفاوت از خود نشان می دهند در ناحیه $0 < H < H_{C1}$ فاز مایسنر با طرد کامل شار و در ناحیه $H_{C1} < H < H_{C2}$ به حالت آمیخته یا فاز شابنیگوو که در آن فقط بخشی از شار در نمونه ابررسانا نفوذ می کند . فاز آمیخته یک فاز کاملاً جدید است.

1-3-1 ابررسانای نوع I

دمای بحرانی این نوع ابررسانا به ترکیب شیمیایی ، وجود ناخالصی ، فشار و ساختار بلوری آن بستگی دارد [9] . ابررساناهای بسیار خوب مانند مس ، نقره و طلا خاصیت ابررسانایی ندارند . دمای بحرانی ابررسانا در حضور میدان مغناطیسی ، هرچه میدان افزایش یابد T_C کاهش می یابد. در این ابررساناها در $B > B_C$ (میدان بحرانی) حالت ابررسانا به هم می خورد و ماده یک رسانای معمولی می شود. (شکل 4)

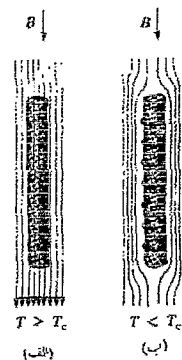


شکل 4-1 منحنی آستانه میدان بحرانی ابررسانای نوع I ، نمونه زیر منحنی ابررسانا و بالای آن در حالت نرمال است.

B_C به دما بستگی دارد و در $T=0$ ماکزیمم است. جریان ماکزیمم که میتواند از یک ابررسانا عبور کند با مقدار میدان بحرانی محدود می شود برای ابررسانای نوع I ، B_C حدود $0.1T$ است پس از ابررسانای نوع I نمی توان برای ساختن آهن ربای قوی استفاده کرد.

همانطور که با توجه به اثر مایسنر انتظار داریم اگر یک میدان مغناطیسی را در دمای پایین تر از T_C به یک ابررسانا اعمال کنیم ، جریان های سطحی مانایی در روی ابررسانا تولید می شوند که یک میدان مغناطیسی تولید می کنند و این میدان ، میدان مغناطیسی بیرونی اعمال شده را از همه جای درون ابررسانا خنثی می کند . در واقع میدان مغناطیسی نسبت به مقدار خارجی آن در فاصله تقریبی 10^{-8} متر به طور نمایی تا صفر کاهش می یابد. اگر میدان مغناطیسی در دمای $T > T_C$ به یک ماده ابررسانا اعمال شود و سپس نمونه تا $T < T_C$ سرد شود جریان های سطحی سریعاً ابقا می

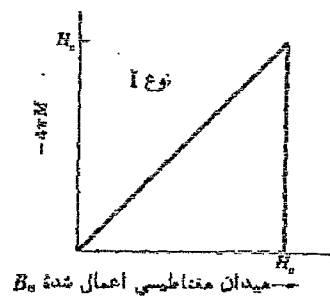
شوند تا خطوط شار مغناطیسی را در خارج نمونه حفظ کند اگر میدان خارجی حذف شود جریان های سطحی تولید نمی شوند. [10]



شکل 1-5 الف) وقتی میدان مغناطیسی در دمای بالاتر از دمای بحرانی به یک ابررسانا اعمال می شود ، میدان در درون رسانا صفر نیست ، ب) وقتی نمونه تا دمای $T < T_c$ سرد می شود ، جریانهای سطحی تولید می شوند و شار مغناطیسی از درون ابررسانا خارج می شود [10].

البته بحث فوق را برای ابررسانای استوانه ای شکل دراز که میدان مغناطیسی به موازات محور استوانه اعمال شده انجام دادیم برای حالت های دیگر نیز با پیچیدگی بیشتری همراه است. پس برای ابررساناهای نوع I در $B < B_c$ میدان در نمونه نفوذ نمی کند و فقط جریان های سطحی تولید می شوند. بنابراین نمونه مانند دیامغناطیس کامل عمل می کند.

برای $B > B_c$ میدان به طور کامل نفوذ می کند و ρ از صفر تا یک مقدار تا مقدار مورد نظر برای رسانای معمولی افزایش می یابد.



شکل 1-6 مغناطیدگی بر حسب میدان مغناطیسی اعمال شده برای ابررسانای نوع I

شکل 1-6 مغناطیدگی بر حسب میدان مغناطیسی اعمال شده برای رسانای حجیمی گه اثرمایسنر کامل (خاصیت و یا مغناطیس کامل) را نشان می دهد را نمایش می دهد، یک ابررسانا با چنین رفتاری را ابررسانای نوع I می نامند. نمونه در بالای میدان بحرانی H_c یک رسانای عادی است و مغناطیدگی

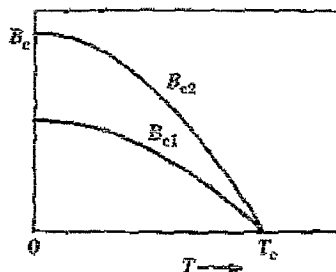
کوچکتر از آن است که در این مقیاس دیده شود. توجه کنید که $4\pi\vec{M}$ بر روی محور عمودی رسم شده مقدار منفی M به خاصیت دیامغناطیس مربوط است.

1-3-2 ابررسانای نوع II

در این مواد دو میدان مغناطیسی وجود دارد B_{c1} و B_{c2} اگر $B < B_{c1}$ نفوذ شار مغناطیسی صورت نمی‌گیرد و ماده به طور کامل ابررسانا است (مانند نوع I).

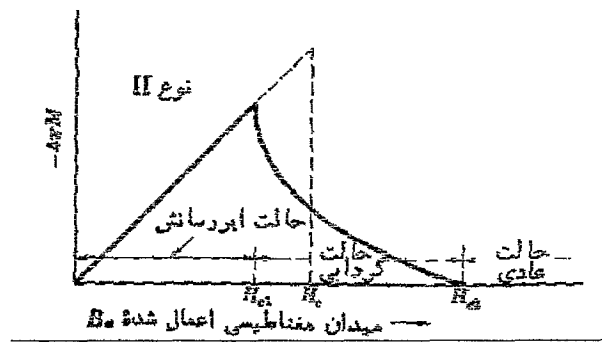
اگر $B > B_{c2}$ شار مغناطیسی به طور کامل در ماده نفوذ می‌کند و ماده حالت‌های عادی خود را دارد (مانند نوع I) با وجود این برای B که $B_{c1} < B < B_{c2}$ ماده در یک حالت مخلوط معروف به حالت گردابی قرار دارد در این حالت مخلوط را می‌توان به صورت ترکیبی از نواحی ابررسانا و رشته‌هایی از ماده عادی در نظر گرفت که در نمونه نفوذ کرده‌اند (شکل 1-7). در میان این رشته‌ها، شار مغناطیسی متناهی و مقاومت ویژه ناصفر است. در اطراف هر رشته یک جریان پوششی وجود دارد که میدان مغناطیسی را از نواحی ابررسانا خارج می‌کند.

T_c بالاتر از نوع I، $B_{c2}(0)$ از مرتبه $50T$ است به همین دلیل آهنرباهای ابررسانا با میدان‌های بسیار قوی را با استفاده از این ماده‌ها می‌سازند.



شکل 1-7 منحنی آستانه میدان‌های بحرانی ابررسانای نوع II بر حسب دما

شکل 1-8 منحنی مغناطیدگی ابررسانا برای ابررسانای نوع II است شار در میدان H_{c1} که پایین‌تر از میدان بحرانی H_c است شروع به نفوذ در نمونه می‌کند. نمونه بین H_{c1} و H_{c2} در یک حالت گردابی است و تا H_{c2} دارای ویژگی‌های الکتریکی ابررسانشی است بالای H_{c2} نمونه، به جز در مورد آثار سطح ممکن از هر جهت یک رسانای عادی است.



شکل 8-1 منحنی مغناطیدگی ابررسانا برای ابررسانای نوع II

برای H_c معین مساحت زیر منحنی مغناطیدگی برای ابررسانای نوع II و نوع I مساوی است. بین میدان بحرانی H_{c1} و H_{c2} چگالی شار B مخالف صفر است این جا اثر مایسنر کامل نیست. در ناحیه بین H_{c1} و H_{c2} شار مغناطیسی به صورت یک آرایش منظم از لوله‌های شار به داخل نمونه نفوذ می‌کند و گفته می‌شود نمونه در حالت گردابی (Vortex) قرار دارد. آلیاژها یا فلزات واسطه که مقاومت ویژه الکتریکی آنها در حالت عادی زیاد است یعنی مسیر آزاد میانگین الکترونی آنها در حالت عادی کوتاه است ابررسانایی نوع II هستند. به علاوه افزودن مقداری از یک عنصر خاص به یک ابررسانای نوع اول آن را به ابررسانای نوع دوم تغییر می‌دهد. در ناحیه بین H_{c1} و H_{c2} ابررسانا به وسیله خطوط شار نخ کشی می‌شود و گفته می‌شود که در یک حالت گردابی است.

4-1 نظریه ابررسانایی

چارچوب‌های اولیه نظریه ابررسانایی با تلاش برای توجیه خواص الکترومغناطیسی ابررساناها (از جمله رسانای کامل و دیامغناطیس کامل بودن) شکل گرفت. طرد کامل شار مغناطیسی (تغییر ناگهانی میدان مغناطیسی به طور ناپیوسته در سطح نمونه)، القای جریان‌های سطحی و یا مغناطیسی را بدون هیچ‌گونه بسط فضایی ایجاب می‌کند که آشکارا یک مفهوم غیر فیزیکی است.

کشف اثر مایسنر نشان داد که یک رسانای کامل لزوماً ابررسانا نیست زیرا معادلات ماکسول برای یک رسانای کامل به جای طرد شار (اثر مایسنر) منجر به یخ‌زدگی شار در حالت سرمایش با میدان می‌شود. برادران لندن رفتار مغناطیسی ابررساناها را با اضافه کردن یک رابطه، بین چگالی جریان ابررسانایی \vec{J} میدان مغناطیسی \vec{B} ، به معادلات ماکسول توصیف کردند. بررسی رفتار الکترو مغناطیسی ابررساناها نشان داد که این معادله به همراه معادله رسانش کامل توصیف کاملی از رفتار الکترومغناطیسی ابررساناها ($B=0, \rho=\infty$) را به دست می‌دهد [4]. به دنبال آن لندن با استفاده از موازنه انرژی در جابه‌جایی کوچکی دو مرز بین فازهای ابررسانا و بهنجار شرط تعادل فاز را به دست آورد. وی به حضور یک انرژی