

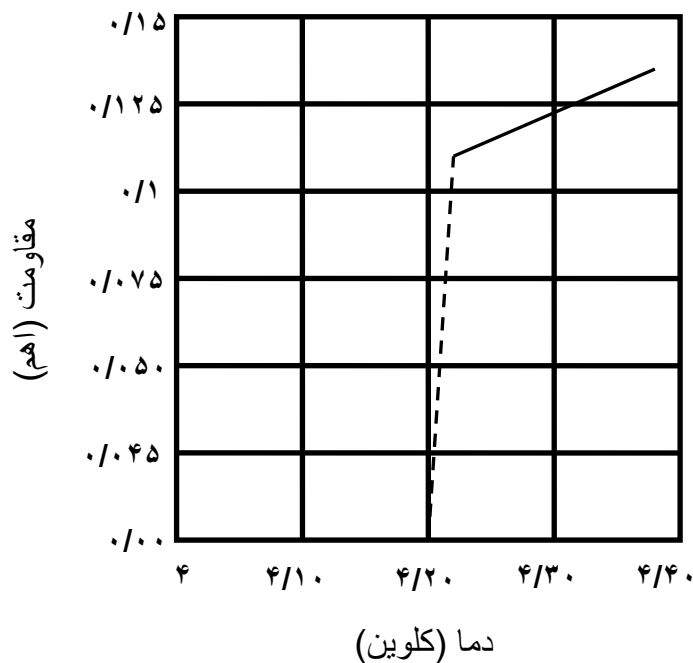
فصل اول

مقدمه ای بر ابرسانایی

ریشه لغوی ابررسانا به معنی فوق رسانا می‌باشد. در واقع، این واژه در مورد رسانایی فوق‌العاده زیاد بکار می‌رود و موادی را که دارای این خاصیت باشند، ابررسانا گویند.

۱-۱ کشف ابررسانا

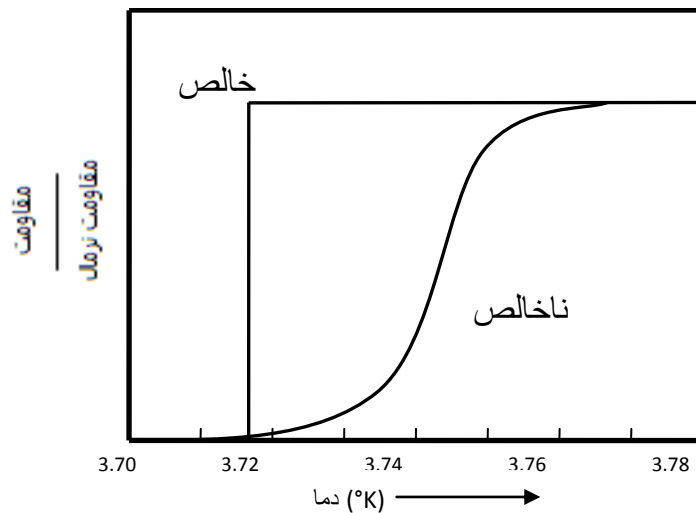
در سال ۱۹۰۸ هایک کمرلینگ اوزن هلندی در دانشگاه لیدن موفق به تولید هلیوم مایع گردید و با استفاده از آن توانست به درجه حرارت حدود یک درجه کلوین برسد [۱]. یکی از اولین بررسی‌هایی که اوزن با دسترسی به این درجه حرارت پایین انجام داد، مطالعه تغییرات مقاومت الکتریکی فلزات بر حسب درجه حرارت بود. چندین سال قبل از آن معلوم شده بود که مقاومت فلزات وقتی دمای آنها به کمتر از دمای اتاق برسد کاهش پیدا می‌کند، اما معلوم نبود که اگر درجه حرارت تا حدود کلوین تنزل یابد، مقاومت تا چه حد کاهش می‌یابد. در آن زمان خالص‌ترین فلز قابل دسترس جیوه بود و اوزن در تلاش برای به دست آوردن رفتار فلز خیلی خالص، مقاومت جیوه خالص را در دماهای مختلف اندازه گرفت. در سال ۱۹۱۱ وی دریافت که در درجه حرارت خیلی پایین، مقاومت جیوه تا حد غیرقابل اندازه‌گیری کاهش می‌یابد که البته موضوع شگفت‌انگیزی نبود اما نحوه از بین رفتن مقاومت غیر منتظره به نظر می‌رسید. اوزن مشاهده نمود هنگامی که درجه حرارت جیوه به سمت صفر درجه مطلق تنزل داده می‌شود، کاهش آرام مقاومت ناگهان در حدود $4/2$ درجه کلوین با افت بسیار بزرگی مواجه شده و پایین‌تر از این درجه حرارت، جیوه هیچ‌گونه مقاومتی از خود نشان نمی‌داد. همچنین این گذار ناگهانی به حالت بی‌مقاومتی، فقط مربوط به خواص فلزات نمی‌شد و حتی در جیوه ناخالص نیز اتفاق می‌افتاد. اوزن به این نتیجه رسید که پایین‌تر از $4/2$ درجه کلوین، همانطور که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است. جیوه به حالت دیگری از خواص الکتریکی که کاملاً با حالت‌های شناخته شده قبلی متفاوت بود رسیده است. این حالت تازه «ابررسانایی» نام گرفت [۲].



شکل ۱-۱: تغییر مقاومت جیوه بر حسب تغییر دما [۳]

۲-۱ دمای گذار به ابررسانایی

مقاومت الکتریکی یک رسانای فلزی به تدریج با کاهش دما کم می‌شود. در رساناهای معمولی مثل مس و نقره، حتی در صفر مطلق هم، به دلیل وجود ناخالصی مقاومت الکتریکی آنها صفر نخواهد بود. در مقابل، ابررساناها موادی هستند که اگر دمایشان از یک دمایی کمتر شود، ناگهان مقاومت الکتریکی خود را از دست می‌دهند. دمایی که یک ابررسانا در آن دما مقاومت خودش را از دست می‌دهد، دمای گذار یا دمای بحرانی (T_c) ابررسانا نامیده می‌شود. دمای بحرانی عناصر مختلف متفاوت است. مثلاً دمای بحرانی جیوه حدود $4/2$ درجه کلوین، سرب 9 درجه کلوین و نیوبیوم $9/2$ درجه کلوین می‌باشد و برای بعضی آلیاژها و ترکیبات مانند Nb_3Sn و Nb_3Ge دمای بحرانی به 18 و 23 درجه کلوین نیز می‌رسد. اگر نمونه خیلی خالص و از لحاظ فیزیکی کامل و ایده آل باشد، در حالت سرد شدن، گذار به حالت ابررسانایی ممکن است خیلی سریع باشد. برای مثال در یک نمونه گالیم خوب، حالت گذار در محدوده دمایی حدود 10^{-5} درجه مشاهده شده است. در صورتی که اگر نمونه ناخالص و یا دارای نواقص بلوری باشد این محدوده ممکن است به طور قابل توجهی پهن‌تر شود. شکل ۲-۱ گذار را برای یک نمونه خالص و ناخالص قلع نشان می‌دهد.



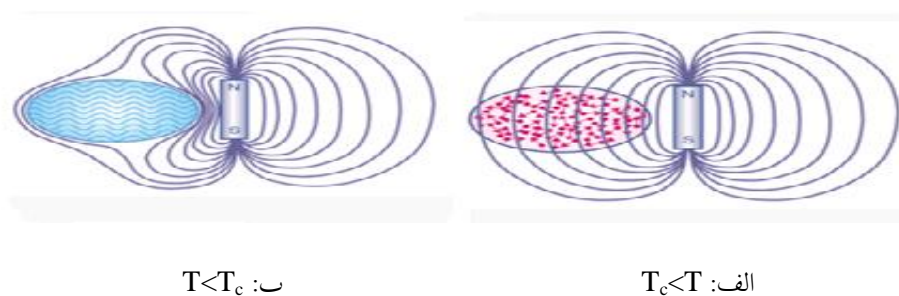
شکل ۲-۱ گذار به حالت
ابرسانایی
برای فلز قلع [۴]

همانطور که در شکل ۲-۱ مشاهده می‌شود گذار قلع ناخالص در محدوده دمایی ۰/۰۵ اتفاق می‌افتد. براساس تحقیقات انجام شده، تاکنون مشخص شده است که نصف عناصر فلزی و همچنین برخی آلیاژها و سرامیک‌ها در درجه حرارت‌های پایین ابررسانا می‌شوند. مشکل اصلی در استفاده از ابررساناها، ایجاد دمای بسیار پایین آن است دمای ابررسانایی برای ابررساناهای اولیه در حدود کمتر از ۲۵ درجه کلوین (۲۴۸- درجه سانتیگراد) بود و تنها با کمک هیدروژن یا هلیوم مایع، مهیا می‌شد که بسیار گران‌قیمت و خطرناک است. لذا از همان ابتدا تلاش برای تولید ابررساناهایی با دمای بحرانی بالاتر شروع شد و محققان در تلاش بودند مواد ابررسانایی با دمای بحرانی بالاتر پیدا کنند.

۳-۱ خاصیت دیامغناطیسی

بعد از کشف ابررساناها، تا چند سال تصور می‌شد رفتار مغناطیسی ابررسانا مانند رساناهای کامل است. مطابق قانون لنز وقتی که تغییرات میدان بر یک رسانا اعمال می‌شود در هادی جریانی القاء می‌شود که جهت این میدان در خلاف جهت میدان به وجود آورندش است. در رسانای ایده‌آل جریان بزرگتری القاء می‌شود که نتیجه‌اش خنثی کردن میدان اصلی می‌باشد. در سال ۱۹۳۳ مایسنر و اوشنفلد دریافتند اگر ماده مورد آزمایش قبل از ابررسانا شدن در میدان مغناطیسی باشد، شار از آن عبور می‌کند ولی وقتی در حضور میدان به دمای بحرانی برسد و ابررسانا گردد دیگر هیچ‌گونه شار مغناطیسی از آن عبور نخواهد کرد و تبدیل به یک دیامغناطیس کامل می‌شود که شدت میدان (B) درون آن صفر خواهد بود. ما شاهد از بین رفتن فوری میدان خواهیم بود، که مطابق قانون لنز چنین

انتظاری نمی رود در واقع ابررساناها همه‌ی میدان‌های مغناطیسی را دفع می‌کند: چه متغیر و چه ثابت! آنها توزیع شار در خارج نمونه‌های قلع و سرب را که در میدان مغناطیسی تا زیر دمای گذار سرد شده بودند را اندازه‌گیری و مشاهده کردند که ابررسانا دیامغناطیس کامل گردید و تمام شار به بیرون رانده شد. این آزمایش نشان داد که ماده ابررسانا چیزی بیشتر از ماده رسانای کامل است. براساس ویژگی مهم ابررساناها، فلزات در حالت ابررسانایی هرگز اجازه نمی‌دهند که چگالی شار مغناطیسی در درون آنها وجود داشته باشد. به عبارت دیگر در داخل ابررسانا همیشه $B=0$ است. این پدیده به اثر مایسنر معروف شد [۵].



شکل ۱-۳: خطوط شار مغناطیسی در الف: حالت عادی ب: حالت ابررسانایی (اثر مایسنر) [۵]

۴-۱ عمق نفوذ (λ)

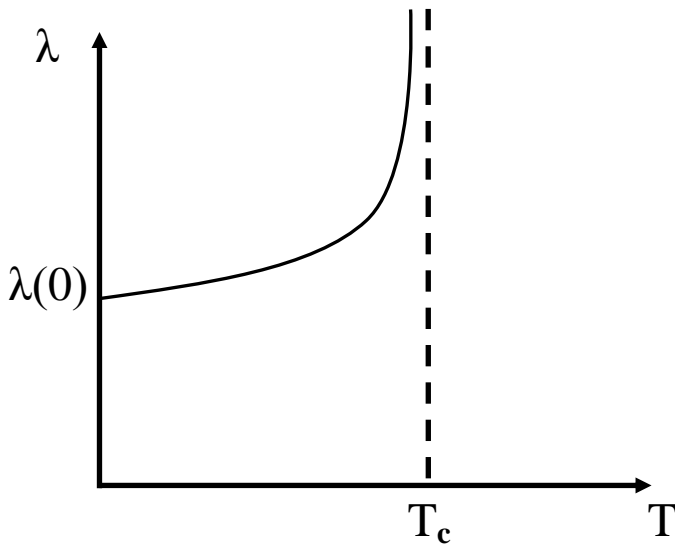
با اینکه ابررسانا به عنوان یک دیامغناطیس کامل در نظر گرفته می‌شود ولی با وجود این، شار مغناطیسی تا فاصله کمی در آن نفوذ می‌کند که عمق نفوذ لندن (λ) نامیده می‌شود. پس از این فاصله، میدان به سرعت به صفر میل می‌کند. در واقع عمق نفوذ میدان مغناطیسی عبارت است از فاصله‌ای که در آن میدان به $1/e$ مقدار اولیه‌اش در سطح جسم کاهش می‌یابد. عمق نفوذ میدان مغناطیسی تابعی از دما بوده و با افزایش دما مقدار آن افزایش می‌یابد. در دمای $T=T_c$ عمق نفوذ برابر بی نهایت است و ابررسانا تبدیل به یک جسم عادی می‌شود و میدان مغناطیسی کاملاً به داخل آن نفوذ می‌کند.

¹Penetration depth London

بستگی دمایی عمق نفوذ با رابطه زیر تعیین می‌شود [۶]:

$$\lambda(T) = \lambda(0) \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (1-1)$$

$\lambda(0)$ عمق نفوذ در دمای صفر می‌باشد. در شکل ۴-۱ تغییرات λ بر حسب دما رسم شده است.



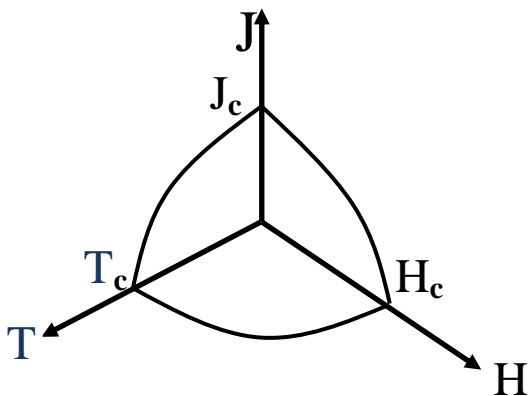
شکل ۴-۱: تغییرات عمق

نفوذ میدان مغناطیسی

نسبت به دما [۶].

۵-۱ پارامترهای بحرانی ابررسانایی

برای پایداری حالت ابررسانایی باید چگالی جریان عبوری، میدان مغناطیسی اعمال شده به نمونه (میدان مغناطیسی ممکن است ناشی از عبور جریان از نمونه و یا ناشی از میدان مغناطیسی خارجی باشد) و دمای محیطی که نمونه در آن قرار گرفته است کمتر از مقادیری باشد که به مقادیر بحرانی معروفند. جریان و میدان مغناطیسی بحرانی هر دو توابعی از دما می‌باشند و با کاهش دما افزایش پیدا می‌کنند. نمودار فاز میدان مغناطیسی جریان و ارتباط آنها با دما در شکل ۵-۱ نشان داده شده است [۷]. در فضای سه بعدی سطحی مشخص شده است که به ازای مقادیر سه گانه مزبور در خارج از این سطح، جسم در حالت عادی بود و در داخل این سطح، جسم در حالت ابررسانایی قرار دارد.



شکل ۵-۱: نمودار فازی ابررسانا

۱-۶ دسته بندی ابرساناها

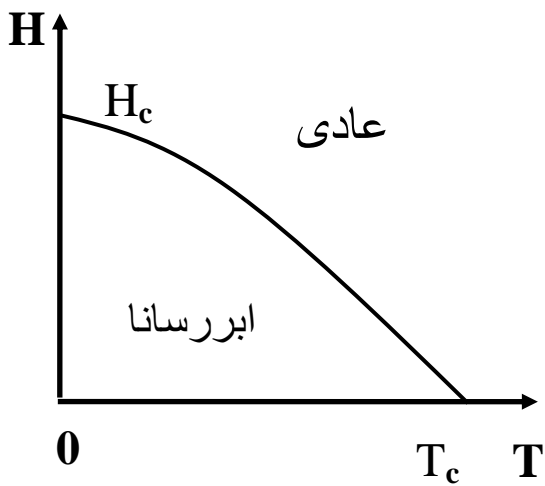
سالهای بسیاری تصور می شد که تمام ابرساناها بر اساس اصول فیزیکی مشابهی رفتار می کنند. اما اکنون ثابت شده ابرساناها با توجه به رفتار فیزیکی، به دو گروه مختلف که به ابرساناهای نوع I و II معروفند باید دسته بندی شوند.

۱-۶-۱: ابرساناهای نوع I:

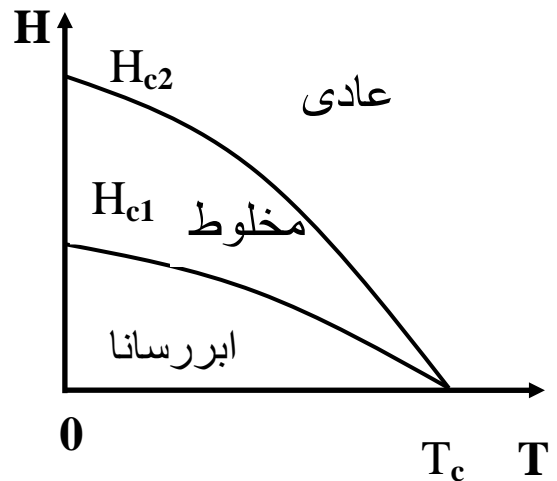
در این نوع ابرسانا اگر میدان مغناطیسی از یک حد آستانه (H_c) بیشتر شود، ابرسانایی ناگهان از بین می رود. بنابراین شار مغناطیسی تحت اعمال یک میدان مغناطیسی کمتر از میدان بحرانی H_c از درون ابرسانا طرد می شود [۸] و در میدانهای بزرگتر از H_c به طور یکنواخت به درون ماده نفوذ می کند و ماده از حالت ابرسانایی به حالت عادی گذار می کند.

۱-۶-۲: ابرساناهای نوع II:

در این نوع ابرسانا دو میدان بحرانی وجود دارد. میدان بحرانی پایینی H_{c1} و میدان بحرانی بالایی H_{c2} . در زیر میدان بحرانی پایینی H_{c1} یک میدان مغناطیسی اعمال شده از داخل ابرسانا، همانند ابرسانای نوع I طرد می شود. به محض اینکه میدان مغناطیسی اعمال شده بیشتر از H_{c1} شود، شار مغناطیسی می تواند به داخل ابرسانای نوع II نفوذ کند. در نتیجه حالت مخلوطی از نواحی عادی و ابرسانایی در داخل ماده ایجاد می شود. با افزایش میدان مغناطیسی، شار مغناطیسی بیشتری نفوذ خواهد کرد تا اینکه در میدان بحرانی بالایی H_{c2} ، ابرسانایی کاملاً از بین می رود. بیشتر ابرساناهایی که عنصر ساده هستند (به جز نیوبیوم، تکنسیوم، وانادیوم و نانولوله های کربنی) نوع I هستند، و تقریباً همه ابرساناهای ناخالص و ترکیبی، نوع II هستند.

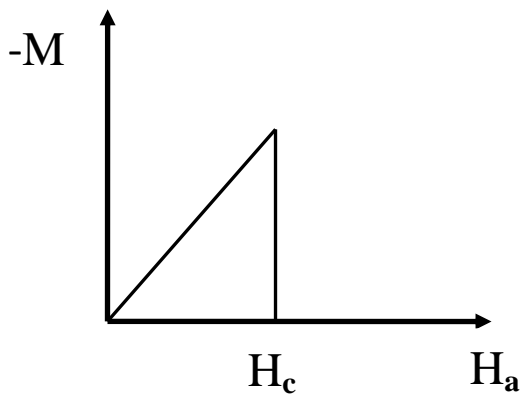


(الف)

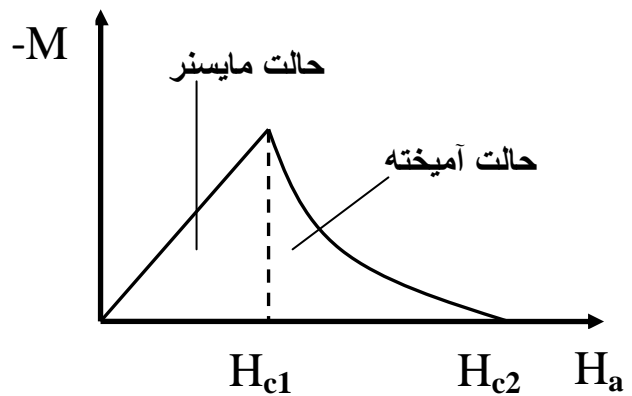


(ب)

شکل ۶-۱: دیاگرام فاز ابررساناهای نوع I (الف) و نوع II (ب)



(الف)

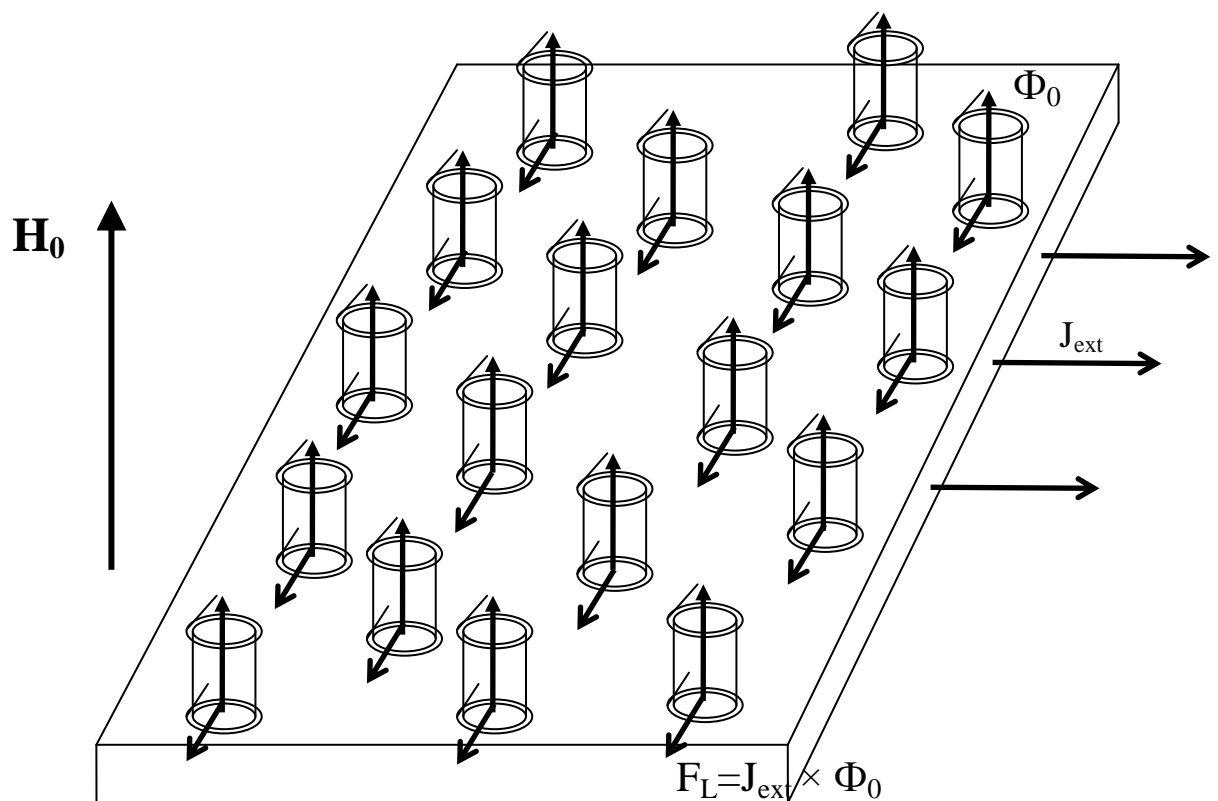


(ب)

شکل ۷-۱: منحنی مغناطش برحسب میدان مغناطیسی ابررساناهای نوع I (الف) و نوع II (ب)

در شکل‌های ۶-۱ و ۷-۱ دیاگرام فاز و منحنی مغناطش ابررساناهای نوع I و II رسم شده‌اند. همانطور که در شکل‌های فوق مشاهده می‌شود پاسخ این دو نوع ابررسانا به میدان مغناطیسی کاملاً متفاوت است.

در حالت آمیخته شار مغناطیسی به صورت استوانه‌های باریکی در راستای میدان مغناطیسی اعمال شده به داخل ماده نفوذ می‌کند. هر یک از این استوانه‌ها که گردش‌ها نامیده می‌شوند حامل یک کوانتوم شار به اندازه $\Phi = h/2q$ می‌باشند. آزمایشات نشان داده‌اند که گردش‌ها تشکیل یک شبکه شش‌گوشی می‌دهند [۴]. شعاع گردش‌ها که طول همدوسی نامیده می‌شود از مقیاس‌های طولی مهم ابررسانایی می‌باشد. در داخل گردش‌ها میدان مغناطیسی هم جهت با میدان اعمالی بوده و این استوانه‌ها به وسیله جریان‌های حلقوی القا شده از نواحی ابررسانای اطراف جدا شده‌اند. این جریان‌های ابررسانایی به همراه جریان‌های چرخشی سطحی موجب حفظ خاصیت دیامغناطیس می‌شوند [۹]. شکل ۸-۱ شبکه گردش‌ها را برای ابررسانای نوع II در حالت مخلوط نشان می‌دهد.



شکل ۸-۱: نفوذ گردش‌ها به یک ابررسانای نوع II

۷-۱ میخکوبی شار مغناطیسی

در ابرساناهای نوع دوم برخلاف ابرساناهای نوع اول جریان تنها بر روی سطح نیست بلکه به طور یکنواخت از کل نمونه عبور می‌کند. همانطور که در شکل ۸-۱ مشاهده می‌شود در حالت مخلوط با عبور جریان، بر گردشاره‌ها نیروی لورنتس مانند $F_L = j \times \Phi_0$ وارد می‌گردد که منجر به حرکت گردشاره‌ها در جهت عمود بر جریان و جهت شار می‌شود [۴]. حرکت گردشاره‌ها باعث ایجاد مقاومت و اتلاف توان می‌شود و در نتیجه گرمای ایجاد شده منجر به نابودی پدیده ابرسانایی می‌گردد و ماده از حالت ابرسانایی به حالت عادی گذار می‌کند [۱۰]. از آنجا که از ابرساناهای نوع II برای انتقال جریان‌های بسیار بزرگ و تولید میدان‌های مغناطیسی خیلی قوی استفاده می‌شود. بنابراین بایستی به نحوی از حرکت گردشاره‌ها جلوگیری کرد. عوامل مختلفی مانند مرزخانه‌ها و نقص‌های بلوری و استفاده از ناخالصی‌ها می‌توانند به عنوان مراکز میخکوبی عمل کنند و مانع از حرکت گردشاره‌ها شوند [۱]. در واقع اگر نیروی لورنتس مانند، کوچکتر از نیروی میخکوبی باشد گردشاره‌ها به دلیل غلبه نیروی میخکوبی بر نیروی لورنتس، ثابت مانده و تحت تاثیر نیروی لورنتس حرکت نخواهند کرد.

۸-۱ پارامتر گینزبرگ-لاندائو (κ)

نسبت عمق نفوذ به طول همدوسی ($\kappa = \lambda / \xi$) پارامتر گینزبرگ-لاندائو نامیده می‌شود. مقدار κ می‌تواند معیاری برای تعیین نوع ابرسانا باشد. اگر مقدار κ کوچکتر از $1/\sqrt{2}$ باشد ابرسانا، نوع I در حالی که اگر بزرگتر از $1/\sqrt{2}$ باشد ابرسانا، نوع II می‌باشد. طول همدوسی که معیاری از شعاع گردشاره‌ها و یا پهناى ناحیه گذار از حالت ابرسانایی به حالت عادی است می‌توان آن را به صورت اندازه بیشینه مسافت بین زوج‌های کوپر، نیز تعریف کرد. طول همدوسی ارتباط تنگاتنگی با مسیر آزاد میانگین الکترون‌ها در داخل فلز دارد. مقادیر بزرگ مسیر آزاد میانگین الکترون‌ها منجر به یک طول همدوسی بزرگ می‌شود، بنابراین بیشتر عناصر، ابرسانای نوع I هستند. به خاطر کاهش مسیر آزاد میانگین الکترون در آلیاژها و ترکیبات بین فلزی این مواد عموماً ابرساناهای نوع II می‌باشند [۱۱].

۹-۱ ماهیت ابرسانایی (نظریه BCS)

هیچ نظریه‌ای برای توضیح ماهیت ابرسانایی در طول پنجاه و شش سال بعد از کشف آن ارائه نگردید. تا وقتی که در ۱۹۵۷، در دانشگاه الینویس، سه فیزیکدان آمریکایی به نامهای باردین، کوپر، شریف^۱ نظریه‌ی میکروسکوپی برای توجیه پدیده ابرسانایی در ابرساناهای متعارف ارائه دادند که بعداً با نام نظریه BCS (حروف ابتدایی نام محققان) شناخته شد [۱۲].

نظریه BCS مبتنی بر این اصل است که حاملهای بار نه به صورت تک الکترون بلکه به صورت زوج الکترون هستند که به آنها زوج های کوپر گفته می‌شود. الکترون‌ها که در حالت عادی، همدیگر را دفع می‌کنند برای تشکیل یک زوج الکترون به سازوکار ویژه‌ای نیاز دارند. این نظریه بیان می‌کند که در واقع الکترون‌هایی با اسپین مخالف می‌توانند همدیگر را جذب کنند و با هم جفت شوند و متقابلاً با عواملی که باعث مقاومت الکتریکی می‌شوند مقابله بکنند. علت این جاذبه برهم‌کنش بین الکترون‌ها و شبکه ارتعاش‌کننده‌ی بلور می‌باشد. در این سازوکار، دو الکترون یک فونون مجازی مبادله می‌کنند. فونون مجازی فقط برای دوره زمان خیلی کوتاهی وجود دارد و فقط در حضور دومین الکترون آماده جذب آن، می‌تواند گسیل شود. انرژی برای حالت های اولیه و نهایی پایسته است با این حال طی دوره کوتاهی از زمان هنگامی که فونون مجازی وجود دارد انرژی سیستم ممکن است از مقدار اولیه آن تفاوت داشته باشد. در صورتی که اختلاف انرژی بین حالت اولیه و میانی کمتر از انرژی فونون $h\nu$ باشد، بر هم‌کنش الکترون-الکترون جاذبه است. این جاذبه را می‌توان در غالب قطبیده شدن شبکه توسط الکترون دیگر درک کرد. تمرکز بارهای مثبت ایجاد شده به وسیله اولین الکترون باعث کاهش انرژی پتانسیل دومین الکترون می‌شود به خاطر این برهم‌کنش جاذبه، الکترون های با تکانه و اسپین مخالف، زوج های کوپر ابرسانا را تشکیل می‌دهند. از طرفی چون اسپین زوج‌های کوپر صفر است از اصل طرد پاولی پیروی نمی‌کنند [۱۱] و بنابراین اشغال حالت‌های انرژی با قانون توزیع بوز-اینشتن توصیف می‌شود.

¹John Bardeen, Leon Cooper, Robert Schrieffer

۱- ۱۰ ابررساناهای دمای بالا

حدود ۷۰ سال پیشرفت‌های انجام شده برای افزایش دمای بحرانی به کندی انجام گرفت. از سال ۱۹۱۱ تا سال ۱۹۷۳ یعنی حدود ۶۲ سال دانشمندان تنها توانستند دمای بحرانی را از ۴ درجه به ۲۳/۳ درجه کلونین که کمی بیشتر از ۲۰/۳ درجه کلونین، یعنی دمای ئیدروژن مایع، برسانند. اما کار با ئیدروژن مایع نیز پرهزینه، مشکل‌آفرین و خطرناک بود و کاربردهای ابررسانا را محدود می‌ساخت. در سالهای بعد علاوه بر فلزات و آلیاژهای فلزی، فعالیت‌هایی در زمینه ترکیبات نیمه‌فلزی توسط برخی محققان آغاز شد اما هنوز ماده‌ای دیگری به جز فلزات و آلیاژها یافته نشده بود که بتواند در دماهای مورد انتظار ابررسانا باشد. سومین رخداد مهم در تاریخ ابررسانایی در سال ۱۹۸۶ اتفاق افتاد، وقتی که جرج، بدنورز و مولر^۱، در حال کار کردن در آزمایشگاه IBM نزدیک شهر زوریخ سوئیس، یک کشف مهم دیگر کردند:

ابررسانایی در دماهایی بالاتر از دماهایی که قبلاً برای ابررسانایی شناخته شده بودند، کشف گردید. در حقیقت آنها موفق به کشف پدیده ابررسانایی در سرامیکی از نوع اکسید مس، لانتانوم و باریوم شدند. دمای بحرانی نمونه ساخته شده، حدود ۳۵ درجه کلونین بود و آنها نیز به خاطر کشف ابررساناهای دمای بالا (HTSC)^۲ موفق به دریافت جایزه نوبل در سال ۱۹۸۷ شدند. طی مدت زمان کوتاهی پس از کشف ابررسانایی دمای بالا، دسترسی به دماهای بحرانی بالاتر به سرعت توسعه یافت. بعد از مدتی عضو جدیدی از خانواده مواد ابررساناهای دمای بالا با جایگزینی ایتريوم Y به جای لانتانوم کشف شد. این ماده سرامیکی که دمای بحرانی آن به ۹۲ درجه کلونین می‌رسید، به (YBCO)^۳ معروف شد. با توجه به نقطه جوش نیتروژن که ۷۷ درجه کلونین در فشار یک اتمسفر است، برای سرد شدن این ابررسانا تا دمای بحرانی، استفاده از نیتروژن مایع هم امکانپذیر بود که بسیار ارزان‌تر و بی‌خطرتر از ئیدروژن و هلیوم مایع بود.

¹ George, Bednorz, Alex Mueller

² High Temperature Superconductors

³ YBa₂Cu₃O₇

بنابراین فقط در طی یک سال از کشف اصلی، دمای انتقال به حالت ابررسانایی افزایش سه برابر داشت و واضح بود که انقلاب ابررساناها شروع شده است. در طول شش سال بعد، چند خانواده دیگر از ابررساناها کشف شدند که شامل ترکیبات شامل تالیوم (Tl) و جیوه (Hg) بوده و دارای دمای بحرانی بیشتر از ۱۲۰ درجه کلوین بودند. بالاترین مقدار تأیید شده دمای بحرانی در فشار معمولی یک اتمسفر، ۱۳۵ درجه کلوین و متعلق به $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$ می‌باشد. به صورت تجربی معلوم شده است اگر ماده ابررسانا به صورت مکانیکی تحت فشار قرار گیرد، دمای بحرانی ابررسانا کمی تغییر می‌کند. در سال ۱۹۹۳، دمای بحرانی ۱۶۵ درجه کلوین (۱۰۸- درجه سانتیگراد)، نیز در ترکیبی از اکسید مس و جیوه و البته تحت فشارهای خیلی بالا گزارش شد. به این ابررساناها، ابررساناهای کوپرات گفته می‌شود.

هر چند دمای بحرانی ترکیبات جدید سرامیکی در حد قابل توجهی از دمای بحرانی مواد ابررسانای متعارف (فلزات و آلیاژها) بزرگتر است و در دماهایی ابررسانا می‌شوند که راحت‌تر قابل دسترسی هستند اما به دلیل خصوصیات فیزیکی این مواد، مانند شکنندگی و پایین بودن چگالی جریان بحرانی کاربردهای این مواد هنوز در مرحله‌ی تحقیق است [۱۱-۱۳]. بنابراین بیشتر ابررساناهای مورد استفاده، همچنان T_c پایین بوده و از هلیوم مایع برای سرد کردن آنها استفاده می‌شود و ابررساناهای T_c بالای معمول‌تر، دارای دمای T_c در حدود ۹۰ K می‌باشند. این بدان معناست که آنها در نیتروژن مایع در دمای ۷۷ K (196°C) که ارزان بوده و به راحتی در دسترس است به خوبی خاصیت ابررسانایی پیدا می‌کنند.

همان‌طور که از ظاهر امر برمی‌آید، خاصیت ابررسانایی در سرامیک‌ها و فلزات، سرشتی متفاوت دارند. سرامیک‌ها، نارسانا هستند و سپس به ابررسانا تبدیل می‌شوند. در حالی که فلزات رسانا هستند و ناگهان مقاومت در آنها صفر می‌شود. دمای گذار به ابررسانایی هم در فلزات بسیار پایین‌تر از سرامیک‌ها است. به این ترتیب نظریه BCS دیگر قادر به توضیح ماهیت ابررسانایی در سرامیک‌ها یا ابررساناهای دمای بالا نیست. دانشمندان تاکنون نظریه‌ای رضایت‌بخش برای توضیح این پدیده نیافته‌اند و این مسئله یکی از مهم‌ترین مسایل حل نشده تاریخ فیزیک است.

فصل دوم

ساختار و خواص تراپردی

ابرسیانهای پایه آهن

مقدمه:

همانطور که در فصل ۱ اشاره شد در سال ۱۹۵۷ نظریه BCS ارائه شد که فهم کاملی در مورد تمام ابررساناهای معمولی ارائه داد. بعد از مدتی در سال ۱۹۸۶، کشف ابررساناهایی با دمای بحرانی بالا در اکسیدهای مس^۱، توجه زیادی را به خود جلب کرد. ساختار کوپرات‌های ابررسانای دمای بالا به صورت اکسیدهای لایه‌ای هستند که شامل دو صفحه CuO_2 می‌باشند که توسط یک اتم Re (عنصر خاکی نادر) از هم جدا شده‌اند. بین این لایه‌ها ناحیه‌های بین لایه‌ای به نام زنجیره‌های CuO وجود دارد. زنجیره‌های CuO را می‌توان به عنوان منبع بار در نظر گرفت که بار را به صفحات CuO_2 انتقال می‌دهند. به این ترتیب این ابررساناهای دمای بالا را می‌توان به صورت صفحات CuO_2 که با منابع بار از هم جدا شده‌اند در نظر گرفت. البته حامل‌های بار توسط آرایش اضافه می‌شوند، در واقع با ایجاد آرایش، سیستم ابررسانا می‌شود. بعد از کشف ابررساناهای دمای بالا نه تنها دمای گذار این ابررساناها عامل تمایز آنها از ابررساناهای معمولی بود بلکه ویژگی‌های خاصی نیز در این ترکیبات دیده شد. این ویژگی‌ها نشان می‌دهد که برهم کنش الکترون-فونون در نظریه BCS قادر به توجیه ابررسانش در این مواد نیست.

۲-۱ ابررساناهای پایه آهن:

۲۲ سال بعد از کشف ابررساناهای اکسید مس (کوپراتها)، دومین گروه ابررساناهای دمای بالا یعنی ابررساناهایی با پایه آهن کشف شدند [۱۴-۱۵]. دمای گذار این ابررساناها بستگی به نوع ترکیب دارد. بالاترین دمایی که گزارش شد حدود 50 K (بدون فشار) بود [۱۶]. از طرفی بالاترین دمایی که نظریه BCS می‌تواند آن را توجیح کند 30 K است. بنابراین این مواد، ابررساناهای غیر معمولی هستند و جزء ابررساناهای دمای بالا محسوب می‌شوند. ابررساناهای پایه آهن علاوه بر اینکه دمای بحرانی بالایی دارند، میدان‌های بحرانی بالایی آنها، نیز مقدار بزرگی می‌باشد. ساختار کریستالی ترکیبات پایه آهن تا حدودی شبیه به کوپرات‌ها می‌باشد.

¹ Copper oxides

در این مواد لایه‌های دوبعدی FePn وجود دارد که Pn نشان دهنده یک اتم نایکتوژن^۱ است. اتمی از گروه ۵ جدول تناوبی (N,As,P,...) اما عنصری که به طور معمول استفاده می‌شود As است. لایه‌های FePn توسط لایه‌های عایق یا فلز از یکدیگر جدا می‌شوند. تنها استثنا در مورد FeSe می‌باشد که لایه‌های جدا کننده ندارد [۱۶]. در ترکیبات پایه آهن که در غیاب هرگونه آلایشی، فلز محسوب می‌شوند، در دماهای مشخصی گذار فاز ساختاری و مغناطیسی مشاهده شده است. طوری که با گذار مغناطیسی ترکیب آنتی‌فرومغناطیس می‌شود و اسپین‌ها به صورت موج چگالی اسپینی (SDW)^۲ آرایش‌بندی می‌شوند.

۱-۱-۲ امواج چگالی اسپینی (SDW):

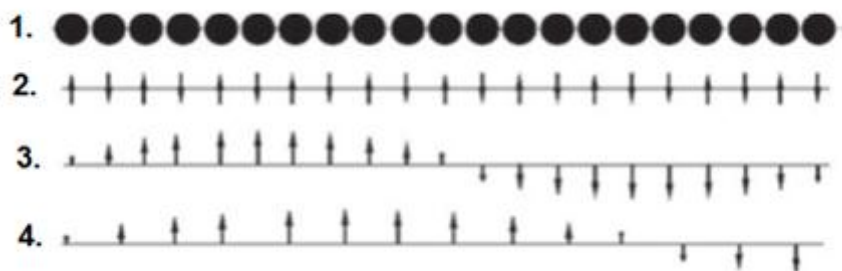
آنتی‌فرومغناطیس‌های معمولی، توسط مدل هایزنبرگ توصیف می‌شوند. اما همانطور که در شکل ۱-۲ مشاهده می‌شود، آنتی‌فرومغناطیس‌ها، به طور معمول به صورت دو تا زیر شبکه کریستالی فرومغناطیس در نظر گرفته می‌شوند. در یک زیر شبکه، اسپین اتم‌های مغناطیسی به سمت بالاست و در زیر شبکه دیگر، به سمت پایین است. بنابراین چگالی اسپینی به صورت زیر توصیف می‌شود [۱۷]:

$$\rho_{\uparrow(\downarrow)}(r) = \frac{1}{2} \rho_0(r) (1 \pm \sigma_0 \cos Q \cdot r) \quad (1-2)$$

علامت مثبت (+) و منفی (-) در رابطه (۱-۲) به ترتیب مربوط به حالتی است که اسپین اتم‌های مغناطیسی به سمت بالا ρ_{\uparrow} و به سمت پایین ρ_{\downarrow} است. از طرفی در رابطه (۱-۲)، $\rho_0 = \rho_{\uparrow} + \rho_{\downarrow}$ و σ_0 اندازه فرکانس است و Q بردار موج SDW می‌باشد. طول موج $\lambda = 2\pi/Q$ معمولاً مضربی از ثابت شبکه (a) نیست این نوع SDW، نامتناسب نامیده می‌شود و چنانچه λ مضربی از ثابت شبکه باشد، متناسب نامیده می‌شود.

¹ Pnictogen

² Spin Density Waves



شکل ۲-۱ (طرح یک بعدی از SDW): ردیف اول اتم‌هایی را نشان می‌دهد که به طور خطی قرار گرفته‌اند. ردیف دوم ساختار آنتی فرومغناطیسی را براساس مدل هایزنبرگ نشان می‌دهد. ردیف سوم و چهارم، SDW (متناسب و نامتناسب) را مشخص می‌کند [۱۷].

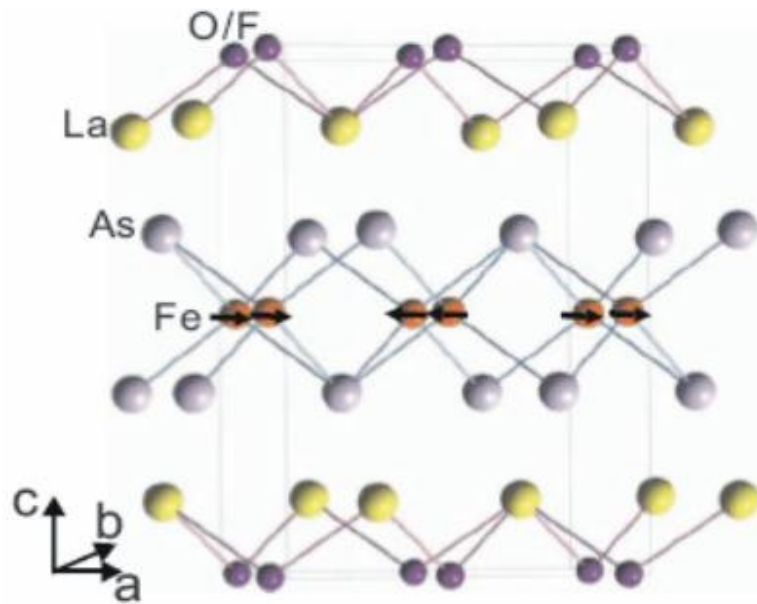
۲-۱-۲ انواع ترکیبات پایه آهن:

ترکیبات پایه آهن براساس ساختارشان به ۴ گروه تقسیم شده‌اند.

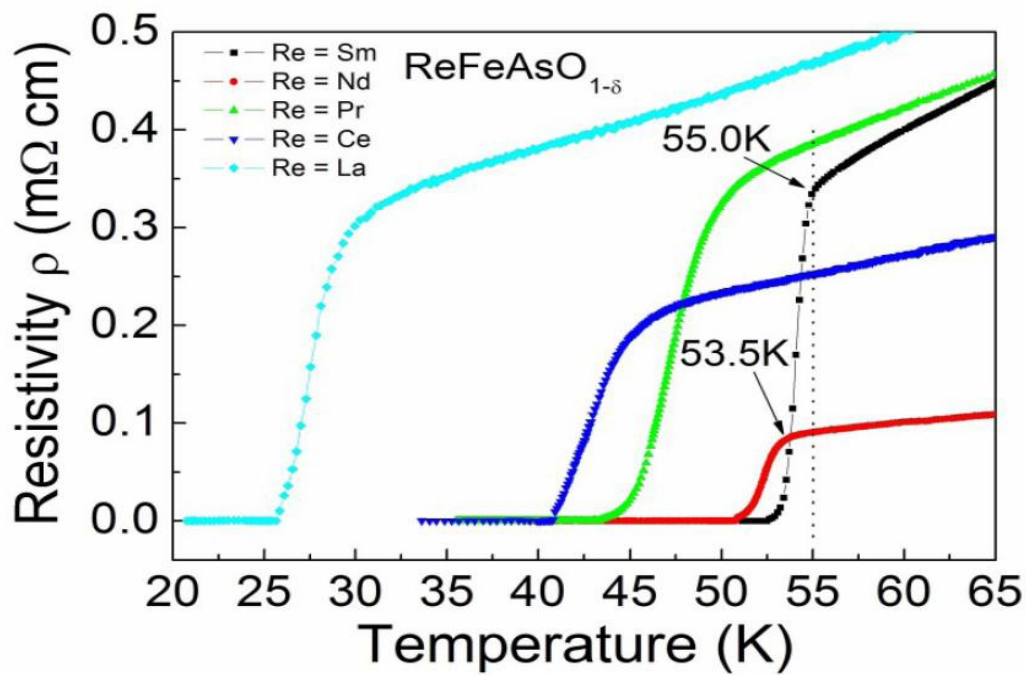
۲-۱-۲-۱: ReFeAsO

همانطور که در شکل ۲-۲ مشاهده می‌شود ساختار لایه‌ای این ترکیبات شامل لایه‌های تناوبی FeAs و لایه‌های ReO (عنصر خاکی نادر $\text{Re} =$) می‌باشد. ReFeAsO با فرمول الکترونی $\text{Re}^{+3}\text{Fe}^{+2}\text{As}^{-3}\text{O}^{-2}$ دارای ساختار تتراگونال است. با توجه به مطالعات نظری می‌توان گفت که هدایت رسانندگی عمدتاً در لایه FeAs اتفاق می‌افتد. در حالی که لایه ReO به عنوان یک مخزن بار عمل می‌کند که بار را به صفحات FeAs انتقال می‌دهد. حاملین بار توسط آرایش اضافه می‌شوند. در این ترکیبات، آرایش الکترونی به صورت جانیشینی فلئوئر با اکسیژن [۱۸] یا کمبود اکسیژن [۱۹] انجام می‌گیرد. در حالی که آرایش حفره‌ها به صورت جانیشینی Sr به جای La انجام می‌گیرد [۲۰]. بنابراین ابررسانایی در این ترکیبات همچون کوپرات‌ها، هنگامی اتفاق می‌افتد که ترکیب اصلی آلاییده شود. در ابتدا ابررسانایی در ترکیب LaFeAsO با آرایش F در دمای بحرانی 26 K کشف شد [۱۸]. سپس با جانیشینی Ce (سریم) به جای La دمای گذار به 41 K رسید [۲۱]. در واقع محققان توانستند با جایگزینی La با یونهای خاکی نادری که شعاع یونی کوچکتری دارند، دمای گذار را افزایش دهند. طوری که توانستند دمای گذار را به 55 K در ترکیب $\text{SmO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ برسانند [۲۲]. این ترکیبات معمولاً ترکیبات "۱۱۱۱" نامیده می‌شوند.

در شکل ۲-۳ وابستگی دمایی مقاومت ویژه الکتریکی ترکیبات "۱۱۱۱" به صورت تابعی از دما نشان داده شده است.



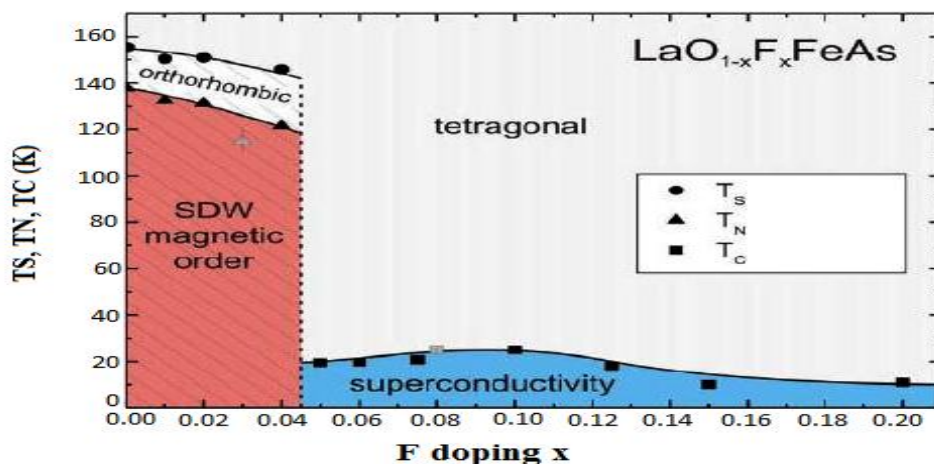
شکل ۲-۲: ساختار بلوری $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$



شکل ۲-۳: وابستگی دمایی مقاومت ویژه الکتریکی به یون های خاکی نادر مختلف [۲۲].

از طرفی تنها مورد LaFeAsO با آلایش حفره، در ترکیب $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeAs}$ با دمای بحرانی $T_c=25\text{ K}$ مشاهده شده است [۲۳]. بسیاری از آزمایش‌ها، میدان‌های بحرانی خیلی بالایی را در ترکیبات $\text{LnFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ (Ln نشان دهنده عناصر لانتانید است) نشان می‌دهد. به طور مثال Hc_2^{ab} که تخمین زده شده برای $\text{Ln}=\text{La}$ ، بیشتر از 50 T است و برای $\text{Ln}=\text{Sm,Pr,Nd}$ بیشتر از 100 T می‌باشد [۲۴]. در ترکیبات ReFeAsO در دمای مشخصی یک گذار فاز ساختاری، تقارن کریستال را از تتراگونال به اورتورمبیک تغییر می‌دهد [۲۵] و با کاهش بیشتر دما یک گذار مغناطیسی رخ می‌دهد و ترکیب آنتی فرومغناطیس می‌شود و اسپین‌ها به صورت موج چگالی اسپینی آرایش‌بندی می‌شوند. اما توسط آلایش و افزایش مقدار آن، دماهایی که گذار ساختاری و مغناطیسی ایجاد می‌شود کاهش پیدا می‌کند. تا اینکه در یک آلایش معین، ترکیب ابررسانا می‌شود و آرایش بندی SDW به طور کامل از بین می‌رود.

در شکل ۲-۴ دیاگرام فاز $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ با مقادیر مختلفی از آلایش F نشان داده شده است.

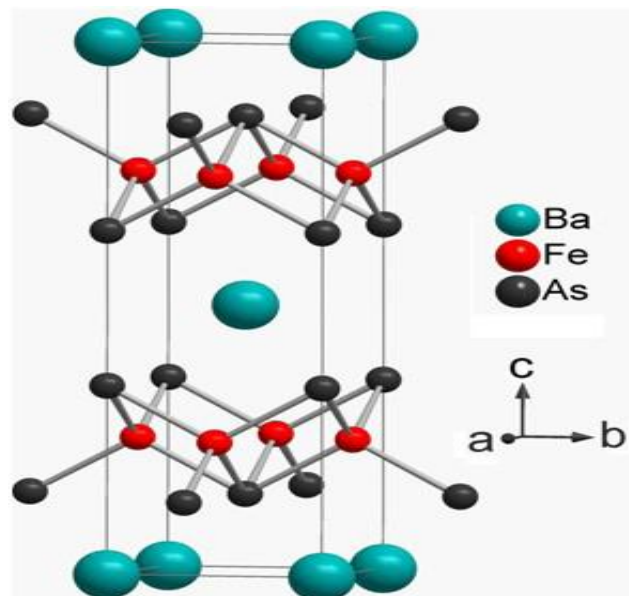


شکل ۲-۴: دیاگرام فاز $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ [۲۶]

همانطور که در شکل ۲-۴ مشاهده می‌شود دمای گذار ابررسانایی T_c ، ساختاری T_s ، مغناطیسی T_N ، به مقدار آلایش F (فلوئور) بستگی دارد. با افزایش آلایش، هنگامی که ترکیب ابررسانا می‌شود نه تنها گذار ساختاری وجود ندارد بلکه گذار مغناطیسی هم وجود ندارد. بنابراین ساختار بلوری سیستم در حالت ابررسانایی تتراگونال خواهد ماند.

AFe₂As₂: ۱-۲-۱-۲

ساختار بلوری این ترکیب در شکل ۵-۲ نشان داده شده است. همان طور که اشاره شد در ترکیب ReFeAsO لایه های $(\text{Fe}_2\text{As}_2)^{-2}$ و $(\text{Re}_2\text{O}_2)^{+2}$ به طور تناوبی قرار گرفته‌اند با عوض کردن $(\text{Re}_2\text{O}_2)^{+2}$ با یک لایه‌ای از یک اتم بزرگ تنهای A (فلز قلیایی) می‌توان ترکیب AFe₂As₂ را بنا کرد. حال برای اینکه این ترکیب خنثی بماند باید A یک اتم دو ظرفیتی باشد (A= Sr, Ba, Ca, Eu). این ساختار جدید، به ساختار "۱۲۲" معروف می‌باشد [۲۱]. این ترکیب همانند ترکیب ReFeAsO دارای ساختار لایه‌ای می‌باشد با این تفاوت که لایه ReO لایه‌ای از اتم‌های A (فلز قلیایی) جایگزین شده است. همان طور که در شکل ۵-۲ مشاهده می‌شود این ترکیب، دیگر شامل اکسیژن نیست. در این ترکیب همانند ReFeAsO در لایه‌های FeAs اتم‌های Fe در حالت $\text{Fe}^{+2} (3d^6)$ قرار دارند که پوسته d آنها بیشتر از نیمه پر است. از طرفی هر اتم Fe با ۴ اتم As برهم‌کنش می‌کند. یکی از تفاوت‌های مهمی که بین ترکیبات آرسنیک- آهن "۱۱۱۱" و "۱۲۲" وجود دارد این است که ترکیبات "۱۱۱۱" در هر سلول واحد یک لایه FeAs دارند در صورتی که ترکیبات آرسنیک- آهن "۱۲۲" در هر سلول واحد دو لایه FeAs دارند.



شکل ۵-۲: ساختار بلوری BaFe₂As₂ [۲۷].