

مطالعه‌ی اثر قله‌ی دوم در ابررسانای پایه آهن $BaFe_{1.9}Ni_{0.1}As_2$

حسین زاده، محمد؛ قربانی، شعبان‌رضا؛ عربی، هادی

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.

چکیده

چگالی جریان بحرانی در ابررساناهای نوع ۲ از اهمیت زیادی برخوردار است. می‌توان با بهبود میخکوبی گردش‌ها چگالی جریان بحرانی را افزایش داد. در بعضی از ابررساناهای نوع ۲ در منحنی چگالی جریان بحرانی بر حسب میدان مغناطیسی اثر قله‌ی دوم دیده می‌شود که پدیده‌ی بسیار جذابی است. در این مقاله اثر قله‌ی دوم در ابررسانای پایه آهن $BaFe_{1.9}Ni_{0.1}As_2$ براساس سازوکار میخکوبی مطالعه و معلوم شد که احتمالاً اثر قله‌ی دوم با تغییر در حالت میخکوبی از حالت تک-گردش‌ها به دسته‌گردش‌ها همراه است.

Study of the second peak effect in $BaFe_{1.9}Ni_{0.1}As_2$ iron-based superconductor

Hosseinzadeh, Mohammad; Ghorbani, Shaaban Reza; Arabi, Hadi

Department of Physics, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad

Abstract

The critical current density in type-II superconductors is very important. It is possible to increase the critical current density by improving pinning of vortices. Some of type-2 superconductors exhibit second peak effect in the critical current density vs magnetic field curve and this is very interesting phenomenon. In this paper the second peak effect in iron-based superconductor $BaFe_{1.9}Ni_{0.1}As_2$ was studied based on the pinning mechanisms, and it was concluded that the second peak effect is probably accompanied with changing in pinning regime from single vortex to bundle vortex pinning.

PACS No.

موجود، مانند فازهای ثانویه، اتم‌های ناخالصی، دررفتگی‌ها، مرزخانه‌ها و جاخلالی‌ها، در ابررسانا هستند. وقتی که گردش‌ها با مراکز میخکوبی برهم‌کنش می‌کند انرژی سیستم پایین می‌آید [۱] و بنابراین گردش‌ها تمایل دارد در آن مکان باقی بماند و به اصطلاح میخکوب می‌شود. هرچه نیروی میخکوبی بیشتر شود ابررسانا قابلیت حمل بدون اتلاف چگالی جریان بیشتری را دارد. این نیرو به ویژگی‌های کشسان گردش‌ها و همین‌طور چگالی و قدرت مراکز میخکوبی بستگی دارد [۲].

اگر گردش‌ها به صورت مستقل در نظر گرفته شوند، یعنی از برهم‌کنش بین آن‌ها صرف‌نظر گردد، هر گردش‌ها را می‌توان به صورت یک رشته‌ی کشسان در نظر گرفت. اما اگر برهم‌کنش بین

مقدمه

ابررساناهای نوع ۲ نسبت به نوع ۱ در میدان‌های مغناطیسی بسیار بالاتری ابررسانا باقی می‌مانند و به همین دلیل قابلیت کاربردی بیشتری دارند. وجود حالت مخلوط که در آن شار مغناطیسی به صورت گردش‌ها درون ابررسانا نفوذ می‌کند وجه تمایز ابررساناهای نوع ۲ و ۱ است. اما حرکت این گردش‌ها بر اثر اعمال جریان خارجی باعث اتلاف و ایجاد مقاومت می‌شود [۱] و قابلیت کاربردی ابررساناهای نوع ۲ را محدود می‌کند. راه حل این مسئله جلوگیری از حرکت گردش‌ها یا به اصطلاح میخکوب کردن آنهاست. مراکز میخکوبی درواقع عیوب یا ناهمگنی‌های

$$J_c(t)/J_c(0) = (1-t^2)^{5/2} (1+t^2)^{-1/2} \quad (1)$$

برای سازوکار میخکوبی $\delta\ell$ و:

$$J_c(t)/J_c(0) = (1-t^2)^{7/6} (1+t^2)^{5/6} \quad (2)$$

برای سازوکار میخکوبی δT_c .

که در آن $t=T/T_c$ دمای کاهش یافته، T_c دمای بحرانی و $J_c(0)$ چگالی جریان بحرانی در دمای تقریباً صفر است. بنابراین می توان با رسم داده های تجربی چگالی جریان بحرانی بهنجار شده بر حسب T/T_c در کنار منحنی های مربوط به روابط ۱ و ۲ سازوکار میخکوبی را تعیین کرد.

قله ی دوم در منحنی چگالی جریان بحرانی بر حسب میدان مغناطیسی یک اثر ویژه است. چگالی جریان بحرانی که معمولاً با افزایش میدان مغناطیسی کاهش پیدا می کند، در بعضی مواد در میدان مغناطیسی خاصی، H_{on} شروع به افزایش می کند و بعد از رسیدن به یک قله در H_p دوباره کاهش می یابد. در این مواد H_{on} و H_p تابع دما هستند و با افزایش دما به سمت میدان های مغناطیسی کمتر انتقال می یابند [۷]. قله ی دوم نه تنها در ابررساناهای فلزی بلکه در ابررساناهای دمای بالا هم مشاهده می شود [۸]. برای توصیف اثر قله ی دوم سازوکارهای مختلفی پیشنهاد شده است. این سازوکارها اولاً عمومی نیستند، یعنی این اثر را به عنوان یک اثر واحد در تمام مواد توضیح نمی دهند و ثانیاً هیچکدام قطعی نبوده و دارای اشکالاتی هستند [۷]. اثر قله ی دوم در ابررساناهای پایه آهن که اولین بار در سال ۲۰۰۸ کشف شدند هم دیده می شود [۹، ۱۰].

در این مقاله با استفاده از مدل "گریسن" به مطالعه ی اثر قله ی دوم بر اساس سازوکار میخکوبی در ابررسانای پایه ی آهن $BaFe_{1.9}Ni_{0.1}As_2$ پرداخته می شود.

آزمایش

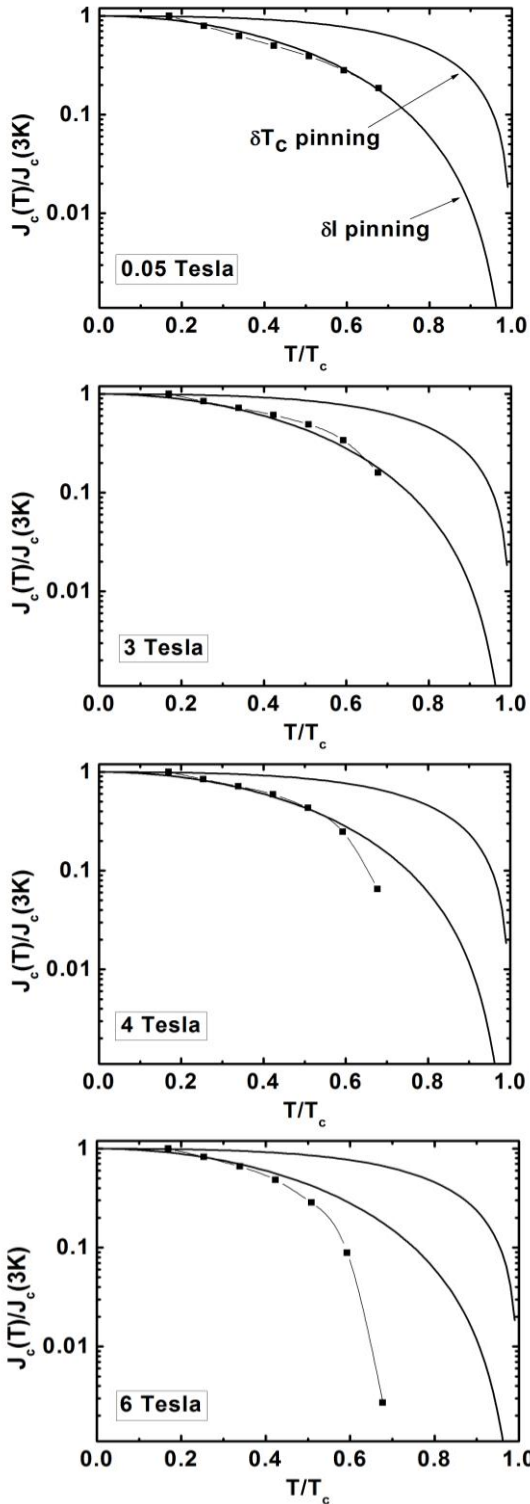
تک بلور ترکیب $BaFe_{1.9}Ni_{0.1}As_2$ به روش سلف-فلاکس در دانشگاه ملی سئول کره جنوبی رشد داده شد. جزئیات آماده سازی در مرجع [۱۱] آمده است. حلقه های مغناطش توسط سیستم اندازه گیری خواص مغناطیسی (Quantum Design) PPMS در گستره میدان های مغناطیسی صفر تا ۸/۷ تسلا در

گردشارها در نظر گرفته شود، شبکه ی گردشارها را باید به صورت یک شبکه کشسان مورد مطالعه قرار داد. در حالتی که گردشارها یک شبکه ی متقارن را تشکیل می دهند انرژی کشسان کمینه است. ولی هر انحراف از حالت شبکه ی متقارن نیروی کشسان بین گردشارها و انرژی سیستم را افزایش می دهد [۳].

در صورتی که شبکه ی گردشارها کاملاً صلب باشد و هیچ انعطاف پذیری نداشته باشد در برهمکنش با مراکز میخکوبی، که به صورت تصادفی در ابررسانا توزیع شده اند، میخکوب نمی شود. چون نیروهای ناشی از مراکز میخکوبی که تصادفی توزیع شده اند همدیگر را خنثی می کنند [۱]. شبکه گردشارها با انعطاف پذیری می تواند پیکربندی را به خود بگیرد که مجموع انرژی برهمکنش با مراکز میخکوبی و انرژی کشسان کمینه و بنابراین گردشارها میخکوب شوند. طبق نظریه ی میخکوبی مشارکتی [۴] با تقسیم شدن شبکه ی گردشارها به دسته هایی با حجم V_c انرژی کمینه می شود. گردشارها در هر دسته به صورت همدوس حرکت می کنند یا میخکوب می شوند و در این حجم نسبت به هم تغییر شکل نمی دهند. اما هر دسته نسبت به دسته ی دیگر برای کمینه شدن انرژی تغییر شکل می دهد. در این حالت نظم کوتاه برد شبکه ی گردشارها حفظ ولی نظم بلند برد آن از بین می رود. هر دسته با حجم V_c به صورت یک کل جابجا یا میخکوب می شود که به آن حجم همدوسی یا همبستگی می گویند. ابعاد حجم همدوسی به ویژگی های کشسانی شبکه ی گردشارها و قدرت مراکز میخکوبی و بنابراین به ماده، دما و میدان مغناطیسی بستگی دارد [۳، ۴].

مراکز میخکوبی یا ویژگی های ابررسانایی متفاوتی نسبت به بقیه ی ماده دارند، یا کاملاً نرمال هستند [۵] و بسته به ماهیت شان باعث تغییر موضعی دمای بحرانی T_c یا طول پویس آزاد میانگین الکترونی ℓ می شوند و به این ترتیب از نظر سازوکار میخکوبی به دو دسته ی δT_c و $\delta\ell$ تقسیم می گردند [۳].

"گریسن" و همکاران [۶] نشان دادند در میدان های مغناطیسی پایین که میخکوبی گردشارها به صورت تک گردشاره و مستقل از هم اتفاق می افتد، و از ویژگی کشسان شبکه ی گردشارها می توان صرف نظر کرد، رفتار چگالی جریان بحرانی بهنجار شده برای سازوکارهای میخکوبی گفته شده به صورت زیر است:



شکل ۲: منحنی چگالی جریان بهنجار شده بر حسب دمای کاهش یافته در میدان های مختلف و مقایسه با نظریه. (نقاط توپر از روی داده های تجربی بدست آمده اند و خطوط پررنگ مربوط به روابط ۱ و ۲ هستند.)

دانشگاه ولانگونگ استرالیا انجام گرفت. چگالی جریان بحرانی بر اساس مدل "بین" [۱۲] از روی حلقه های مغناطش اندازه گیری شده در دماهای ۳، ۴/۵، ۶، ۷/۵، ۹، ۱۰/۵ و ۱۲ کلوین با استفاده از رابطه ی:

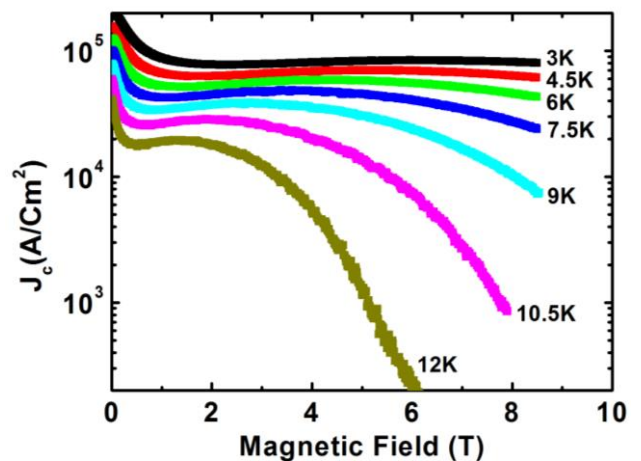
$$J_c = 20\Delta M / Va(1 - a/3b) \quad (۱)$$

محاسبه گردید. که در آن ΔM پهنای حلقه ی مغناطش، b و a به ترتیب طول و عرض نمونه ($b > a$) در راستای عمود بر میدان مغناطیسی و V حجم نمونه است.

نتایج

چگالی جریان بحرانی بر حسب میدان مغناطیسی و در دماهای مختلف در شکل ۱ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، چگالی جریان بحرانی بعد از کاهش اولیه دوباره شروع به افزایش می کند و بعد از رسیدن به یک بیشینه دوباره کاهش می یابد. بنابراین در این ابررسانا اثر قله ی دوم مشاهده می شود.

برای بررسی سازوکار میخکوبی، چگالی جریان بحرانی بهنجار شده، $J_c(T)/J_c(3K)$ بر حسب دمای کاهش یافته، T/T_c در میدان های مغناطیسی مختلف در کنار منحنی های روابط ۱ و ۲ رسم شدند، که در شکل ۲ نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشاهده می شود در میدان های مغناطیسی پایین داده های تجربی نزدیک به منحنی مربوط به میخکوبی δl هستند ولی با افزایش



شکل ۱: منحنی چگالی جریان بحرانی بر حسب میدان در دماهای مختلف.

مرجع ها

- [۱] Ketterson, J.B., *Superconductivity*. 1999: Cambridge University Press
- [۲] Lowell, J., *Investigation of pinning centres in superconductors by means of alternating currents. I. Theory*. Journal of Physics F: Metal Physics, 1972. **2**(3): p. 547
- [۳] Blatter, G., et al., *Vortices in high-temperature superconductors*. Reviews of Modern Physics, 1994. **66**(4): p. 1125
- [۴] Larkin, A. and Y.N. Ovchinnikov, *Pinning in type II superconductors*. Journal of Low Temperature Physics, 1979. **34**(3-4): p. 409-428
- [۵] Dew-Hughes, D., *Flux pinning mechanisms in type II superconductors*. Philosophical Magazine, 1974. **30**(2): p. 293-305
- [۶] Griessen, R., et al., *Evidence for mean free path fluctuation induced pinning in YBa₂Cu₃O₇ and YBa₂Cu₄O₈ films*. Physical review letters, 1994. **72**(12): p. 1910.
- [۷] Matsushita, T., *Flux pinning in superconductors*. 2007: Springer.
- [۸] Küpfer, H., et al., *Intragrain junctions in YBa₂Cu₃O_{7-x} ceramics and single crystals*. Cryogenics, 1989. **29**(3): p. 268-280.
- [۹] Shen, B., et al., *Flux dynamics and vortex phase diagram in Ba(Fe_{1-x}Co_x)₂As₂ single crystals revealed by magnetization and its relaxation*. Physical Review B, 2010. **81**(1): p. 014503.
- [۱۰] Bhoi, D., P. Mandal, and P. Choudhury, *Vortex dynamics and second magnetization peak in PrFeAsO_{0.60}F_{0.12} superconductor*. Journal of Applied Physics, 2013. **113**(18): p. 183902.
- [۱۱] Kim, S.H., et al., *Fluctuation conductivity of single-crystalline BaFe_{1.8}Co_{0.2}As₂ in the critical region*. Journal of Applied Physics, 2010. **108**(6): p. 063916.
- [۱۲] Bean, C., *Magnetization of hard superconductors*. Physical Review Letters, 1962. **8**(6): p. 250.

میدان مغناطیسی داده ها طوری با دما تغییر می کنند که قابل انطباق با هیچکدام از دو منحنی مربوط به سازوکارهای میخکوبی δl و δT_c نیستند. برای توصیف علت انحراف داده های تجربی از منحنی های نظری بایستی توجه کرد که بر اساس آنچه که گفته شد روابط ۱ و ۲ مربوط به ناحیه میخکوبی تک گردشاره هستند که در آن گردشاره ها به صورت مستقل از هم میخکوب می شوند. بنابراین در میدان های مغناطیسی بالا که گردشاره ها ممکن است به صورت دسته های کوچک یا بزرگ با حجم V_c میخکوب شوند معتبر نیستند.

از شکل ۲ پیداست که با افزایش میدان مغناطیسی این انحراف در دماهای پایین تر روی می دهد. از آنجایی که قله ی دوم در منحنی چگالی جریان بحرانی هم همین رفتار را دارد، یعنی در دماهای پایین قله ی دوم در میدان های بالاتر رخ می دهد، بنابراین می توان اینگونه نتیجه گیری کرد که قله ی دوم با تغییر در حالت میخکوبی گردشاره ها از حالت تک گردشاره به دسته گردشاره همراه است.

نتیجه گیری

چگالی جریان بحرانی برحسب میدان مغناطیسی در دماهای مختلف برای ابررسانای پایه آهن $\text{BaFe}_{1.9}\text{Ni}_{0.1}\text{As}_2$ تعیین گردید. اثر قله ی دوم در چگالی جریان بحرانی مشاهده شد. با استفاده از مدل "گریسن" سازوکار میخکوبی در این ابررسانا بررسی و مشاهده شد که در میدان های مغناطیسی بالا داده های تجربی با نظریه در توافق نیست. از آنجایی که مدل "گریسن" برای میخکوبی در حالت تک گردشاره بدست آمده، اینگونه نتیجه گیری شد که احتمالاً اثر قله ی دوم با تغییر میخکوبی از حالت میخکوبی تک گردشاره به دسته گردشاره اتفاق می افتد.

سپاسگذاری

از آقای پروفسور یانگ برای همکاری و اجازه ی استفاده از تجهیزات دانشگاه ولانگوگ استرالیا جهت اندازه گیری حلقه های مغناطش و همچنین از آقای پروفسور چوی برای تهیه نمونه صمیمانه تشکر می کنیم.