

بررسی سازوکار میخکوبی در ابرسانای تک کریستال $Fe_{1.06}Te_{0.6}Se_{0.4}$

حسینی، سید جابر؛ قربانی، شعبان رضا؛ عربی، هادی

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد مشهد

چکیده:

وابستگی چگالی جریان بحرانی به میدان مغناطیسی اعمالی در راستای $H||c$ و دما برای تک بلور $Fe_{1.06}Te_{0.6}Se_{0.4}$ بررسی شده است. برای تعیین سازوکار میخکوبی گردشاره‌ها، نیروی میخکوبی نرمالیزه شده بر حسب $h = H/H_{max}$ رسم گردید و سازوکار میخکوبی گردشاره‌ها تعیین گردید. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که نوع سازوکار غالب میخکوبی به دما بستگی دارد. سهم مربوط به هر کدام از سازوکارهای میخکوبی در دماهای مختلف معین گردید. نتایج به دست آمده نشان داده که سازوکار غالب در دماهای پایین سازوکار میخکوبی Δk است در حالیکه در دماهای بالا سازوکار نقطه ای غالب می باشد.

Investigating of the flux pinning mechanisms in $Fe_{1.06}Te_{0.6}Se_{0.4}$ single crystal

Hossaini, S. J; Ghorbani, S., R; Arabi, H.

Department of Physics, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad

Abstract:

The critical current density as a function of the magnetic field along c -direction and temperatures were investigated in $Fe_{1+y}Te_{0.6}Se_{0.4}$ single crystal. Normalized volume pinning force F_p vs. $h=H/H_{max}$ was plotted and the flux pinning mechanisms were obtained. The results shows that the dominant pinning mechanism dependent on temperatures. The pinning mechanism contribution of each mechanism was obtained. It was found that the Δk pinning was dominated at low temperatures while at high temperatures the normal point pinning is more effective mechanism.

مقدمه:
خلاف ابرساناهای کوپرات که در آنها همبستگی موضعی قوی‌ای بین ممان‌های مغناطیسی وجود دارد، نتایج تجربی و مدل‌های نظری نشان داده اند که در این دسته از مواد ممان‌های مغناطیسی نرم بوده و شدیداً به شرایط فیزیکی حساس هستند [۹ و ۱۰]. در بین ابرساناهای پایه آهن ترکیبات FeSe/Te به دلیل داشتن ساختار نسبتاً ساده گزینه ی بسیار خوبی برای پی بردن به علت پدیده‌ی ابرسانایی می‌باشد. ترکیب FeSe دارای دمای گذار ۸K است و با جایگزین کردن ۶۰٪ Se با Te دمای گذار آن به ۱۴/۵K افزایش میابد [۱۱ و ۱۲]. در اینجا چگالی جریان بحرانی به صورت تابعی از میدان مغناطیسی و دما، و همچنین سازوکار میخکوبی در تک کریستال ابرسانای $Fe_{1.06}Te_{0.6}Se_{0.4}$ مورد مطالعه قرار گرفته و بررسی شده است.

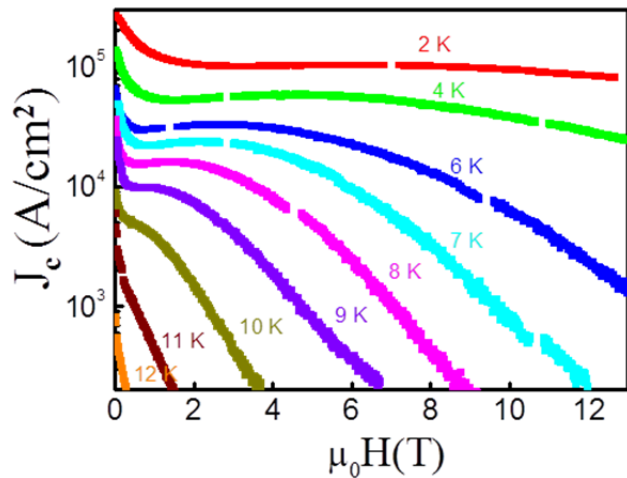
کشف خاصیت ابرسانایی در دماهای بالا در ترکیبات کوپرات منجر به کاوش‌های گسترده‌ای برای پی بردن به سازوکار جفت شدن الکترون‌ها شد. پیدایش ابرساناهای پایه آهن نیرو محرکه‌ی دیگری را برای کشف این سازوکار بوجود آورد [۱-۸]. یکی از ویژگی‌های منحصر به فرد مشاهده شده در ابرساناهای پایه آهن دارای پنیکتاید (ترکیباتی که دارای عنصری از عناصر موجود در گروه پنجم اصلی جدول تناوبی هستند). یا دارای کلکجنید (ترکیباتی که دارای عنصری از عناصر موجود در گروه ششم اصلی جدول تناوبی هستند). این است که با بوجود آمدن خاصیت ابرسانایی، نظم آنتی‌فرومغناطیس مربوط به لایه‌های Fe- X (X=As/Te) با اضافه کردن یک عنصر دیگر کمتر می‌شود. بر

بنابراین مقدار آهن موجود در این ترکیب به شدت بر روی خواص ابررسانایی نمونه تاثیر دارد.

آزمایش:

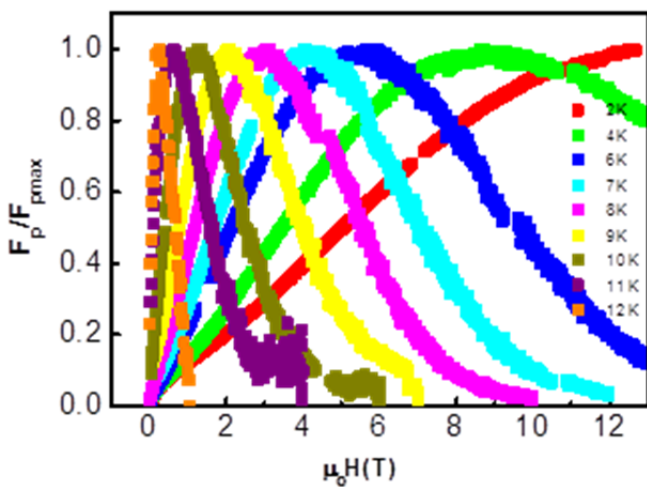
ترکیب تک بلور $Fe_{1.06}Te_{0.6}Se_{0.4}$ به روش سلف-فلوکس در انستیتو ماکس پلانگ اشتوتگارت آلمان رشد داده شده است. جزئیات آماده سازی در مرجع آمده است [۱۳]. از بلورهای رشد داده شده نمونه هایی به ابعاد $2.12 \times 1.46 \times 0.06 \text{ mm}^3$ جهت اندازه گیری برش داده شد. حلقه های مغناطش توسط سیستم اندازه گیری خواص مغناطیسی (MPMS, Quantum Design) در گستره میدان های مغناطیسی صفر تا ۱۳ تسلا در دانشگاه ولانگونگ استرالیا انجام گرفت. چگالی جریان بر اساس مدل بین با توجه به داده های اندازه گیری شده حلقه های پسماند در بازه دمایی ۲-۱۲ کلوین از رابطه $(20 \Delta m / Va(1-3a/b))$ برای $b > a$ و محاسبه گردید. در رابطه فوق Δm ارتفاع حلقه های پسماند، a و b به ترتیب طول و پهناي نمونه مورد مطالعه در راستای عمود بر میدان مغناطیسی و V حجم نمونه هستند.

نتایج: شکل (۱) چگالی جریان بحرانی $J_c(T, H)$ را برای نمونه ی ابررسانای $Fe_{1.06}Te_{0.6}Se_{0.4}$ در دماهای مختلف به صورت تابعی از میدان مغناطیسی نشان می دهد. مقادیر چگالی جریان بحرانی در ۲ و ۴ K به ترتیب برابر با $2.65 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ و $1.04 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ برای نمونه تک کریستال $Fe_{1.06}Te_{0.6}Se_{0.4}$ در دمای ۱۸ K و میدان های کم [۱۴] و $1.2 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ برای تک کریستال $Fe_{1.04}Te_{0.6}Se_{0.4}$ در ۴ K و میدان های نزدیک به صفر بیشتر است. این افزایش شاید به خاطر اتمهای آهن اضافی است، به طوریکه این آهن اضافی باعث افزایش نقایص کریستالی می شود که این نقایص به عنوان مراکز میخکوبی عمل می کنند [۱۵]. اگرچه افزایش آهن باعث افزایش چگالی جریان می شود اما این افزایش منجر به کاهش دمای بحرانی نمونه و مقدار حجمی از ماده که در فاز ابررسانایی قرار دارد نیز می شود [۱۶].



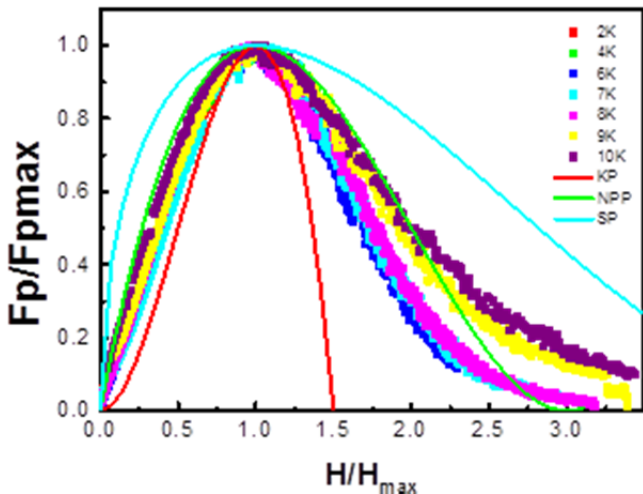
شکل ۱. چگالی جریان بحرانی برحسب میدان مغناطیسی اعمالی در بازه دماهای ۲-۱۲ kK

وابستگی چگالی نیروی میخکوبی به میدان مغناطیسی توسط رابطه $|F_p| = |J \times H|$ به دست آمد که در آن از اندرکنش بین گرد شاره ها صرف نظر شده است. در شکل ۲ وابستگی چگالی نیروی میخکوبی بیشینه $F_{p,max}$ به میدان مغناطیسی در راستای $H || c$ برای دماهای مختلف نشان داده شده است. همانطور که از شکل پیداست. مکان بیشینه با افزایش دما به سمت میدانهای کمتر حرکت می کند.

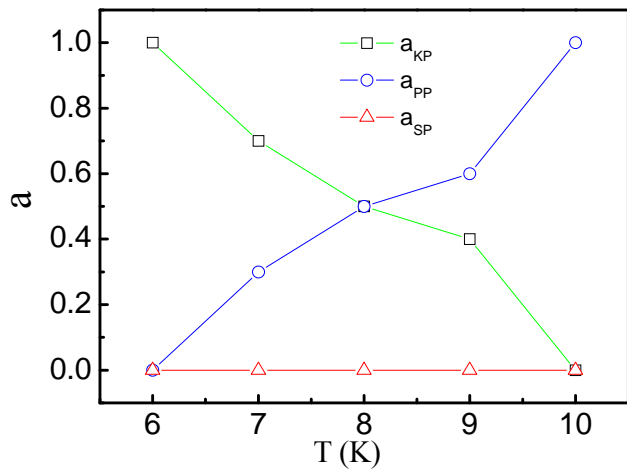


شکل ۲. چگالی نیروی میخکوبی برحسب میدان مغناطیسی در دماهای مختلف. بیشینه با افزایش دما به سمت میدانهای کمتر حرکت می کند.

در میخکوبی هستند و میخکوبی سطحی نقشی ندارد. سازوکار های میخکوبی تابع دما هستند طوری که در دماهای پایین سازوکار میخکوبی Δk غالب بوده و با افزایش دما سهم آن کاهش می یابد و سهم خود را به مکانیزم میخکوبی نقطه ای می دهد.



شکل ۳. چگالی نیروی میخکوبی نرمالیزه شده بر حسب میدان مغناطیسی کاهش یافته در دماهای ۲-۱۰ کلوین.



شکل ۴. میزان سهم مسازوکارهای میخکوبی Δk ، نقطه ای عادی و سطحی بر حسب دما.

نتیجه گیری:

نتایج نشان می دهد که در ابرسانای $Fe_{1.06}Te_{0.6}Se_{0.4}$ ، آهن اضافی منجر به افزایش چگالی جریان میشود که علت این افزایش آن است که آهن اضافی سبب افزایش مراکز میخکوبی در نمونه

شکل ۳ وابستگی نیروی میخکوبی نرمالیزه شده گرده شار به نسبت دما و میدان مغناطیسی نشان می دهد. در اینجا مقدار $H_{max}h=H/H_{max}$ مقدار میدان مغناطیسی مربوط به بیشترین مقدار F_p است) میدان کاهش یافته است. به منظور مشخص کردن نوع سازوکار میخکوبی در این نمونه برازش داده های مربوط به $f(h)$ توسط سه رابطه ی زیر صورت می گیرد [۱۷]:

$$(1) f_p = 3h(1-2/3h) \quad \Delta k \text{ میخکوبی}$$

$$(2) f_p = 9/4h(1-h/3) \quad \text{سازوکار میخکوبی}$$

$$(3) f_p = 25/16h^{1/2}(1h/5)^2 \quad \text{سازوکار میخکوبی سطحی}$$

منحنی های توپر در شکل ۳ برازش معادلات (۱) تا (۳) را به داده های تجربی نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود هیچکدام این معادلات به تنهایی نمی توانند به داده های تجربی برازش شوند. اما نتایج نشان میدهند که منحنی های مربوط به داده های آزمایشگاهی نزدیک به منحنی های مربوط به میخکوبی های Δk و نقطه ای عادی قرار میگیرند بنابراین می توان حدس زد که میخکوبی سطحی چندان سهمی در میخکوبی گردشاره ها ندارد. برای بدست آوردن نوع میخکوبی، از ترکیب سه رابطه ی فوق به صورت زیر استفاده شد [۱۸]:

$$f_p = a_p f_{pp} + a_s f_{sp} + a_k f_{kp} \quad (4)$$

در اینجا a_k و a_p ، a_s پارامترهای برازش هستند که به ترتیب سهم مربوط به سازوکار میخکوبی نقطه ای عادی (NPP)، میخکوبی سطحی (SP) و میخکوبی Δk (KP) را نشان می دهند به طوری که:

$$a_p + a_s + a_k = 1 \quad (5)$$

. معادله ی (۴) به داده های آزمایشگاهی برازش گردید و سهم سازوکار میخکوبی تعیین گردید. نتایج حاصل از میزان سهم مربوط به هر کدام از سازوکارها (a_i) بر حسب دما در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می شود سازوکار های میخکوبی Δk و نقطه ای عادی سازوکارهای غالب

[9] I. I. Mazin & M. D. Johannes; " A key role for unusual spin dynamics in ferropnictides"; *Nat. Phys.* **5** (2009) 14.

[10] T. M. McQueen, Q. Huang, V. Ksenofontov, C. Felser, Q. Xu, H. Zandbergen, Y. S. Hor, J. Allred, A. J. Williams, D. Qu, J. Checkelsky, N. P. Ong, and R. J. Cava; " Extreme sensitivity of superconductivity to stoichiometry in $\text{Fe}_{1+\delta}\text{Se}$ "; *Phys. Rev. B* **79** (2009) 014522.

[11] M. H. Fang, H. M. Fam, B. Qian, T.J. Liu, E.K. Vehstedt, Y. Liu, L. Spinu, Z. Q. Mao; "Superconductivity close to magnetic instability in $\text{Fe}(\text{Se}_{1-x}\text{Te}_x)_{0.82}$ "; *Phys. Rev. B* **78** (2008) 224503.

[12] A. Subedi, L. Zhang, D. J. Singh, and M. H. Du; "Density functional study of FeS, FeSe, and FeTe: Electronic structure, magnetism, phonons, and superconductivity"; *Phys. Rev. B* **78** (2008) 134514.

[13] Y. Liu, C.T. Lin; "A comparative study of $\text{Fe}_{1+\delta}\text{Te}_{1-x}\text{Se}_x$ single crystals grown by Bridgman and self-flux techniques"; *J. Supercond. Nov. Magn.* **24** (2011) 183.

[14] C.S. Yadav and P. L. Paulose; "Upper critical field, lower critical field and critical current density of $\text{FeTe}_{0.60}\text{Se}_{0.40}$ single crystals"; *New J. of Phys.* **11** (2009) 103046.

[15] M. Shahbazi, X. L. Wang, S. X. Dou, H. Fang, and C. T. Lin; "The flux pinning mechanism, and electrical and magnetic anisotropy in $\text{Fe}_{1.04}\text{Te}_{0.6}\text{Se}_{0.4}$ superconducting single crystal"; *J. Appl. Phys.* **113** (2013) 17115.

[16] T. J. Liu, X. Ke, B. Qian, J. Hu, D. Fobes, E. K. Vehstedt, H. Pham, J. H. Yang, M. H. Fang, L. Spinu, P. Schiffer, Y. Liu, and Z. Q. Mao; "Charge-carrier localization induced by excess Fe in the superconductor $\text{Fe}_{1+y}\text{Te}_{1-x}\text{Se}_x$ "; *Phys. Rev. B* **80** (2009) 174509.

[17] T. Higuchi, S. I. Yoo, and M. Murakami; "Comparative study of critical current densities and flux pinning among a flux-grown $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ single crystal, melt-textured Nd-Ba-Cu-O , and Y-Ba-Cu-O bulks"; *Phys. Rev. B* **59** (1999) 1514.

[18] S. R. Ghorbani, M. Hosseinzadeh, and X. L. Wang; "Comparison of flux pinning in Si- and SiCl_4 -doped MgB_2 superconductors: evidence for coexistence of different pinning mechanisms"; *Supercond. Sci. Technol.* **28** (2015) 125006.

میشود. نتایج به دست آمده از بررسی مسازوکار میخکوبی در این ابررسانا نشان داد که نوع میخکوبی غالب به دما بستگی دارد به طوری که سهم مسازوکار Δk با افزایش دما افزایش می یابد در حالی که سهم مربوط مسازوکار میخکوبی نقطه ای عادی افزایش میابد.

سپاسگزاری:

از آقای پروفیسور ونگ و پروفیسور دو برای همکاری و اجازتی استفاده از تجهیزات دانشگاه ولونگانگ استرالیا جهت اندازه گیری حلقه های پسماند صمیمانه تشکر می کنیم.

مراجع:

[1] Y. Kamihara, H. Hiramatsu, M. Hirano, R. Kawamura, H. Yanagi, T. Kamiya, and H. Hosono; " Iron-based layered superconductor"; *J. Am. Chem. Soc.* **128** (2006) 10012.

[2] F. C. Hsu, J. Y. Luo, K. W. Yeh, T. K. Chen, T. W. Huang, P. M. Wu, Y. C. Lee, Y. L. Huang, Y. Y. Chu, D. C. Yan, and M. K. Wu; " Superconductivity in the PbO-type structure $\alpha\text{-FeSe}$ "; *J. Am. Chem. Soc.* **130** (2008) 3296.

[3] X. H. Chen, T. Wu, G. Wu, R. H. Liu, H. Chen & D. F. Fang; " Superconductivity at 43 K in $\text{SmFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ "; *Nat.* **453** (2008) 761.

[4] G. F. Chen, Z. Li, D. Wu, G. Li, W. Z. Hu, J. Dong, P. Zheng, J. L. Luo, and N. L. Wang; " Superconductivity at 41 K and its competition with spin-density-wave instability in layered $\text{CeO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ "; *Phys. Rev. Lett.* **100** (2008) 247002.

[5] Z. A. Ren, G. C. Che, X. L. Dong, J. Yang, W. Lu, W. Yi, X. L. Shen, Z. C. Li, L. L. Sun, F. Zhou; " Superconductivity and phase diagram in iron-based arsenic-oxides $\text{ReFeAsO}_{1-\delta}$ (Re= rare-earth metal) without fluorine doping"; *Europhys. Lett.* **83** (2008) 17002.

[6] K. W. Yeh, T. W. Huang, Y. L. Huang, T. K. Chen, F. C. Hsu, P. M. Wu, Y. C. Lee, Y. Y. Chu, C. L. Chen, J. Y. Luo; " Tellurium substitution effect on superconductivity of the α -phase iron selenide"; *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **105** (2008) 14262.

[7] M. H. Fang, H. M. Pham, B. Qian, T. J. Liu, E. K. Vehstedt, Y. Liu, L. Spinu, and Z. Q. Mao; " Superconductivity close to magnetic instability in $\text{Fe}(\text{Se}_{1-x}\text{Te}_x)_{0.82}$ "; *Phys. Rev. B* **78** (2008) 224503.

[8] C. S. Yadav and P. L. Paulose ; " Upper critical field, lower critical field and critical current density of $\text{FeTe}_{0.60}\text{Se}_{0.4}$ single crystals"; *Phys. Rev. B* **79**(2009) 94521.