

MgB

8000°C	J_c	10	MgB_2	B_{sb}	$B_{sb}(T)$
U_o	δl				
					MgB

شار مغناطیسی و میدان مغناطیسی بحرانی بالای H_{c2} . در ابرسانای نوع II در حالت مخلوط، میدان به شکل رشته‌های نازک (گردشاره‌های مغناطیسی) به داخل ابرسانا نفوذ می‌کند. با عبور جریان از درون ابرسانا، گردشاره‌ها شروع به حرکت می‌کنند و باعث کاهش خواص ابرساناها می‌شوند. لذا بایستی به نحوی بتوان از حرکت گردشاره‌ها جلوگیری نمود. یکی از روش‌های میخکوبش شار استفاده از ناخالصی به عنوان فاز ثانویه است. وقتی که اندازه ناخالصی‌ها قابل مقایسه با طول هم‌دوسی باشند می‌توانند به عنوان مراکز میخکوبش عمل کنند و مانع از حرکت گردشاره‌ها شوند. دو سازوکار غالب در ابرساناهای نوع II K بزرگ، سازوکار میخکوبش δT_c و سازوکار میخکوبش δl هستند که اولی ناشی از تغییر فضایی پارامتر گینزبرگ به خاطر اختلالات دمای گذار بحرانی است و دیگری ناشی از پراکندگی مسیر آزاد میانگین الکترون است.

MgB_2 که برای اولین بار در سال ۲۰۰۱ خاصیت ابرسانایی آن توسط ناگاماتسوی ژاپنی کشف شد [۱]، به دلیل دمای بحرانی بالا (۳۹ کلوین)، هزینه پایین و ترکیب شیمیایی ساده-اش پتانسیل بالایی برای کاربرد در فناوری دارد [۲]. با این حال پایین بودن میدان بحرانی بالا، H_{c2} ، و چگالی جریان بحرانی، J_c ، MgB_2 خالص باعث محدودیت‌هایی در استفاده از آن شده است. در سال‌های اخیر مطالعات مختلف نشان داده است که می‌توان خاصیت ابرسانایی MgB_2 را از طریق اضافه کردن ناخالصی‌های مختلف کربنی نظیر کربن خالص [۳]، نانولوله‌های کربنی [۴] و روغن سیلیکون [۵] بهبود بخشید. J_c در این ترکیب تحت تأثیر عوامل مختلفی است مانند کیفیت و اندازه ذرات پودر، دما و زمان کلوخه‌سازی است. اگر چه برای افزایش J_c لازم است دو عامل اصلی کنترل شود: میخکوبش

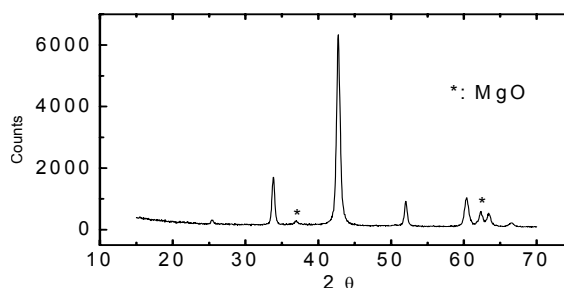
فعال‌سازی به‌طور حرارتی به صورت تابعی از میدان مغناطیسی برای MgB_2 آلاییده به مالیک اسید مطالعه شده است.

قرص MgB_2 به روش *in-situ* با افزایش ۱۰ درصدی مالیک اسید، $C_6H_6O_5$ ، ساخته شده می‌شود. ابتدا بورن و تولوئن و مالیک اسید با هم مخلوط و در دمای $210^\circ C$ کلوخه‌سازی شدند تا مالیک اسید تجزیه شود. استفاده از تولوئن برای همگن کردن نمونه ضروری است. پودر به دست آمده خشک و با منیزیم مخلوط و به صورت یک قرص فشرده و در دماهای $800^\circ C$ کلوخه‌سازی شدند. برای دانستن جزئیات بیشتر ساخت نمونه به مرجع [۹] رجوع شود. جهت شناسایی فازهای ناخالصی پراش اشعه X انجام گرفت. الگوی پراش اشعه X در شکل ۱ نشان داده شده است همان‌طور که از روی الگوی پراش اشعه X مشاهده می‌شود ماده غالباً دارای فاز MgB_2 می‌باشد اما مقداری ناخالصی MgO نیز مشاهده می‌شود که به صورت یک لایه عایق در بین دانه‌های MgB_2 نشسته و باعث اندکی کاهش J_c می‌شود.

اندازه‌گیری‌های مغناطیسی و تراپردی با استفاده از سیستم اندازه‌گیری خواص فیزیکی، PPMS، انجام گرفت. حلقه‌های پسماند مغناطیسی در یک محدوده دمایی ۵ K-۳۲ و ۲۰-۳۲ مغناطیسی T-۸/۷-۰ برای این نمونه انجام شد.

نتایج اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی به صورت تابعی از دما در حضور میدان‌های مغناطیسی T-۸/۷-۰ برای نمونه MgB_2 آلاییده با ۱۰ درصد وزنی مالیک اسید در دمای کلوخه‌سازی $800^\circ C$ در شکل الحاقی ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود با افزایش میدان مغناطیسی T_c کاهش می‌یابد.

پهن‌شدگی ناحیه گذار ابررسانایی در نمودار ρ -T به خوبی اثر شارش شار مغناطیسی حمل شده به‌طور حرارتی را نشان می‌دهد. براساس اتلاف انرژی ناشی از حرکت گردش‌ها می‌توان به خوبی پهن‌شدگی ناحیه گذار در مقاومت الکتریکی



شکل ۱. الگوی پراش اشعه X برای ابررسانای MgB_2 آلایش یافته با ۱۰ درصد مالیک اسید برای دماهای کلوخه‌سازی $800^\circ C$.

هردوی این سازوکارها به وسیله ذرات غیر ابررسانشی واقع در میان دانه‌های ماده در ابررسانا ایجاد می‌شوند [۶].

از روش‌های تعیین سازوکار میخکوبش، بررسی وابستگی دمایی میدان متقاطع B_{sb} است. در این مقاله سازوکار میخکوبش گردش‌اره‌ای در چارچوب نظریه جمعی بالاتر [۷] و انرژی فعال‌سازی برای یک نمونه MgB_2 آلاییده به ۱۰ درصد وزنی مالیک اسید مورد بحث قرار گرفته است.

در چارچوب نظریه جمعی که از سوی بالاتر، چگالی جریان بحرانی در میدان‌های مغناطیسی پایین‌تر از میدان متقاطع ($H < H_{sb}$) به صورت زیر می‌باشد:

$$H_{sb} \propto J_{sv} H_c^2 \quad (1)$$

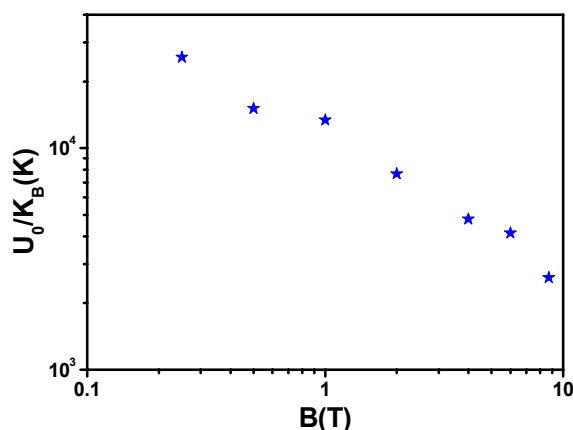
که در آن J_{sv} چگالی جریان بحرانی در ناحیه میخکوبش تک شماره‌ای است. در میدان‌های بالاتر برای $H > H_{sb}$ ، $J_c(H)$ به صورت نمایی کاهش می‌یابد:

$$J_c(H) = J_c(0) \exp[-(H/H_0)^{3/2}] \quad (2)$$

که در آن H_0 یک پارامتر بهنجارش از مرتبه B_{sb} است و برای $H > H_{sb}$ چگالی جریان بحرانی به صورتی توانی با میدان مغناطیسی به فرم $J_c(H) \propto H^{-\beta}$ کاهش می‌یابد. گرایسن سازوکارهای میخکوبش δI و δT_c را که ناشی از وابستگی‌های متفاوت دمایی J_{sv} است، در ناحیه میخکوبش تک گردش‌اره‌ای از روی میدان متقاطع به صورت زیر تعیین کرد:

$$B_{sb}(T) = B_{sb}(0) (1 - t^2 / 1 + t^2)^{\gamma} \quad (3)$$

که در آن برای سازوکار δT_c ، γ مساوی با ۰/۶۷ و برای سازوکار میخکوبش δI برابر با ۲ است و $t = T/T_c$ دمای کاهش یافته می‌باشد. در این مقاله سازوکار میخکوبی و تغییرات انرژی



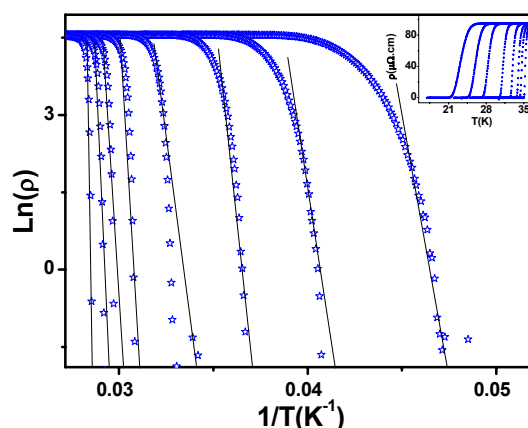
شکل ۳. وابستگی انرژی فعال سازی U_0 به میدان مغناطیسی برای ابررسانای MgB₂ آلاییده با ۱۰ درصد وزنی مالیک اسید برای دمای کلوخه سازی ۸۰°C.

میدان مغناطیسی در دمای کلوخه سازی ۸۰°C نشان داده شده است. همان طور که از روی شکل ۳ مشاهده می شود U_0 تقریباً به صورت خطی در کل محدوده میدان مغناطیسی کاهش می یابد. چگالی جریان بحرانی با استفاده از تقریب بین، بر اساس رابطه زیر تعیین شد:

$$J_c = 20 \Delta M / Va(1 - a/3b) \quad (5)$$

که در آن a و b پهنا و درازای نمونه در داخل میدان خارجی، V حجم نمونه و ΔM ارتفاع حلقه پسماند است.

شکل ۴ چگالی جریان بحرانی را به صورت تابعی از میدان مغناطیسی و دما نشان می دهد. با افزایش دمای واکنش J_c کاهش یافته است، در میدان های مغناطیسی کوچک و دماهای پایین منحنی تقریباً مسطح بوده که نشان از وابستگی ضعیف میدانی چگالی جریان بحرانی دارد. اما بعد از یک میدان متقاطع، B_{sb} ، با افزایش میدان مغناطیسی، J_c به سرعت کاهش می یابد همان طور که شکل ۴ نشان می دهد چگالی جریان بحرانی J_c در دمای ۲۰K و میدان ۲ T برای این نمونه بالای 1×10^4 A/cm² است که تقریباً یک مرتبه بزرگی بیشتر از چگالی جریان بحرانی برای MgB₂ ی خالص است [۱۲]. دلیل این افزایش می تواند میخکوبش شار ناشی از جانمایی کربن در مکان بورن باشد. برای تعیین دقیق میدان متقاطع B_{sb} می توان معادله (۲) را به صورت $-\log[j_c(B)/j_c(0)]$ بر حسب $B(T)$ در یک نمودار دوبل



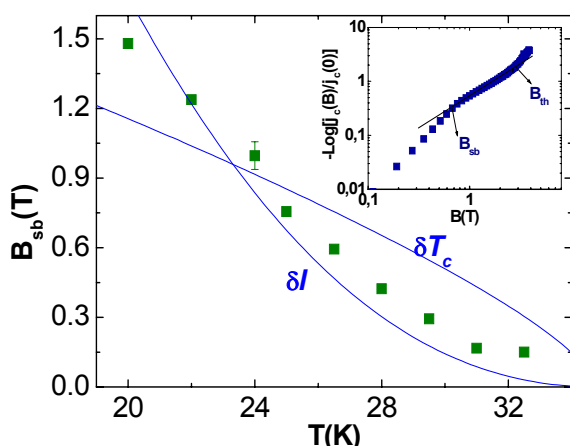
شکل ۲. رسم آربینوسی مقاومت الکتریکی برای ابررسانای MgB₂ آلاییده با ۱۰ درصد وزنی مالیک اسید در دماهای کلوخه سازی ۸۰°C (شکل الحاقی: وابستگی مقاومت الکتریکی به دما در حضور میدان های مغناطیسی مختلف را نشان می دهد).

به خاطر حضور میدان مغناطیسی را شرح داد [۱۰]. معمولاً پهن شدگی مقاومت الکتریکی ناحیه گذار در حضور میدان مغناطیسی یعنی وقتی که $\rho(T) < 1.1\rho_n$ (که ρ_n مقاومت حالت نرمال بالای گذار است)، برای ابررساناهای لایه ای توسط پراکنندگی انرژی ناشی از حرکت گردشاره ها توصیف می شود [۱۱]. در این ناحیه مقاومت الکتریکی ناشی از خزش گردشاره ها است. طوری که $\rho(T)$ توسط معادله زیر توصیف می شود:

$$\rho(T, B) = \rho_0 \exp(-U_0 / k_B T) \quad (4)$$

که در آن U_0 انرژی فعال سازی است و می توان آن را از روی شیب خطی نمودار آربینوسی (بر طبق معادله ۴) تعیین کرد. از آنجایی که در معادله (۴) U_0 مستقل از دما در نظر گرفته شده است، مقدار U_0 را باید در محدوده دمایی زیر T_c تعیین کرد. در گذارهای پهن انرژی فعال سازی، $U_0(B)$ ، معمولاً مستقل از دما است و می توان آن را از روی شیب بخش خطی منحنی $\ln \rho$ بر حسب $1/T$ به دست آورد. در شکل ۲ وابستگی $\ln \rho$ بر حسب $1/T$ برای دمای کلوخه سازی ۸۰°C نشان داده شده است.

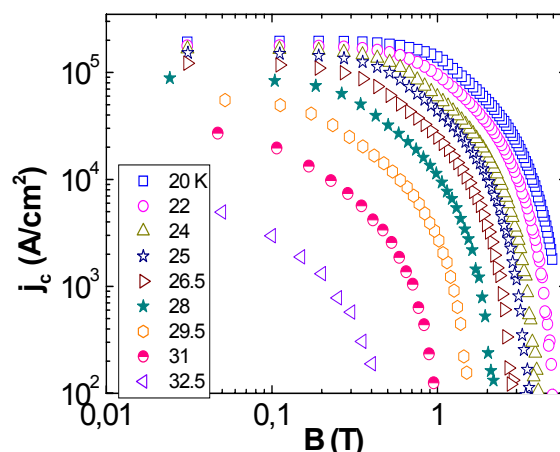
شکل ۲ رفتار فعال شدن شار به طور حرارتی را به وضوح نشان می دهد. در شکل ۳ نتایج حاصله از روی برازش داده های تجربی به معادله (۴) برای تعیین وابستگی انرژی فعال سازی به



شکل ۵. وابستگی دمایی میدان متقاطع B_{sb} ، منحنی‌های میخکوبش δl و δT_c مطابق با معادله (۳). (شکل الحاقی: منحنی - $\text{Log}[j_c(B)/j_c(0)]$ برحسب B در دمای ۲۵ K. دو میدان متقاطع را نشان می‌دهد). خطای نوعی ناشی از محاسبه B_{sb} با error bar نشان داده شده است.

نتایج تجربی نشان داد که افزودن ۱۰ درصد وزنی مالیک اسید به ابررسانای MgB_2 باعث افزایش چگالی جریان بحرانی J_c به اندازه تقریباً یک مرتبه بزرگی می‌گردد. لذا اضافه نمودن مالیک اسید باعث افزایش بیشتر میخکوبش شار مغناطیسی می‌شود. تحلیل نتایج تجربی در غالب نظریه جمعی پیشنهاد می‌نماید که سازوکار غالب در میخکوبش شار مغناطیسی، سازوکار δl است. U_0 تقریباً به صورت خطی در کل محدوده میدان مغناطیسی کاهش می‌یابد.

از آقایان پروفیسور شی و پروفیسور ونگ برای همکاری و اجازه استفاده از تجهیزات دانشگاه ولونگونگ استرالیا صمیمانه تشکر می‌کنیم.



شکل ۴. وابستگی دمایی و مغناطیسی چگالی جریان بحرانی برای نمونه MgB_2 آلاینده به مالیک اسید و کلوخه‌سازی شده در 800°C .

لگاریتمی رسم کرد. انحراف داده‌های تجربی در میدان‌های بالا و پایین از معادله (۲) با B_{th} و B_{sb} نمایش داده می‌شود (مطابق شکل الحاقی به شکل ۵) که در آن تقاطع دو ناحیه میخکوبش تک شاره‌ای و میخکوبش گردش‌شاره‌های دسته کوچک می‌باشد و انحراف در میدان‌های بالا (B_{th}) که به خط برگشت ناپذیری نزدیک است به ارتعاشات حرارتی وسیع نسبت داده می‌شود [۱۲].

شکل ۵ وابستگی دمایی میدان متقاطع B_{sb} را نشان می‌دهد. منحنی‌های خط‌چین برازش داده‌های تجربی B_{sb} را به معادله (۳) با مقادیر ν برابر با ۰/۶۷ و ۲ نشان می‌دهد. همان‌طور که از روی شکل ۵ مشاهده می‌شود انحنای منحنی تجربی رو به بالا است در حالی که انحنای منحنی δT_c به سمت پایین است لذا سازوکار میخکوبش δT_c با داده‌های تجربی در توافق نیست در حالی که انحنای داده‌های تجربی به خوبی با منحنی میخکوبش δl به خصوص در دماهای پایین هماهنگ می‌باشد. بنابراین سازوکار میخکوبش غالب در این ابررسانا، سازوکار میخکوبش δl ناشی از افت و خیزهای مسیر آزاد میانگین الکترون در بین نواحی ابررسانا است.

8. R Griessen, Wen Hai-hu, A J J van Dalen, B Dam, J Rector, H G Schnack, S Libbrecht, E Osquiguil, and Y Bruynseraede, *Phys. Rev. Lett.* **72** (1994) 1910.
9. M S A Hossain, J H Kim, X Xu, X L Wang, M Rindfleisch, M Tomic, M D Sumption, E W Collings, and S X Dou, *Supercond. Sci. Technol.* **20** (2007) L51–L54.
10. A K Pradhan, Z X Shi, M Tokunaga, T Tamegai, Y Takano, K Togano, H Kito, and H Ihara, *Phys. Rev. B* **64**.(2001) 212509.
11. T M Palstra, B Batlogg, R B van Dover, L F Schneemeyer, and J V Waszchak, *Phys. Rev. B* **41**.(1990) 6621.
12. X L Wang, Z X Cheng, and S X Dou, *Appl. Phys. Lett.* **90** (2007) 420501.
1. D Varshney, M Nagar, *Supercond. Sci. Technol.* **20** (2007) 930.
2. P de la Mora, M Castro, G Tavizon, *Solid State Chemistry* **196** (2002)173-175.
3. W K Yeoh, J H Kim, J Horvat, X Xu, M J Qin, S X Dou, C H Jiang, T Nakane, H Kumakura and P Munroe, *Supercond. Sci. Technol.* **19** (2006) 596.
4. J H Kim, W K Yeoh, M J Qin, X Xu, S X Dou, P Munroe, H Kumakura, T Nakane and C H Jiang, *Appl. Phys. Lett.* **89** (2006) 122510.
5. S R Ghorbani, X L Wang, S X Dou, Sung-IK Lee, and M S A Hossain, *Phys. Rev. B* **78** (2008) 184502.
6. M H Pu, Y Feng, P X Zhang, L Zhou, J X Wang, *Physica C* **386** (2003) 47.
7. G Blatter, M V Feigel'man, V B Geshkenbein, A I Larkin, V M Vinokur, *Rev. Mod. Phys.* **66** (1994) 1125.