

## پیشرفتهای اخیر در زمینه ساخت سیم و نوار ابررسانای $MgB_2$

سعید سلطانیان<sup>۱</sup>، محمد مهدی سلطانزاده<sup>۱</sup>، شائولین وانگ<sup>۲</sup>، جوزف هوروات<sup>۲</sup> و شی دو<sup>۲</sup>

۱. گروه فیزیک دانشگاه کردستان، سندج صندوق پستی ۴۱۶  
۲. انستیتو ابررسانایی و مواد الکترونیک دانشگاه ولونگونگ، استرالیا

### چکیده

مروری بر تحقیقات اخیر در زمینه ابررسانای  $MgB_2$  با تمرکز بر سیم و نوار این ابررسانا ارائه خواهد شد. سیم و نوار این ابررسانا تهیه و مشخصات آن اندازه گیری شده است. چگالی جریان بحرانی بالایی برای سیم و نوار ابررسانا با روکش فلزی به دست آمده است. مواد مختلفی به عنوان روکش مورد آزمایش قرار گرفته است. آزمایشها نشان می دهد که آهن بهترین گزینه برای روکش سیم و نوار این ابررسانا است. علاوه بر سیم و نوار، سیم پیچ این ابررسانا نیز ساخته و مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد که این ابررسانا دارای قابلیت کاربرد زیادی در صنعت است.

واژه های کلیدی: سیم و نوار  $MgB_2$ ، چگالی جریان بحرانی

### ۱. مقدمه

ابررسانایی با دمای گذار ۳۹ درجه کلوین اولین بار توسط پروفیسور اکیمیتسو در کنفرانسی که در ژانویه سال ۲۰۰۱ در سمپوزیوم اکسیدهای فلزات واسطه در سندای ژاپن برگزار شد مطرح و کوتاه زمانی پس از آن در مجله نیچر به چاپ رسید [۱]. بلافاصله بعد از این کشف بسیاری از گروههای تحقیقاتی در سراسر دنیا مطالعات وسیعی را بر روی این ابررسانا شروع کردند. یکی از دلایل آن دمای گذار بالایی این ابررسانا بود. دمای گذار این ابررسانا در حدود دو برابر بالاترین دمای گذار گزارش شده برای ترکیب دو عنصری ابررسانای مشابه یعنی  $Nb_3Ge$  با دمای گذار ۲۳ K بود. از طرف دیگر اگرچه دمای گذار این ابررسانا در مقابل ابررساناهای دمای بالا، خیلی پایین است، لیکن بسیاری از گروههای تحقیقاتی سریعاً شروع به تهیه لایه نازک، تک بلور، سیم و نوار این ابررسانا

نمودند. محرک اصلی آن نیز قیمت پایین و نیز سادگی ساخت این ابررسانا در مقایسه با ابررساناهای دمای بالا بود. لذا کوتاه زمانی پس از کشف این ابررسانا، سیم و نوار این ابررسانا در شکلهای و اندازههای مختلف ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. در این مقاله سعی شده تا بخشی از پیشرفتهایی که در زمینه ساخت سیم و نوار این ابررسانا انجام شده با تمرکز بر نتایج تحقیقات نویسندگان ارائه شود.

### ۲. روش ساخت و اندازه گیری نمونه ها

متداولترین روش (و نیز روشی که در تحقیقات ارائه شده در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته) برای تهیه سیم و نوار این ابررسانا، استفاده از تکنیک پودر در لوله (PIT) است. در این روش ابتدا یک طرف لوله فلزی به طول بیش از ده سانتیمتر، قطر داخلی چند میلیمتر و ضخامت دیواره حدود دو میلیمتر به

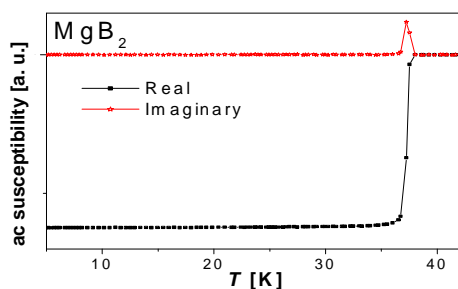
نمونه‌های ساخته شده در مقاله حاضر با استفاده از XRD، SEM، TEM، و نیز اندازه‌گیریهای مغناطیسی و رسانایی الکتریکی به صورت سیستماتیک مورد بررسی و اندازه‌گیری قرار گرفته‌اند. برای مطالعه ساختار بلوری و نیز اندازه‌گیریهای مغناطیسی مغزی سیم یا نوار با پولیش مکانیکی خارج و مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

### ۳. نتایج تجربی

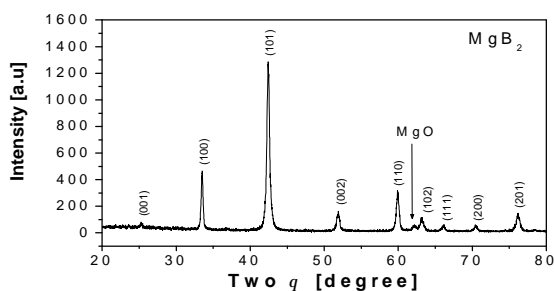
شکل ۱ طرح پراش X مغزی سیم ابرسانا با روکش آهن را نشان می‌دهد. ترکیب حاصل کاملاً ساختار  $MgB_2$  با ساختار بلوری شش وجهی را نشان می‌دهد. این ترکیب دارای خلوص بالای، با ناخالصی جزئی در حدود ۵٪ است. حضور این ناخالصی به دلیل فعالیت شدید Mg در دمای بالا است. شکل ۲ تصویر میکروسکوپ SEM از مقاطع طولی و عرضی این نوار ابرسانا را نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود ماده ابرسانا به صورت یکنواخت در بین روکش آهن قرار گرفته است. تصاویر با بزرگنمایی بالاتر نشان‌دهنده پیوستگی بسیار خوب ریز دانه‌ها و نیز پیوستگی ترکیب ابرسانا با روکش آهنی است. شکل ۳ نتیجه اندازه‌گیری پذیرفتاری ac برحسب دما برای یک سیم ابرسانا با روکش آهنی است. همان گونه که مشاهده می‌شود گذار به فاز ابررسانایی در دمای حدود ۳۸ K اتفاق افتاده است. شکل ۴ تغییرات چگالی جریان بحرانی بر حسب میدان مغناطیسی را در سیم ابرسانا با روکش آهن در دماهای مختلف نشان می‌دهد. این مقادیر با اندازه‌گیری حلقه هیستریزس در دماهای ۵ تا ۳۰ درجه کلوین و سپس برآورد چگالی جریان با استفاده از مدل بین [۳] به دست آمده‌اند. این سیم در میدانهای ضعیف قابلیت عبور جریان بحرانی بیش از  $1.05 \text{ A/cm}^2$  را داراست. نکته قابل توجه این است که این قابلیت حتی در دماهای ۳۰ درجه کلوین هم به وضوح وجود دارد.

وجود چنین قابلیت برای دماهای بالاتر از ۳۰ درجه کلوین با اندازه‌گیری مستقیم رسانایی سیم مورد تایید قرار گرفته است [۴]. علیرغم بالا بودن چگالی جریان در میدانهای ضعیف، مشاهده می‌شود که چگالی جریان با افزایش شدت میدان به

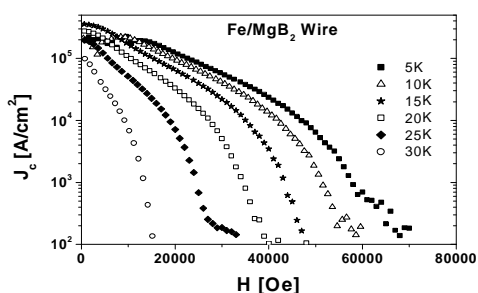
صورت مکانیکی بسته شده و لوله از پودر مورد نظر پر می‌شود. سپس طرف دیگر لوله بسته شده و لوله مورد عملیات نورد سرد قرار گرفته و سطح مقطع آن در هر مرحله از نورد حدود ده درصد کاهش می‌یابد. با تکرار این روش سیمی با قطر حدود یک میلیمتر و طول چند متر تهیه می‌شود. برای ساخت نوار، این سیم را از بین دو غلطک عبور می‌دهند. با تکرار این فرایند می‌توان نوارهایی با پهنای بیش از دو میلیمتر و ضخامت کسری از میلیمتر تهیه نمود. جنس لوله، میزان تراکم اولیه پودر، ضریب کاهش قطر در هر مرحله از نورد، سرعت عملیات، عملیات حرارتی، خلوص پودر اولیه، و ..... بر خواص فیزیکی سیم و نوار مؤثرند. برای ساخت سیم و نوار این ابرسانا می‌توان از مخلوط پودر Mg و B (in situ) و نیز از  $MgB_2$  آماده (ex situ) به عنوان مواد اولیه برای پر کردن لوله استفاده نمود که هر یک مزایا و معایبی دارند. در روش اول پودر Mg و B با یکدیگر مخلوط و در لوله فلزی ریخته و متراکم شده و سپس نورد می‌شود. بعد از تهیه سیم یا نوار خام با عملیات حرارتی مناسب، معمولاً در گاز آرگون، ترکیب نهایی به دست می‌آید. در این روش عملیات حرارتی از دمای ۵۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد و نیز زمان عملیات از کسری از دقیقه تا چندین ساعت گزارش شده است. نتایج نشان می‌دهند که پیوستگی ریزدانه‌های نمونه‌هایی که به این روش تهیه شده‌اند بسیار قوی است. لیکن پایین بودن چگالی جرمی ماده ابرسانا، به دلیل ترکیب شدن ذرات Mg و خالی ماندن جای آنها، از معایب این روش است. در روش دوم از پودر آماده  $MgB_2$  برای پر کردن لوله فلزی استفاده می‌شود. این پودر را می‌توان در آزمایشگاه با ترکیب Mg و B تهیه نمود. ضمناً این پودر توسط شرکت‌های مختلفی عرضه می‌شوند. گراسو و همکاران نشان داده‌اند که سیم‌های ساخته شده به این روش حتی قبل از عملیات حرارتی نیز خواص ابررسانایی از خود نشان می‌دهند [۲]. با این وجود آزمایشها نشان می‌دهند که برای دستیابی به خواص مطلوب در این نمونه‌ها، عملیات حرارتی لازم است. هرچند چگالی ماده ابرسانا در نمونه‌هایی که به این روش تهیه می‌شوند بالاتر است ولی پیوستگی بین ریز دانه‌های آن ضعیف است.



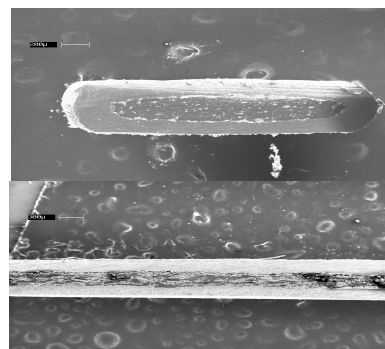
شکل ۳. پذیرفتاری ac بر حسب دما برای یک سیم ابررسانا با روکش آهن.



شکل ۱. نتیجه XRD برای مغزی سیم ابررسانای  $MgB_2$ .



شکل ۴. چگالی جریان بحرانی بر حسب دما را در سیم ابررسانا با روکش آهن.



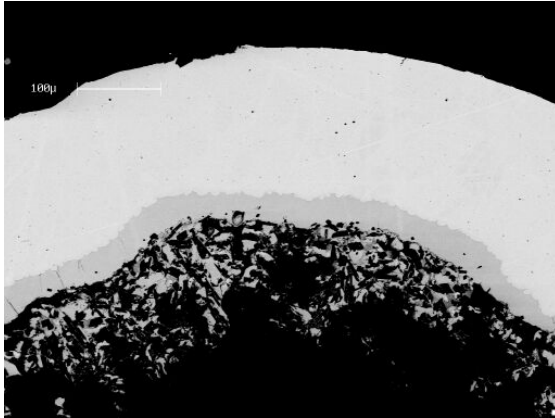
شکل ۲. تصویر میکروسکوپ SEM از مقطع طولی و عرضی نوار ابررسانای  $MgB_2$  با روکش آهن.

روکشهای مس و نقره است.

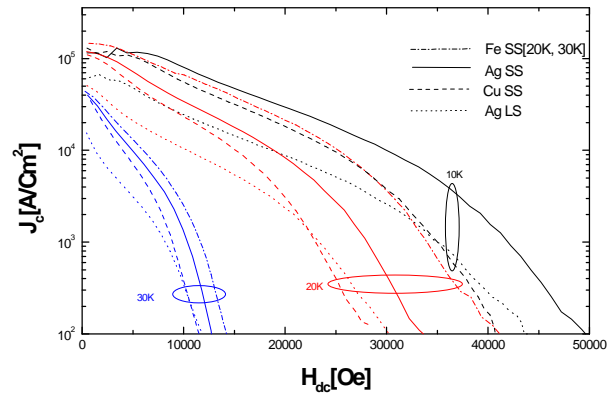
لذا استفاده از آهن به عنوان روکش سیم این ابررسانا ترجیح داده می شود. بررسی دقیقتر این سیمها نشان می دهد که دو عامل اصلی در کاهش خواص ابررسانایی در سیمهای با روکشهای مس و نقره نقش دارند. اولین عامل خواص مکانیکی این دو فلز است. نرمی مس و نقره باعث می شود که در حین نورد سرد و شکل دهی سیم اولیه، ذرات ریز این فلزات از جداره داخلی روکش فلزی جدا شده و با پودر داخل لوله ترکیب و به عنوان ناخالصی در مغزی سیم باقی بمانند. این ذرات در شکل ۶ به وضوح قابل مشاهده هستند. علاوه بر این، این فلزات در حین عملیات حرارتی کاملاً نرم می شوند. از آنجا که در حین عملیات حرارتی و تبدیل مواد اولیه به ترکیب نهایی حجم آن افزایش می یابد، نرمی فلز باعث کاهش فشار جانبی بر مغزی و نتیجتاً افزایش حفره ها در ماده ابررسانا می شود. این موضوع

سرعت کاهش می یابد. این موضوع که از ضعفهای اصلی این ابررسانا است به روشهای مختلفی در مطالعات بعدی بهبود یافته است [۵].

برای مطالعه اثر جنس روکش بر خواص سیم ابررسانا، سیمهایی با شرایط یکسان و جنس روکش مس، نقره و آهن تهیه و خواص آن بررسی شده اند. شکل ۵ تغییرات چگالی جریان بحرانی بر حسب میدان مغناطیسی را در دماهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه کلونین برای سیم ابررسانا با روکشهای مس، نقره و آهن نشان می دهد. چگالی جریان بحرانی در میدانهای ضعیف برای سیمهای ابررسانا با روکشهای مس و نقره به مقدار قابل توجهی کمتر از آن برای سیم ابررسانا با روکش آهن است. این کاهش در میدانهای قویتر بیش از پیش مشهود است. با افزایش میدان مغناطیسی افت چگالی جریان بحرانی در سیمهای ابررسانا با روکش آهن بسیار کمتر از آن در سیمهای ابررسانا با



شکل ۶. تصویر SEM از مقطع سیم ابررسانای  $MgB_2$  با روکش مس.



شکل ۵. چگالی جریان بحرانی برای سیم با روکشهای مس، نقره و آهن.

سیم پیچی می‌شود. در موارد استثنا سیم پیچهایی با قطر زیاد تهیه شدند. ولی آزمایش نشان داد که این سیم پیچها خواص ابررسانایی ضعیفی از خود نشان می‌دهند. علت آن نیز ایجاد ترکهای میکروسکوپی در جداره روکش ارزیابی شده است. برای ساخت این گونه سیم پیچها استفاده از روکش مسی بسیار مناسب است. با انجام عملیات حرارتی در شرایط کنترل شده، دمای پایین و مدت زمان کوتاه، سیم پیچهایی با بیش از ۱۰۰ دور و کیفیت بسیار خوب و در اندازه‌هایی با قطر حدود ۱۰ میلیمتر ساخته شده‌اند. اندازه‌گیریهای انجام شده نشان می‌دهد که کاهش چگالی جریان بحرانی، با افزایش طول سیم در این ابررسانا محسوس نیست. این نتیجه بسیار مهمی است که نشان می‌دهد این ابررسانا دارای قابلیت کاربرد زیادی در صنعت است [۷]. یکی از ضعفهای این ابررسانا، کاهش شدید چگالی جریان بحرانی با اعمال میدان مغناطیسی است.

#### ۴. نتیجه‌گیری

سیم و نوار ابررسانای  $MgB_2$  با استفاده از روش پودر در لوله تهیه و مشخصات آن اندازه‌گیری شده است. چگالی جریان بحرانی بیش از  $10^5 A/cm^2$  برای سیم و نوار ابررسانا با روکش فلزی به دست آمده است. مواد مختلفی به عنوان روکش مورد استفاده قرار گرفته است. آزمایشها نشان می‌دهد که آهن با

باعث کاهش چگالی جرمی ابررسانا می‌شود. عامل دوم واکنش پذیری شدید مس و نقره با منیزیم است. بررسیها نشان می‌دهد که این فلزات در حین عملیات حرارتی با منیزیم ترکیب شده و باعث ایجاد دو فاز اضافی  $Cu_7Mg$  در سیم با روکش مس و  $Ag_3Mg$  در سیم با روکش نقره می‌شوند.

وجود چنین لایه‌ای در جداره داخلی روکش مسی در شکل ۶ قابل مشاهده است. این فلزهای اضافی از طرفی باعث کاهش نسبت منیزیم در مغزی و در نتیجه کاهش مقدار ماده ابررسانا شده و از طرف دیگر ذرات فاز جدید ایجاد شده به عنوان ناخالصی باعث افت خواص این ابررسانا می‌شود. مطالعات بعدی نشان داده است که علاوه بر خواص مناسب شیمیایی و مکانیکی آهن، خاصیت فرومغناطیس آن نیز باعث افزایش چگالی جریان بحرانی در سیمهای ابررسانا با روکش آهن می‌شود [۶]. با این وجود تلاشهای زیادی برای استفاده از مس به عنوان روکش شده است. مس با توجه به رسانایی بالای الکتریکی و گرمایی انتخاب مناسبی برای بسیاری از کاربردها خصوصاً ساخت سیم پیچهای ابررسانا شده است. آزمایشها در گروه ما نشان می‌دهد که تهیه سیم پیچ مناسب از آهن بسیار دشوار است. روکش آهنی در حین نورد سرد بسیار سخت و شکننده شده و باعث شکسته شدن در حین

است. نتایج نشان می‌دهد که این ابرسانا دارای قابلیت کاربرد زیادی در صنعت است.

توجه به خواص مکانیکی و شیمیایی ویژه بهترین گزینه برای روکش سیم و نوار این ابرسانا است. علاوه بر سیم و نوار، سیم پیچ این ابرسانا نیز ساخته و مورد آزمایش قرار گرفته

## مراجع

1. J Nagamatsu, N Nakagawa and J Akimitsu, *Nature*, **410** (2001) 63-64.
2. G Grasso, A Malagoli, C Ferdeghini, V Braccini, A S Siri and M R Cimberle, *Applied Physics Letters*, **79** (2001) 230-232.
3. C P Bean, *Review Moern. Phycs*, **35** (1964) 31-39.
4. S Soltanian, X L Wang, I Kusevic, E Babic, A H Li, M J Qin, J Horvat, H K Liu, E W Collings, E Lee, M D Sumption and S X Dou, *Physica C*, **361**(2001) 84-90.
5. S Soltanian, X L Wang, S X Dou, M Tomsic, *Superconductor Science and Technology*, **18** (2005) 658-666.
6. J Horvat, X L Wang, S Soltanian and S X Dou, *Applied Physics Letters*, **80** (2002) 829-831.
7. S Soltanian, J Horvat, X L Wang, S X Dou, *Superconductor Science and Technology*, **16** (2003) L4-L6.