

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال ششم، شماره1، بهار و تابستان 1399، صفحه 113-97

سنتز بهینه ماده ابررسانای YBCO و تولید حسگرهای پیشرفته دما بالای SQUID با هدف

تشخیص عیوب زیرسطحی عمیق به کمک روش غیرمخرب جریان گردابی مهران رستمی، حمید خرسند^{*}

1-دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی. (دریافت مقاله: 1398/04/19 ؛ پذیرش مقاله: 1398/06/19)

چکیدہ

روش معمولی جریان گردابی برای بررسی غیرمخرب اتصالات جوشکاری دارای محدودیتهایی است که می تواند عیوب را تا عمق خاصی در زیر سطح نمونه مورد بررسی قرار دهد و برای تعیین عیوب عمیق مناسب نیست. این محدودیت با استفاده از سنسور ابررسانای SQUID می تواند رفع شود. ترکیب غیراستوکیومتری YBCO به دلیل دمای ابررسانایی و چگالی جریان بحرانی مطلوب در ساخت سنسورهای بسیار حساس SQUID کاربرد دارد. خواص و دمای ابررسانایی این ترکیب وابسته به تولید ترکیب خالص و همگن و با نسبت دقیق این ترکیب غیراستوکیومتری در فاز SQUID است. در این تحقیق به تولید این ماده ابررسانای دما بالا به کمک روش سل ژل خود احتراق از نیترات عناصر تشکیل دهنده ترکیب پرداخته شد و با بهره گیری از تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی نشر میدانی، وزنسنجی گرمایی، طیف سنجی پراش اشعه ایکس و پراش نیزژی اشعه ایکس، شرایط بهینه تکلیس فاز S1:12 تعیین شد. در این شرایط فاز ابررسانای S1:22 تولید و ناخالصی حذف شد و از طرف دیگر نیزز به عملیات حرارتی بعدی و همین طور فرایند هزینهبر آنیل حذف شد. در نهایت شرایط بهینه رسوبدادن این ترکیب با فرایند IP روی زیرلایه مناسب جهت تولید حسگر اسکوییدی بررسی شد و یک روش بهینه برای این رسوب دهی ارائه گردید. یک روش بهینه جهت الگودهی و تولید سنسورهای ابررسانای دما بالا از جنس YBCO برای بررسی غیرمخرب عیوب جوشکاری ارائه شده و همچنین روش بررسی غیرمخرب به تولید سنسورهای ابررسانای دما بالا از جنس YBCO برای بررسی غیرمخرب عیوب جوشکاری ارائه شده و همچنین روش بررسی غیرمخرب به کمک این سنسورها بررسی شد.

کلمات کلیدی: ابررسانای دما بالا، حسگر اسکوییدی، YBCO، ویفر زیرلایه SrTiO، سل ژل خود احتراق، بررسی غیرمخرب.

Optimal SQUID based non-destructive test for detecting sub-surface defects with the help of advanced SQUID superconducting sensors and an experimental approach for optimal production method of these sensors from the YBCO superconductor materials M. Rostami, H. Khorsand^{*}

Faculty of Materials Science and Technology, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran. (Received 10 July 2019; Accepted 9 September 2019)

* نويسنده مسئول، پست الكترونيكي: <u>hkhorsand@kntu.ac.ir</u>

Abstract

The conventional eddy current method for non-destructive inspection of welding joints has limitations that can examine defects to a certain depth below the surface of the sample and is not suitable for determining deep defects. This limitation can be overcome using the SQUID superconducting sensors. The nonstoichiometric composition of YBCO due to its superconducting temperature and desired critical current density is widely used including the use of highly sensitive SQUID sensors. The properties and temperature of the superconducting compound are related to producing pure and homogeneous with a precise ratio of this non-stoichiometric compound in phase Y:123. In this study, the production of this high-temperature superconductor was carried out using a sol gel self-combustion process with nitrate forming elements and then produced powder analyzed by TGA, XRD, scanning electron microscopy, and EDX method and optimum conditions for production of Y:123 superconducting phase Y:123 was produced and the impurities were removed and on the other hand, the need for further thermal treatment and the costly annealing process were removed. Finally, optimal condition for deposition of this compound on the substrate for producing the SQUID sensor were investigated and an optimal condition was presented to produce thin layer YBCO deposited by pulsed laser deposition method and patterned to produce SQUID High temperature Superconductor SQUID sensor. Finally the SQUID based NDT test for detecting sub-surfaces defects was investigated.

Keywords: High temperature superconductor, SQUID, YBCO, SrTiO₃ substrate, Sol-gel self-combustion, Non-destructive test.

جریان عبوری از آنها نیز دارای یک بیشینه مشخص برای هر ماده است. به عبارت دیگر مواد ابررساناها اگر دمایشان از یک دمای بحرانی(T_c) کمتر شود، مقاومت الکتریکی در آنها به صفر خواهد رسید [1].

در سال 1986، اولین مواد ابررسانای دمابالا کشف شدند که دارای دمای بحرانی بیش از 90 کلوین هستند. مواد ابرسانای دما بالا که عمدتا موادی با ترکیب کاپریت عناصر نادر خاکی هستند به دلیل دمای ابررسانایی بسیار بالاتر، که در حدود دمای نیتروژن مایع است، کاربریهای بسیار بیشتری دارند، زیرا در دماهایی ابررسانا می شوند که راحت تر قابل ایجاد هستند. شکل (1) دمای بحرانی ابررسانایی برخی از این ترکیبات را نشان می دهد [1-7].

ترکیب YBc2Cu₃O_{7-x} که به اختصار YBCO یا YB2₂Cu₃O_{7-x} می شود، به دلیل دمای ابررسانایی بالا که در حدود دمای تبخیر نیتروژن مایع است (شکل (1))، یکی از معروف ترین و پرکاربردترین مواد ابررسانا به خصوص در مواردی که به تولید فیلم نازک نیاز هست، مانند سنسورهای اسکوییدی است. در ابتدا آمادهسازی احجام ابررسانا با استفاده از روش تجاری سرامیک به وسیله تعداد زیادی از دانشمندان انجام شد. در این روشها از ترکیب پودر اکسید عناصر سازنده یعنی مس، باریم آزمون جریان گردابی معمولی یک آزمون غیرمخرب محبوب برای تشخیص عیوب زیرسطحی در موادی چون آلومینیوم، فولاد زنگنزن و موارد مشابه میباشد. در این روش شدت جریان گردابی تولیدشده در ماده با زمان به صورت تابعی از عمق عیوب زیرسطحی اندازهگیری میشود. بنابراین عمق نقایص قابل تشخیص محدود خواهد بود. در روش معمولی با کاهش فرکانس به منظور دستیابی به عیوب عمیق، شدت سیگنال کاهش مییابد. روش دیگر برای افزایش قدرت میگنال تقویت کویل با تعداد بیشتر سیمپیچی است. در این صورت نسبت سیگنال به نویز و وضوح سیستم کاهش خواهد یافت. در سیستمهای غیرمخرب بر مبنای حسگرهای اسکوییدی ابررسانای دمابالا، حسگر نسبت سیگنال به نویز بسیار بالاتری در فرکانسهای یایین نشان خواهد داد [1-6].

از آنجایی که حساسیت حسگرهای اسکوییدی از فرکانس عملکردی مستقل است، می توان عیوب عمیق تر را نیز شناسایی نمود. کویل پیکاپ نیز در این مورد از سیم پیچ ابررسانا ساخته می شوند که مستقیماً تغییرات شار را حس خواهند نمود [4].

می سوید که مستقیقا تغییرات شار را حس عوامیند کمود [۱]. مواد ابررسانا موادی هستند که در دمای بسیار پایین مقاومت الکتریکی و میدان مغناطیسی آنها از بین می رود، اما میزان شار

1- مقدمه

و ایتریم با نسبت مناسب و سپس فشردن و تف جوشی، پودر ابررسانا تولید می شود. تخلخل بالای ذاتی روش متالورژی پودر و همچنین همگنی ضعیف ناشی از عدم اختلاط بهینه پودرها در فاز جامد و وابستگی به اندازه ذرات پودر، علی رغم تولید ابررسانا در مدت زمان اندک، سبب شد تا دانشمندان به



روش سل ژل خود احتراق به دلیل توانایی در کنترل مناسب استوکیومتری و تولید ذرات همگن با اندازه زیرمیکرومتر مورد توجه بوده است. یکی از مهمترین گامها در این روش، بهینهسازی فرایند تکلیس و تولید ماده ابررسانا با خلوص مناسب است [9].

پس از تولید نمونه به روش سل ژل خود احتراق پودر تولیدشده باید تکلیس شود تا واکنشها کامل و مواد اضافه از ترکیب خارج شوند. در طی گرمادادن تعادلی ترکیب ۲:123 در حدود 1020 تا 1040 درجه سانتیگراد این ماده به صورت پریتکتیک به ترکیبات 2040 درجه سانتیگراد این ماده به صورت خواهد شد. فاز ارتورومبیک ۲₁Ba₂Cu₃O7 و دمای بالاتر از خواهد شد. فاز ارتورومبیک ۲₁Ba₂Cu₃O7 در دمای بالاتر از 650 درجه سانتیگراد ناپایدار خواهد بود. در 900 تا 500 درجه سانتیگراد اندیس محتوای اکسیژن ترکیب کمتر از 5/6 بوده و ساختار تتراگونال خواهد شد. اگر ماده از این حالت

کوئنچ شود، ابررسانا نخواهد بود. برای دستیابی به محتوای اکسیژن مطلوب (نزدیک به 7) ماده میبایست به مدت طولانی در اکسیژن در محدوده دمایی 400 تا 500 درجه سانتیگراد آنیل شود، تا محتوای اکسیژن افزایش یابد. همچنین آنیل در حدود 900 درجه سانتیگراد در حضور جریان اکسیژن در مدت زمان کوتاه و سپس سرد کردن آرام در اتمسفر اکسیژن مفید خواهد 920 درجه سانتیگراد در محدوده زمانی چند ساعت تا 930 ساعت انجام میشود. نرخ خنکشدن معمولا 1 تا 2 درجه سانتیگراد در دقیقه مخصوصاً در محدوده دمایی 400 تا 900 درجه سانتیگراد است. در دمای کمتر از 400 درجه سانتیگراد 900 درجه سانتیگراد مناسب است، اما در دماهای بالاتر بوته 900 درجه سانتیگراد مناسب است، اما در دماهای بالاتر بوته 900 درجه سانتیگراد مناسب است، اما در دماهای بالاتر بوته 900 درجه سانتیگراد مناسب است، اما در دماهای بالاتر بوته 900 درجه سانتیگراد مناسب است. اما در دماهای بالاتر بوته 900 درجه سانتیگراد مناسب است. اما در دماهای بالاتر بوته

پودر ابررسانای YBCO میتواند برای تولید فیلم نازک حسگر اسکوییدی به کار رود. اسکوییدها آشکارسازهای بسیار دقیق شار مغناطیسی هستند. این ابزارها کاربردهای فراوانی به عنوان سنسور در گستره عظیمی از آزمایشهای فیزیک، زمین شناسی، پزشکی، زیستشناسی و صنعت را دارا هستند. پیشرفت در صنعت و در فهم منشا نویز در اسکوییدهای با دمای انتقال پایین پیشرفت عظیمی را در تفکیک اندازه گیری مغناطیسی و الکتریکی پدید آورد [8-10].

فرض کنید یک ابررسانا بوسیله یک لایه عایق نازک از ابررسانای دیگر منفصل شده باشد؛ بنابراین یک اتصال -I-S₁-I میشود، S₂ که اتصال ضعیف و یا اتصال جوزفسون نامیده میشود، وجود خواهد داشت. جفتهای الکترونی میتوانند از درون عایق نازک از یک ابررسانا به ابررسانای دیگر نقب بزنند. یک حلقه ابررسانا که دارای یک و یا دو اتصال جوزفسون است میتواند برای اندازه گیری شار به کار رود. اسکوییدهای دمای بالا اولین مدارهای الکترونیکی ابررسانا بودند که از اتصال جوزفسون خنکشونده با نیتروژن مایع استفاده میکردند. دانه در فیلم YBCO شکل می گیرد. در نتیجه سازوکارهای رشد پیچیده، مرزهای دانه YBCO تنها از جهت تعریف شده با مرزدانه زیر لایه تعریف می شود. اتصالات دو کریستاله تاکنون به طور گسترده برای تولید اسکوییدهای HTS نویز پایین استفاده شدهاند. علت، سهولت تولید، و بهرهوری بالای این اتصال است [11].



شکل 2- شکل شماتیک اتصال جوزفسون دمای بالای استاندارد مرز دانهای دو کریستاله مورد استفاده در اسکوییدها [11].

از آنجایی که فیلم روی زیرلایه رشد می کند، انتخاب زیرلایه مناسب مانع از مرزدانه با زاویه بالا خواهد شد. زیرلایه مناسب باید از نظر شیمیایی آلوده کننده نباشد، پارامتر شبکه و ضریب انبساط حرارتی متناسب با فیلم داشته باشد، در تک کریستال بزرگ ارزان باشد، محتوا و کاهش دی الکتریک پایینی داشته باشد و همچنین به راحتی برش و پولیش شود. شکل (3) به صورت شماتیک برهمکنش بین فیلم و زیرلایه را نشان می دهد. برهمکنش فیلم و زیرلایه منجر به ایجاد ترکیب جدید با ساختاری متفاوت از زیرلایه منجر به ایجاد ترکیب جدید گرادیان نفوذ در فیلم و در زیرلایه بدون تشکیل ترکیب جدید می شود. مناطق جدید با دما و زمان شروع به گسترش می کنند. یکی از بهترین زیرلایهها SZV و همین طور به ترتیب BaF₂ یکی از بهترین زیرلایهها SZV و همین طور به ترتیب رای، هام می می می می در بین تمام زیرلایهها شامل Sa دا20 مای نفوذ یا واکنش در بین تمام زیرلایهها شامل Sa دا20 اسکویید لزوما یک ترانسدوسر شار به جریان است، بنابراین میتواند برای اندازهگیری شار مغناطیسی، تغییر شار، جریان یا ولتاژ به کار رود.

دو گونه اسکویید وجود دارد: 1- اسکویید dc شامل دو اتصال جوزفسون در حلقه ابررسانا، که با جریان مستقیم کار میکند و 2- اسکویید rf شامل یک اتصال جوزفسون در حلقه ابررسانا، که به یک مدار تانک (مدار تشدید یا رزونانس معادل با یک سیم پیچ و خازن در یک مدار سری) متصل است و با جریان rf

اولین اسکویید dc فیلم نازک از YBCO با اتصال مرز دانه ای شکل گرفته بین دانه های کاتوره ای در فیلم نازک ساخته شد. اکثر اسکوییدهایی که تاکنون ساخته شده اند، با کنترل دقیق تر اتصالات مرزدانه ای با یکی از این دو روش ایجاد شده اند. تکنیک اول شامل رسوب دادن فیلم YBCO روی زیرلایه چند کریستالی STiO₃، SrTiO₃ یا MgO که در آن یک ناهمسانگردی وجود دارد. فیلم رشد همبافته ای روی زیرلایه داشته و یک مرزدانه که متعاقبا به یک یا دو پل الگو داده می شود، با عرض چند میکرومتر، خواهد داشت. تکنیک دوم شامل رسوب دادن فیلم OYBCO روی زیر لایه لبه دار است. مرز دانه ها در بالا و پایین لبه ها شکل می گیرند [8].

روشهای گوناگونی برای ایجاد اتصال جوزفسون وجود دارد اما هر یک از این روشها با نویز و جریانهای ناخواسته که بر دقت نتایج حسگر تاثیرگذارند همراه است. همچنین تکرار تولید اتصال جوزفسون در هر یک از این روشها با مشکلاتی روبهرو است. مرسومترین روش تولید اتصال جوزفسون در حسگرهای اسکوییدی اتصال جوزفسون مرزدانهای دوکریستاله است.

مطابق شکل (2) اتصال مرزدانه دوکریستالی (GBJ) اساساً یک میکروپل الگو دادهشده در عرض مرزدانه زیرلایه دوکریستاله است. بر طبق رشد همبافته YBCO روی یک زیرلایه مچ شده (100) STO، محور a و d فیلم YBCO هم جهت محور a و d زیرلایه است. متعاقباً استفاده از زیرلایه دوکریستاله یک مرز

زیرلایههای مناسب برای رشد لایه نازک ابررسانا را معرفی مینماید [12 و 13].



برای رسوب لایه نازک جهت ایجاد زیرلایه از روشهای گوناگونی چون تبخیر با اشعه الکترونی، رسوبدهی پاششی، رسوبدهی لیزری پالسی (PLD) و رسوبدهی شیمیایی بخار (CVD) استفاده می شود [15 و 16].

روشهای پاششی برای پوشش دهی امکان پذیر خواهد بود که می تواند به پاشش اتمی و پاشش مگنترونی اشاره نمود. پاشش اتمی برای رسوب دادن فیلم نازک قابل استفاده است. پاشش به دلیل انرژی بالای اتمها امکان تولید فیلم با مورفولوژی و ریزساختار مناسب را خواهد داد که امکان تولید فیلم همبافته ابررسانا در دماهای بسیار پایین تر زیرلایه نسبت به سایر روش ها را خواهد داد. در بین سیستمهای پاشش متفاوت، پاشش مگنترونی مزایای بیشتری دارد. مانند این که لایه رسوب با فشار پایین پاشش و چگالی انرژی پایین در هدف قابل ایجاد است. در کنار این، گرم شدن و پاشش مجدد روی فیلم رسوب کرده نیز به وجود نخواهد آمد. شکل (4) پاشش

مگنترونی، که عموما استفاده می شود، را نشان می دهد. این سیستم اولین بار توسط محققین IBM ابداع شد [17]. در حال حاضر یک روش مناسب برای رسوب فیلم نازک ابررسانای YBCO با سرعت بسیار بالاتر از تکنیک پاشش، روش رسوب لیزری پالسی است. اولین کاربرد این روش در مواد ابررسانای دما بالا در سال 1987 ارائه شد [17]. شکل (5) این روش را به طور طرحواره ارائه می دهد.







شكل 5- دياگرام شماتيك رسوب ليزرى پالسي [18].

در مورد دستگاههای بررسی غیرمخرب با کمک حسگر اسکوییدی کویل پیکاپ نیز از سیمپیچ ابررسانا ساخته

جدول1- برخی زیرلایههای مناسب برای رسوب فیلم نازک فیلم ابررسانا [14]				
ثابت دىالكتريك	ضریب انبساط حرارتی (K ⁻¹)	ثابت لتيس (آنگستروم)	ساختار	مادہ
-	15x10⁻ ⁶	3/88 .3/86 .11/67	ارتورومبيک	Y-Ba-Cu-O
180	10x10 ⁻⁶	3/905	مكعبى	SrTiO ₃
7/8	10x10 ⁻⁶	5/16	مكعبى	Y-ZrO ₂
9/7	12×10^{-6}	4/21	مكعبى	MgO
12	3x10 ⁻⁶	5/43	مكعبى	Si
3/8	1x10 ⁻⁶	4/91 .5/394	هگزاگونال	SiO ₂
10/2	6x10 ⁻⁶	4/76 .12/9	هگزاگونال	Al_2O_3
15	8x10 ⁻⁶	12/383	مكعبى	Gd ₃ Ga ₅ O ₁₂
-	8x10 ⁻⁶	8/085	مكعبى	MgAl ₂ O ₄
27	-	5/52 .5/49 .7/77	ارتورومبيک	LaGaO ₃
15	10x10 ⁻⁶	5/357 .6/66	رمبوهدرال	LaAlO ₃
-	-	5/15 ،13/86	هگزاگونال	LiNbO ₃

10 میلیمتر با نقصهای مصنوعی مهندسی، همانطور که در شکل (7-الف) نشان داده شده است، را مورد بررسی قرار دادند. دو عیب مستطیلی با فاصله 150 میلیمتر در قطعه طراحی شده بود. یک نقص دارای طول 50 میلیمتر، عرض 1 میلیمتر و ارتفاع 1 میلیمتر است و نقص دیگر 50 میلیمتر، عرض 1 میلیمتر و ارتفاع 5/0 میلیمتر برای شبیهسازی خصوصیات نقص زیرسطحی است. این صفحه آلومینیومی با ترک در سطح پایین آن تحت پروب SQUID اسکن شده بود و تغییرات میدان مغناطیسی مرتبط با نقص با توجه به مختصات موقعیت ثبت شد. شکل (7-ب) انحنای مغناطیسی مربوط به این نقصها را با استفاده از SQUID نشان میدهد. پتانسیل سیستم برای تشخیص نقصهای زیر سطحی با استفاده از تحریک برای دشخیص نقصهای زیر سطحی با استفاده از مشاهده می شوند، که مستقیماً تغییرات شار را حس خواهند نمود. سیستمهای بررسی غیرمخرب اسکویید به وسیله یک پراب اسکویید که به کمک یک سیستم کنترل و جابجایی در محورهای XY کنترل می شود و یک آشکارساز سیگنال تولید می شوند. وجود عیوب و فازهای مغناطیسی سبب تغییر در شدت میدان خروجی می شود که با کمک حسگر بسیار دقیق اسکوییدی دریافت می کند و تغییرات آمپراژ در آشکارساز نمایش داده می شوند و شدت میدان خروجی عمق و محل نمایش داده می شوند و شدت میدان خروجی عمق و محل نشان خواهد داد. شکل (6) به طور طرحواره دستگاه بررسی غیر مخرب جریان گردابی به کمک حسگر اسکوییدی را نشان می دهد [4 و 6].

ناجندران و همکارانشان [6] در سال 2007 یک صفحه آلومینیومی با طول 300 میلیمتر، عرض 100 میلیمتر و ضخامت در مطالعات اخیر همچنین از روش بررسی غیرمخرب جریان گردایم، به کمک حسگر اسکوییدی، به بررسی حضور و میزان فازهای مغناطیسی در قطعات پرداخته شده است. به طور مثال آقای ریلیانتو و همکارانشان [6] در سال 2019 به بررسی غیرمخرب حضور فریت دلتا در درز جوش قطعات 316L در قطعات جوشکاریشده نیروگاهی پرداختند. خستگی یکی از مهمترین مشکلات در قطعات دمابالای نیروگاهی خصوصا در محل اتصال جوشکاری می باشد. در مورد آلیاژ 316L توجه بسیاری بر یدیده ترک خوردن گرم صورت می گیرد. اگرچه ساختار فریتی در دمای بالا به شدت نایایدار است و به کاربیدها و فازهای بین فلزی ترد تبدیل می شود، وجود مقادیر بهینه فریت دلتا در فلز جوش آستنیتی برای پیشگیری از ترک گرم مفید خواهد بود. با توجه به اینکه فریت فازی مغناطیسی است با کمک حسگرهای ابررسانای اسکوییدی می توان محتوای فریت فلز جوش را تخمین زد. با بررسی قطعه در حين عملكرد و تحت آسيب خستگي مي توان به بررسي كاهش میزان فاز فریت دلتا که به فازهای ترد تجزیه خواهد شد یرداخت و بنابراین معیاری از عمر قطعه نیز به دست آورد.





آقای ناجندران و همکارانشان [6] در سال 2007 یک صفحه آلومينيومي باطول 300 ميليمتر، عرض 100 ميليمتر وضخامت 10 میلیمتر با نقص های مصنوعی مهندسی، همان طور که در شکار (7-الف) نشان داده شده است، را مورد بررسی قرار دادند. دو عيب مستطيلي با فاصله 150 ميليمتر در قطعه طراحي شده بود. یک نقص دارای طول 50 میلیمتر، عرض 1 میلیمتر و ارتفاع 1 میلی متر است و نقص دیگر 50 میلی متر، عرض 1 میلیمتر و ارتفاع 0/5 میلیمتر برای شبیهسازی خصوصیات نقص زیرسطحی است. این صفحه آلومینیومی با ترک در سطح پایین آن تحت پروب SQUID اسکن شده بود و تغییرات ميدان مغناطيسي مرتبط با نقص با توجه به مختصات موقعيت ثبت شد. شکل (7-ب) انحنای مغناطیسی مربوط به این نقصها را با استفاده از SQUID نشان میدهد. پتانسیل سیستم برای تشخیص نقص های زیر سطحی با استفاده از تحریک جریان دایرهای پایین با استفاده از این دادهها قابل مشاهده است.

سیمپیچ تحریک برای ایجاد جریانهای گردابی در سیستمهای بر پایه SQUID از آنچه که در روشهای معمول بررسی مخرب با جریان گردابی استفاده میشود، متفاوت است. در روشهای معمولی، سیمپیچ تحریک کویل دایرهای شکل است و در برخی موارد از مجموعه کویلهای دیفرانسیلی نیز استفاده میشود. برای افزایش جریان گردابی در نمونه، میدان مغناطیسی متغیر با زمان مورد نیاز است. اگر از کویل تحریک مناطیسی متغیر با زمان مورد نیاز است. اگر از کویل تحریک مبتنی بر SQUID استفاده شود، میدان مغناطیسی اعمالی به الکتریکی خوانده شده ممکن است به سطح اشباع برسد. مواد ابررسانا دارای یک حد بحرانی برای شار میباشند که به آن Jc می گویند. در این شرایط تغییرات میدان مغناطیسی ناشی از

حضور عیوب، توسط SQUID قابل تشخیص نیست [2]. تغییرات در جریان القایی مرتبط با حضور یک عیب به عنوان تغییر سیگنال شار توسط دستگاه SQUID آشکار می شود. عموماً تحریک و القای مغناطیسی در قطعه در دمای اتاق صورت می پذیرد، درحالی که حسگر اسکوییدی برای عملکرد در حالت ابررسانایی در داخل یک پراب در دمای نیتروژن مایع قرار دارد. مجموعه پراب حسگر اسکوییدی برای عدم تداخل سایر میدانهای مغناطیسی با یک پوشش سربی محافظت می شود. تغییرات میدان مغناطیسی باعث ایجاد جریان در کویل آشکار می شود و این تغییرات به کمک یک اسیلوسکوپ حسگر یا نمونه را در جهت صفحه XX جابجا می کند. بنابراین با کمک یک سیستم کامپیوتری حضور نقص با مشخصات محل نقص قابل شناسایی خواهد بود [2 و4].

2- آزمایش و ساخت

این روش بر مبنای تولید محلول مناسبی از نیترات عناصر سازنده YBCO و ایجاد ژل خود احتراق است. مقادیر مناسبی از ترکیبات Y(NO₃)2، پودر Ba(NO₃)2 و پودر Cu(NO₃)2 و

اسید سیتریک انتخاب شد و محلول آبی هر ترکیب با آب مقطر ایجاد شد. در این صورت یونهای ⁻NO3 از ترکیب نیتراتهای فلزی خارج می شود و در ادامه اسید سیتریک که در محیطهای اسیدی با ظرفیت یک شرکت می کند، جایگزین آن خواهد شد. بالن حاوی محلول در یک حمام آبی با دمای 80 درجه سانتی گراد، بر روی یک همزن مغناطیسی قرار داده شد و بدین ترتیب مقدار آب محلول آبی رنگ با تبخیر کاهش یافت. پیوند یون ⁻H2Cit با فلز باریم بسیار ضعیف است. بنابراین مقدار قابل توجهی از یونهای باریم در محلول به صورت آزاد وجود داشته که با ادامه روند تهیه سل ژل و تبخیر آب، این یونها مجددا به نیترات باریم تبدیل شدند و سپس رسوب نمودند. در این حالت رنگ محلول به دلیل تشکیل رسوبات سفید رنگ نیترات باریم به سمت سبز متمایل شد.

برای جلوگیری از رسوب نیترات باریم پس از تبخیر آب و تشکیل ذرات سفید رنگ هیدروکسید آمونیم به میزان کافی افزوده شد تا در نهایت pH محلول به 7 برسد. در این حالت یونهای ⁻³Cit³ بسیار بیشتری تشکیل می شود که ترکیب قوی تری با یونهای باریم خواهند داشت.

در این حالت رسوب از بین رفت و محلول بنفش رنگ حاصل شد. در ادامه محلول حاصل در یک بشر در دمای 100 درجه سانتیگراد حرارت داده شد تا مقدار آب به کمک تبخیر کاهش یابد. با ادامه روند تبخیر آب ماده ژل مانند ایجاد خواهد شد. روند این تغییرات در شکل (8) نشان داده شده است.

مطابق شکل (8)، پس از تشکیل ژل به دلیل واکنش های بین اسید سیتریک و هیدروکسید آمونیوم کمکم حبابهای گازی در ژل پدیدار شد.

در این هنگام ژل در داخل یک بوته چینی ریخته شد و تا اتمام واکنش های خود احتراق در داخل کوره با دمای 250 درجه سانتیگراد قرار داده شد. در نتیجه پس از مدت زمان یک ساعت پودر خاکستری رنگی در داخل بوته برجای ماند که بیانگر انجام واکنش ها است.

پس از تولید پودر ابررسانا به کمک روش سل ژل خود احتراق ماده حاصل مورد وزن سنجی گرمایی قرار گرفت و با توجه به نتیجه آزمون فرایند تکلیس برای آن طراحی شد.

نمونه 1 با توجه به مطالعات صورت پذیرفته تا دمای 900 درجه سانتی گراد و نمونه 2 تا دمای 930 درجه سانتی گراد و نمونه سوم تا دمای 970 درجه سانتی گراد، هر سه با نرخ گرمادهی mc/min 3 در کوره گرمادهی شدند و سپس هر نمونه تا دمای 700 درجه سانتی گراد با نرخ min/2° 1 و سپس تا دمای 400 درجه سانتی گراد با نرخ min/2° 10 خنک شدند و سپس از کوره خارج و در هوای آزاد قرار گرفتند.

سه نمونه از پودر تولید شده در شرایط متفاوت مورد تکلیس قرار گرفت. مورفولوژی، اندازه دانه و ترکیب شیمیایی هر یک از سه نمونه سپس به وسیله تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی نشرمیدانی، آزمون پراش اشعه ایکس و آزمون طیفسنجی انرژی اشعه ایکس مورد بررسی قرار گرفتند. در پایان فرایند بهینه تکلیس جهت تولید تعیین شد و نمونه نهایی مجدداً مورد وزن سنجی حرارتی قرار گرفت.

در ادامه پودر تولیدشده با فرایند پرس و تفجوشی به صورت قرص 1 سانتیمتری فشرده و در دمای 930 درجه سانتی گراد تفجوشی شد. با استفاده از قرص حاصله به عنوان ماده هدف، توسط فرایند پوششدهی PLD بر روی ویفر زیرلایه STO پوشش به ضخامت 50 نانومتر ایجاد شد و لایه نازک به وسیله آزمون رسانایی چهارنقطهای در دمای پایین مورد بررسی قرار گرفت.

در پایان با کمک فرایند الگودهی با اشعه لیزر متمرکز الگوی نهایی مدار ابررسانای اسکوییدی بر روی ویفر دارای پوشش ایجاد شد.

3- نتايج و بحث

محدوده تعادلی دمایی پایداری YBCO در محدودهای کمتر از 1000 درجه سانتی گراد قرار دارد. در شرایط معمول عملیات تکلیس ممکن است گرمشدن به صورت غیرتعادلی سبب تشكيل تركيباتي چون فاز Y:211 شد. همچنين ساير تركيبات درصورت عدم رعایت زمان کافی در عملیات تکلیس همچنان پایدار خواهند ماند و از ترکیب خارج نخواهند شد. بنابراین دستيابي به شرايط بهينه تكليس جهت به دست آوردن بيشترين مقدار Y:123، با کمترین میزان ناخالصی و میزان مناسبتر اندیس اکسیژن با توجه به عدم پایداری ترکیب در بالای 900 درجه سانتیگراد و کاهش اندیس اکسیژن، ضروری به نظر مىرسد. از آنجاكه افزايش دما سبب تبديل شدن فاز Y:123 به فاز Y:211 می شود و همچنین دمای پایین تکلیس سبب کاهش اندیس اکسیژن در ترکیب غیراستوکیومتری YBCO و در نتیجه کاهش خواص و دمای ابررسانایی آن می گردد؛ تعیین دمای بهینه تکلیس اهمیت دوچندانی پیدا میکند.برای طراحی فرایند تكليس آزمون وزن سنجي گرمايي (TGA) از نمونه يودر اوليه تهیه شد. شکل (9) نمودار نتیجه آزمون وزنسنجی گرمایی نمونه اوليه را نشان مي دهد. همانطور كه از شكل (9) مشخص است یودر تولید شده تنها در حدود 840 درجه سانتی گراد دارای پیک است که مربوط به تکمیل واکنشهای فازهای اکسیدی و تبدیل آنها به فاز Y:123 هست. این پیک ناشی از تبدیل فازهای BaCO₃ و اکسید مس و ایتریم و تبدیل آن به فاز Y:123 مىباشد. افزايش جرم نمونه يس از 950 درجه سانتی گراد به دلیل ورود به محدوده نایایداری فاز Y:123 است و خبر از تجزیه این فاز و تبدیل شدن آن به فازهای با محتوای اكسيژن بالاتر مىدهد.



شكل 8- روند تغييرات سل ژل خود احتراق توليد ابررساناي دمابالا.



با توجه به نمودار TGA پودر تولیدی 3 فرایند تکلیس در محدوده دمایی بالاتر از پیک 844 درجه سانتی گراد طراحی شد. دمای تکلیس برای نمونهها به ترتیب 900، 930 و 970 درجه سانتی گراد بود. سه نمونه در دماهای متفاوت تکلیس شد و سپس به کمک الگوی پراش اشعه ایکس به بررسی نمونهها پرداخته شد.

شکل (10) تصویر الگوی پراش اشعه ایکس نمونه 1، که تا دمای 900 درجه سانتی گراد تکلیس شده است، را نشان میدهد. همانطور که از طیف اشعه ایکس مشخص است، علاوه بر وجود ترکیب Y:123، ترکیباتی چون OuO و BaCO₃ نیز در ترکیب موجود است. این امر بیانگر عدمانجام فرایند تکلیس به طور کامل هست و نیاز است که برای تکمیل فرایند تکلیس دمای بالاتری برای کوره انتخاب شود.

الکترونی نمونه شماره 1 تهیه شد. شکل (11) تصویر میکروسکوپی الکترونی نمونه شماره 1 و

شکل (12) طیفسنجی انرژی پرتو ایکس را نشان میدهد. همانطور که از شکل (12) مشخص است، برخی ذرات غنی از مس که در تصویر میکروسکوپ الکترونی با رنگ روشنتر ظاهر میشود در میان دانههای پودر قابل مشاهده است. همین طور با توجه به طیفسنجی انرژی اشعه ایکس این نمونه در شکل (11) مناطق با غلظت بالاتر اکسیژن که در نتیجه حضور فازهای با اندیس استوکیومتری اکسیژن بالاتر است و ناشی از عدم تکمیل واکنش تکلیس هست، مشاهده می شود.

شکل (13) الگوی اشعه ایکس نمونه 2 را نشان میدهد. در این نمونه دمای تکلیس تا 930 درجه سانتی گراد افزایش یافت. مطابق الگو می توان مشاهده کرد که ترکیبات اضافی قبلی از ترکیب، در اثر تکلیس خارج شده است و طیف دارای پیکهای مرتبط با فاز 123:۲ است. همچنین به شدت بسیار کمی پیکهای مرتبط با ترکیب ۲:211 شروع به نمایش و ایجاد نمودهاند.





این مسئله بیانگر شروع ناپایداری ترکیب و تبدیل فازی از Y:123 به Y:211 است. مقدار اندک فاز Y:211 در تولید لایه نازک حسگر ابررسانا مناسب خواهد بود. این نقاط محل قفل شدن شار الکترومغناطیس عبوری در فیلم نازک خواهند بود. همین طور در تولید کپه ابررسانا این نقاط قفل شدن شار به افزایش اثر مایسنر و قفل شدن شار عبوری در نقاط با عیوب جای خالی اکسیژن در صفحات کاپریت کمک خواهد نمود.

برای بررسی بیشتر نمونه تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی نشر میدانی و طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس نمونه شماره 2 صورت پذیرفت.

شکل (14) تصویر میکروسکویی الکترونی نشر میدانی نمونه شماره 2 و شکل (15) طيفسنجي انرژي پرتو ايکس اين نمونه را نشان میدهد. مطابق با شکل (14)، نانوذرات با مورفولوژی و ابعاد مشابه از نانوذرات فاز Y:123 به عنوان محصول ایجاد شدهاند و همچنین، ساختار طیفسنجی انرژی پرتو ایکس نمونه بیانگر نسبت اتمی استوکیومتری فاز Y:123 است. مطابق الگوی طیفسنجی انرژی اشعه ایکس نشانداده شده در شکل (15)، پس از تکلیس پودر اولیه در دمای 930 درجه سانتی گراد نسبت اتمی 7/5 درصد برای ايتريم، 14/7 درصد براى باريم، 22 درصد براى مس، و مابقى اکسیژن خواهد بود که بیانگر تولید فاز مطلوب Y:123 است. در مورد نمونه 3 افزایش دمای تکلیس تا 970 درجه سانتی گراد صورت پذیرفت. با توجه به شکل (16)، که طیفسنجی اشعه ایکس این نمونه را نمایش میدهد، مشاهده میشود که پیکهای مربوط به فاز Y:123 شروع به کاهش مینماید و از طرف دیگر پیکهای مرتبط با فاز Y:211 رشد کردهاند. این مسئله بیانگر گذر از دمای بهینه و تبدیل فاز ابررسانای Y:123 به فاز Y:211 در زمینه ماده است.



شکل 13- طیفسنجی اشعه ایکس نمونه تکلیس شده در دمای 930 درجه سانتی گراد

نشان میدهد. افزایش میزان اکسیژن ترکیب بیانگر تجزیه فاز ابررسانای Y:123 به فازهای Y:211 و اکسیدمس و باریم خواهد بود. ترکیب Y:123 در این محدوده دمایی وارد منطقه ناپایداری می شود و همان طور که از نمودار وزن سنجی گرمایی پودر تولیدشده نیز قابل پیش بینی بود، در این محدوده دمایی با افزایش میزان اکسیژن ترکیبات حاصله فاز Y:123 تجزیه خواهد شد. همچنین از نمونه شماره 3 نیز تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی و الگوی پراش انرژی اشعه ایکس تهیه شد. شکل (17) تصویر میکروسکوپی الکترونی پودر تکلیسشده تا 970 درجه سانتی گراد را نشان میدهد. مطابق این شکل موروفولوژی نانوذرات به سمت دانههای کشیدهتر ناشی از تحول ساختاری Y:123 به Y:211 را نشان میدهد. شکل (18) طیفسنجی انرژی اشعه ایکس نمونه شماره 3 را



شكل 14- تصوير ميكروسكوپي الكتروني پودر توليد شده در نمونه شماره 2.



شكل 15- الگوى پراش انرژى پرتو ايكس نمونه شماره 2.

با مقایسه 3 نمونه تکلیسشده فوق مشخص میشود که فرایند بهینه تکلیس برای نمونه شماره 2 صورت پذیرفته است. برای بررسی مجدد تکمیل فرایند تکلیس نمونه شماره 2، آزمون وزنسنجی گرمایی در مورد این ترکیب صورت پذیرفت. شکل (19) نمودار وزنسنجی گرمایی نمونه شماره 2 را نشان

مىدھد.

با توجه به شکل (19) هیچ پیک دیگری در محدوده دمایی تکلیس وجود ندارد و مجددا با افزایش دما تا بالای 930 درجه سانتیگراد، تجزیه فاز ابررسانای ۲:123 و افزایش جرم در اثر افزایش محتوای اکسیژن صورت گرفته است.





برای پوشش دهی فیلم لایه نازک از روش PLD استفاده شد. هدف YBCO در یک نگهدارنده چرخان در یک محفظه خلا در مقابل لیزر ¹-J.Pulse از نوع KrF قرار داده شد. برای برخورد لیزر به ماده تازه در طی زمان هدف همواره در حال چرخش است. ماده هدف با کمک پرس و تفجوشی، مطابق آنچه در بخش قبل توضیح داده شد، به صورت قرص تهیه شد. در روش DLD از لنز کوارتز برای تمرکز لیزر استفاده می شود. زیر لایه که یک بایک ریستال STO (ویفر زیر لایه

دوکریستالی SrTiO₃ با ابعاد 1×1 سانتیمتر مربع بود در یک فاصله 8 از هدف روی گرمکننده قرار گرفت و یک نرخ رسوب حدود ¹⁻Nulse با فرکانس لیزر 5 Hz را داشت. به دلیل انتقال اتم به اتم ماده در این روش اتمهای صفحات مختلف ساختار کریستالی ماده به طور مداوم و یکنواخت از هدف به زیرلایه منتقل میشوند و بنابراین استوکیومتری ماده پوشش با ماده هدف یکسان خواهد ماند. پارامترهای رسوب عبارت بود از: طول موج mm 248 (KrF)، انرژی ²⁻L Cl. نقطه هدف ² mm در جه سانتی گراد.

نمونه فیلم نازک تولیدشده سپس از طریق آزمون رسانایی چهار نقطهای مورد بررسی قرار گرفت. جریان مورد استفاده 140 میلی آمپر و از ترموکوپل نوع T برای بررسی تغییرات دما استفاده شد. شکل (20) نمودار رسانایی فیلم نازک تولیدشده را نشان میدهد. همان طورکه شکل (20) نشان میدهد، دمای ابررسانایی این فیلم نازک در حدود 94 کلوین است که دمایی بسیار مناسب برای ابررسانایی این فیلم نازک است و بیانگر حفظ خواص ابررسانا تا مرحله پایانی لایهنشانی فیلم نازک

شکل (20-الف) تصویر ویفر حسگر با پوشش YBCO را نشان میدهد. فرایند پوششدهی لایه نازک تا ضخامت 50 nm ادامه پیدا کرد.



شكل 18- الكوى پراش انرژى اشعه ايكس نمونه شماره 3.



شكل 19 – نمودار وزن سنجي گرمايي نمونه شماره 2 پس از فرايند تكليس.

سیستم جمع آوری داده کنترل شده توسط کامپیوتر تشکیل شده است. خوانش و ثبت تغییرات جریان خروجی حسگر اسکوییدی به کمک اسیلوسکوپ نیز قابل انجام خواهد بود. از آنجایی که سیستمهای معمولی بررسی غیرمخرب عیوب جوش با جریان گردابی تنها عیوب تا عمق 2 میلی متر را تشخیص می دهند، از سیستمهای مبتنی بر اسکویید برای تشخیص عیوب عمیق تر تا عمق بیش از 1/5 سانتی متر می توان

در پایان الگوی مدار حسگر اسکوییدی جریان مستقیم به روش الگودهی با لیزر متمرکز بر روی ویفر ایجاد شد. شکل (20-ب) تصویر حسگر نهایی با مدار الگودهی شده را نشان می دهد. از این حسگر می توان برای تشخیص عیوب عمیق و یا آشکارسازی حضور و میزان فازهای مغناطیسی استفاده نمود. به طور کلی یک سیستم بررسی غیر مخرب جریان گردابی مبتنی بر حسگرهای SQUID از یک XX اسکنر دقیق و یک

استفاده نمود.





شکل 20- الف) تصویر ویفر با پوشش YBCO و ب) حسگر اسکوییدی الگودهی شده نهایی.

همچنین تشخیص فازهای مغناطیسی در ساختار و درعمق قسمتهای جوشکاریشده نیز به کمک این حسگر قابل انجام است. این سیستم برای تشخیص نقصهای زیرسطحی در صفحات رسانای نسبتا ضخیم استفاده می شود، که به واسطه

محدودیتهای عمق پوست به طور معمول با تکنیکهای معمولی قابل تشخیص نیست [4].

4- نتيجه گيرى

تولید محصولات ابررسانای دمابالا در سالهای اخیر گسترش چشمگیری یافته است و هر روز کاربردهای گوناگونی به دلیل دمای مناسب عملکرد این مواد افزوده می شود. دستگاههای تشخيص غيرمخرب عيوب در صفحات رسانا با كمك جريان گردابی از جمله دستگاههایی هستند که با سنسورهای تولیدشده با فیلم نازک مواد ابررسانای دما بالا در این زمینه گسترش می یابند. این دستگاهها علاوه بر شناسایی عیوب سطحی قادرند عیوبی که در عمق بیشتری از سطح قرار دارند و به وسیله روشهای معمول غیرقابل تشخیص هستند، آشکار سازند. در این تحقیق با بررسی فرایند سل ژل خود احتراق به بهینهسازی فرایند تولید یودر ابررسانای YBCO پرداخته شد. شرايط بهينه تكليس ماده ابررساناي Y:123 با خلوص بالا تولیدشده به وسیله فرایند سل ژل خود احتراق عبارت است از گرمشدن در کوره تا دمای تکلیس 930 درجه سانتی گراد، سیس خنکشدن تا دمای 700 درجه سانتی گراد با نرخ C/min ، در ادامه خنکشدن تا دمای 400 درجه سانتی گراد با نرخ C/min° 0/5 و در نهایت قرارگرفتن نمونه خارج از کوره در معرض هوای آزاد. این فرایند از آنجاکه به تسریع فرایند تولید و کاهش هزینه آنیل بعدی ماده تولیدی کمک می کند، اهمیت فراوانی خواهد داشت. در نهایت با کمک زیرلایه STO و استفاده از تکنیک PLD به یوشش دهی این یودر بر روی زیرلایه بایکریستال STO پرداخته و یک ویفر حسگر اسکوییدی با ضخامت فیلم نازک 50 نانومتر تهیه شد. شرایط بهینه برای پوششدهی تعیین شد که عبارت است از طول موج KrF) 248 nm، انرژی ²-1.2 J.cm نقطه هدف 3 mm²، فاصله هدف 3-4 cm، فشار 1 m.bar، دمای زیرلایه 780 درجه سانتی گراد. دمای ابررسانایی زیرلایه در حدود 94 کلوین اندازهگیری شد که دمای بهینه برای فیلم نازک از جنس

New High-Tc Oxide Superconductor without a Rare Earth Element", *Japanese Journal of Applied Physics*, No. 27, pp. 209–210, 1988.

[9] Schilling, A., "Superconductivity above 130 K in the Hg–Ba–Ca–Cu–O system", *Nature*, Vol. 363, No. 56, 1993.

[10] Bednorz, J.G., and Muller, K.A., "Possible high T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system", *Zeitschrift für Physik B*, Vol. 64, p. 189-193, 1986.

[11] Liu, R.S., Wang, W.N., Chang, C.T., and Wu, P.T., "Synthesis and Characterization of High-Tc Superconducting Oxides by the Modified Citrate Gel Process", *Journal of Applied Physics*, L2155, 1989.

[12] Roas, B., Schultz, L., and Endres, G., "Epitaxial growth of $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ thin films by a laser evaporation process", *Journal of Applied Physics*, L 53, pp. 1557–1559, 1988.

[13] Koren, G., Polturak, E., Fisher, B., Cohen, D., Kimel, G., "Highly oriented as-deposited superconducting laser ablated thin films of $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-d}$ on SrTiO₃, zirconia, and Sisubstrates", *Journal of Applied Physics*, Lett. 53, pp. 2330–2332, 1988.

[14] Kumar, A., *High Temperature Superconductors*, Springer, pp. 110 -120, 2012.

[15] Lee, H.K., Kwon, H.C., Kim, I.S., and Park, J.C.," Influence of the calcining temperature on the superconducting transition and critical current of Y-Ba-Cu-oxide compound", *Journal of Applied Physics*, Vol. 63, No. 2, pp. 568 – 570, 1989.

[16] Tinkham, M., *Introduction to Superconductivity*, McGraw Hill, New Jersey, pp. 20-80, 1996.

[17] Saxena, A.K., *Principles of Modern Physics*, Alpha Science International, Oxford, UK, pp. 510-563, 2007.

[18] Mele, P., Matsumoto, K., Horide, T., Ichinose, A., Mukaida, M., Yoshida, Y., and Horii, S., "Enhanced high-field performance in PLD films fabricated by ablation of YSZ-added YBa₂Cu₃O_{7-x} target", *Superconductor Science and Technology*, Vol. 20, No. 3, 2007.

YBCO است. روش الگودهی اشعه لیزر متمرکز برای الگودهی حسگر اسکوییدی جریان مستقیم با موفقیت به کار گرفته شد و حسگر اسکوییدی مناسب تولید گردید.

منابع

[1] Malozemoff, A.P., Fleshler, S., Rupich, M., Thieme, C., Li, X., Zhang, W., Otto, A., Maguire, J., Folts, D., Yuan, J., Kraemer, H.P., Schmidt, W., Wohlfart, M., and Neumueller, H.W., "Progress in HTS Coated Conductors and Their Applications", *Superconductor Science and Technology*, Vol. 21, No. 3, pp. 1–12, 2008.

[2] Nagendran, R., Janawadkar, M.P., Pattabiraman, M., Baisnab, D.K., Jayapandian, J., Baskaran, R., Vaidhyanathan, L.S., Hariharan, Y., Nagesha, A., Valsan, M., Sankara Rao, K.B., and Raj, B., "Development of SQUID-Based System for Nondestructive Evaluation", *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, VOL. 17, NO. 3, pp. 3824 – 3828, 2007.

[3] Geshkenbein, V. B., Larkin, A. I., and Barone, A., "Vortices with half magnetic flux quanta in heavyfermion superconductors", *Physical Review B*, Vol. 36, No. 1, pp. 235–238, 1987.

[4] Omar, M., *Nondistructive Testing Methods and New Applications*, In Tech, Croatia, 2012.

[5] Leggett, A., "What DO we know about high Tc", *Nature Physics 2*, Vol. 3, pp. 134 -136, 2006.

[6] Repelianto, A.S., and Kasai, N., "The Improvement of Flaw Detection by the Configuration of Uniform Eddy Current Probes", *Sensors*, Vol. 19, No. 397, pp. 1 -13, 2019.

[7] Tanaka, S., "High temperature superconductivity: History and Outlook". *JSAP International*, No.4, pp. 17 - 22, 2012.

[8] Maeda, H., Tanaka, Y., Fukutumi, M., Asano, T., "A