INVESTIGATION OF FLUX PINNING PROPERTIES OF YBCO BASED NANOCOMPOSITES

GAURAV KUMAR

DEPARTMENT OF PHYSICS
INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI
JUNE 2025

Investigation of Flux Pinning Properties of YBCO Based Nanocomposites

by

Gaurav Kumar

Department of Physics

Submitted

In fulfillment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy

to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

JUNE 2025

Dedicated to my Family

Certificate

This is to certify that the thesis titled **"Investigation of Flux Pinning Properties of YBCO-Based Nanocomposites,"** submitted by **Mr. Gaurav Kumar** to the **Indian Institute of Technology Delhi**, is a result of his original research work conducted under my guidance and supervision. The research presented in this thesis embodies the outcomes of a bona fide investigation carried out by Mr. Gaurav Kumar and meets the standards required for the degree of Doctor of Philosophy. The results presented herein have not been submitted, either in whole or in part, to any other university or institute for the award of any degree or diploma.

Prof. Neeraj Khare
Department of Physics
Indian Institute of Technology Delhi
Hauz Khas, New Delhi – 110016
India

Acknowledgments

For me, this thesis marks a significant milestone in my life, and I deeply cherish the journey that brought me here. I am profoundly grateful to the many individuals whose unwavering support, encouragement, and blessings have been instrumental in completing this endeavor. I take this opportunity to extend my heartfelt gratitude to everyone who has contributed, directly or indirectly, to the successful completion of this research and thesis.

I am deeply grateful to my supervisor, Prof. Neeraj Khare, for granting me the opportunity to pursue a PhD under his guidance and for his unwavering support throughout this journey. I greatly value his meticulous assistance in refining my academic writing, which has significantly enhanced my clarity and precision. His innovative thinking, enthusiasm, and positive attitude have been a constant source of inspiration, motivating me to conduct and complete my doctoral research with diligence and efficiency. I would also like to express my heartfelt gratitude to the Director of the Indian Institute of Technology Delhi and the DST-INSPIRE Fellowship, Department of Science and Technology (DST) for awarding me the INSPIRE Fellowship (IF190132). Their financial and institutional support has been pivotal in enabling me to successfully complete this thesis.

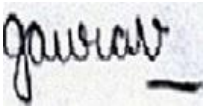
I wish to express my sincere gratitude to Prof. Sujeet Chaudhary, Head of the Department of Physics, for his vital support and guidance throughout my PhD journey. I am equally thankful to my SRC members—Prof. Pankaj Srivastava, Prof. Sujeet Chaudhary, and Prof. Samaresh Das—for their valuable time, insightful evaluations of my work, and assistance in shaping this thesis to its best form. I would also like to extend my appreciation to the teams of the Nano-Research Scale Facility and the Central Research Facility of IIT Delhi, as well as the dedicated instrument

operators, whose efforts were instrumental in acquiring data in a timely manner. Their contributions have been crucial to the progress and completion of my research.

I would like to thank all of my seniors, Dr. Deepanshu Sharma, Dr. Sandeep Munjal, Dr. Surbhi Sharma, Dr. Sunil Kumar, Dr. Pratisha Gangwar, Dr. Huidrom Hemojit Singh, Dr. Mohd. Faraz, Dr. Dheeraj Kumar, Dr. Rohit Kumar, Dr. Mamta Dahiya, Dr. Amish Kumar Gautam, and Dr. Mohit Khosya for their moral support and guidance. I would also like to thank all my fellow lab mates: Mrs. Abhilasha Chouksey, Mr. Aman, Mr. Arun, Mr. Manoj, Mr. Sandeep, Ms. Rajni, and Ms. Sarita for their help in various ways and for providing a healthy atmosphere, which was essential for successfully completing my research work.

I'd like to acknowledge Dr. Rohit Kumar, Dr. Mamta Dahiya, and Dr. Tulja Bhavani Korukonda for providing experimental requisites, suggestions, and encouragement from time to time. A big shout out to Dr. Rohit Kumar, who has been a constant support, making my journey much smoother. I'd like to thank all my friends at IIT-D and beyond for making my time here such a joy. I am glad to have met Tulja, Balwant, Indraneel, Hardhyan, Mohan, Prabuddha Kant Mishra, Haribrahma Singh, Deepak, and Gaurav who have been my support system, making this place a home away from home.

Lastly, I would like to thank my family for their unconditional love, constant support, and encouragement, which have kept my spirits high as I pursued my ambitions.



Gaurav Kumar

ABSTRACT

$YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ is a high-temperature superconductor that exhibits superconductivity above 77 K, surpassing the boiling point of liquid nitrogen. This material has garnered significant attention from the scientific community due to its exceptional characteristics, such as a high critical temperature (T_c), a high upper critical field (H_{c2}), and its ability to be synthesized in a single phase with ease. YBCO finds applications in various fields, such as transmission, power lines, magnetic resonance imaging, and levitation. However, its granular and porous structure can degrade its superconducting properties, resulting in lower critical current densities (J_c). Achieving a high value of J_c under strong magnetic fields requires immobilizing vortices through flux pinning. Enhancing the critical current density (J_c) and pinning force (F_p) in YBCO is one of the main challenges, and several attempts have already been made. Therefore, the introduction of additional defects into the YBCO matrix, alongside natural ones, is essential to enhance its flux pinning properties. The best method to enhance flux pinning strength in YBCO is to add artificial pinning centers (APCs) in the form of nano additives. These nano additives, which can be made from metals, insulators, semiconductors, or magnetic materials and come in various morphologies such as nanoparticles, nanospheres, nanorods, or nanowires, are incorporated into the YBCO matrix, inducing defects that act as effective pinning centers to restrict vortex motion and improve pinning properties.

In order to carry out a study in this direction, YBCO-x$KNbO_3$ nanorods (NRs) or nanoparticles (NPs) (x = 0.0, 0.25, 0.5, and 1.0 wt%) nanocomposites are synthesized through a two-step process involving the hydrothermal method and solid-state reaction method, with their pinning properties being investigated. The orthorhombic phases of these samples are confirmed via X-ray

diffraction (XRD) patterns, and their morphology and composition are examined using field emission scanning electron microscopy (FESEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX). The superconducting critical temperature (T_{c0}) of YBCO-x$KNbO_3$ (x = 0.25, 0.5, and 1.0 wt%) nanocomposite samples remains unchanged compared to the YBCO sample, indicating that small additions of $KNbO_3$ do not significantly affect T_{c0}. Magnetic measurements are conducted within a temperature range of 15 K to 65 K using a Magnetic Property Measurement System (MPMS). Adding 0.5 wt% NRs or NPs to the nanocomposite notably enhances the superconducting parameters, suggesting improved flux pinning properties. The sample with 0.5 wt% NPs exhibits a 4.4-fold increase in critical current density (J_c), while the sample with 0.5 wt% NRs shows a 3.6-fold increase, indicating that $KNbO_3$-NPs are more effective in improving the flux pinning and superconducting properties of YBCO. However, higher concentrations of NRs or NPs lead to reduced J_c, possibly due to increased agglomeration. The study also reveals that nanocomposites exhibit improved pinning properties, as the rate of J_c decrease is lower compared to pure YBCO under increasing external magnetic fields. Furthermore, magneto-transport measurements are conducted to calculate parameters such as activation energy (U_0), coherence length ($\xi(0)$), and upper critical field ($H_{c2}(0)$). Samples containing 0.5 wt% $KNbO_3$-NPs display increased derived parameters compared to YBCO and other nanocomposite samples, with the improvements being particularly pronounced in the YBCO-$KNbO_3$ NPs sample. This suggests that adding an appropriate quantity of $KNbO_3$-NPs is a valuable strategy for advancing YBCO materials with significant practical application potential.

We investigate the effect of adding $KNbO_3$ nanoparticles to YBCO thin films. YBCO and YBCO-x$KNbO_3$ (x = 0.5 and 1.0 wt%) nanocomposite thin films are deposited using the pulsed laser deposition technique on single-crystal $SrTiO_3$ (STO)(100) substrates. Structural,

morphological, transport, and magnetic properties are analyzed, with magnetic properties assessed using a Magnetic Property Measurement System (MPMS) in a magnetic field range of -7 T to +7 T. The YBCO-$KNbO_3$ nanocomposite thin films demonstrate enhanced performance compared to pure YBCO thin films. The most significant improvement—a 3.5-fold increase in critical current density (J_c) and pinning properties—is observed in the YBCO-0.5wt%$KNbO_3$ thin film. Additionally, the nanocomposite thin films exhibit a slower rate of decay in J_c under increasing magnetic fields, indicating improved flux pinning properties. The lattice mismatch between YBCO and $KNbO_3$-NPs appears to introduce additional defects, contributing to the enhancement of flux pinning. These results suggest that incorporating small amounts of $KNbO_3$-NPs effectively enhances the in-field performance of YBCO thin films.

सारांश

$YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ एक उच्च तापमान सुपरकंडक्टर है, जो 77 K से ऊपर के तापमान पर सुपरकंडक्टिविटी प्रदर्शित करता है, जो कि तरल नाइट्रोजन के उबाल बिंदु से अधिक है। इसके असाधारण गुणों, जैसे उच्च क्रिटिकल तापमान (T_c), उच्च ऊपरी क्रिटिकल क्षेत्र (H_{c2}), और इसे एकल चरण में आसानी से संश्लेषित करने की क्षमता के कारण, इस सामग्री ने वैज्ञानिक समुदाय का विशेष ध्यान आकर्षित किया है। YBCO का उपयोग विभिन्न क्षेत्रों में किया जाता है, जैसे विद्युत संचार, पावर लाइन्स, मैग्नेटिक रेजोनेंस इमेजिंग, और लेविटेशन। हालांकि, इसका दानेदार और छिद्रयुक्त संरचना इसकी सुपरकंडक्टिंग विशेषताओं को कमजोर कर सकती है, जिससे क्रिटिकल करंट घनत्व (J_c) कम हो जाता है। मजबूत चुंबकीय क्षेत्रों के तहत J_c के उच्च मान को प्राप्त करने के लिए, फ्लक्स पिनिंग के माध्यम से वर्टिसेस को स्थिर करना आवश्यक है। YBCO में क्रिटिकल करंट घनत्व (J_c) और पिनिंग फोर्स (F_p) को बढ़ाना एक प्रमुख चुनौती है, और इसके लिए कई प्रयास किए गए हैं। इसलिए, YBCO मैट्रिक्स में प्राकृतिक दोषों के साथ-साथ अतिरिक्त दोषों का परिचय आवश्यक है ताकि इसकी फ्लक्स पिनिंग विशेषताओं में सुधार हो। YBCO में फ्लक्स पिनिंग की ताकत बढ़ाने का सबसे अच्छा तरीका नैनो एडिटिव्स के रूप में कृत्रिम पिनिंग सेंटर (APCs) को जोड़ना है। ये नैनो एडिटिव्स धातु, इन्सुलेटर, सेमीकंडक्टर या चुंबकीय सामग्रियों से बने हो सकते हैं और विभिन्न रूपों में आते हैं, जैसे नैनोपार्टिकल्स, नैनोस्पीयर्स, नैनोरोड्स, या नैनोवायर। इन्हें YBCO मैट्रिक्स में सम्मिलित किया जाता है, जिससे ऐसे दोष उत्पन्न होते हैं जो प्रभावी पिनिंग सेंटर के रूप में कार्य करते हैं, वर्टेक्स की गति को रोकते हैं और पिनिंग गुणों में सुधार करते हैं।

इस दिशा में अध्ययन करने के लिए, YBCO-$xKNbO_3$ नैनोरोड्स (NRs) या नैनोपार्टिकल्स (NPs) (x = 0.0, 0.25, 0.5, and 1.0 wt%) नैनोकंपोजिट नमूनों को हाइड्रोथर्मल और सॉलिड-स्टेट रिएक्शन विधियों के

माध्यम से दो-चरणीय प्रक्रिया के तहत संश्लेषित किया गया, और उनकी फ्लक्स पिनिंग विशेषताओं की जांच की गई। इन नमूनों के ऑर्थोरोम्बिक चरणों की पुष्टि एक्स-रे विवर्तन (XRD) पैटर्न द्वारा की गई, और उनकी संरचना और संरचना की जांच फील्ड एमिशन स्कैनिंग इलेक्ट्रॉन माइक्रोस्कोपी (FESEM) और ऊर्जा-डिस्पर्सिव एक्स-रे स्पेक्ट्रोस्कोपी (EDX) द्वारा की गई। YBCO-x$KNbO_3$ (x = 0.25, 0.5, and 1.0 wt%) नैनोकंपोजिट नमूनों के सुपरकंडक्टिंग क्रिटिकल तापमान (T_{c0}) में YBCO नमूने की तुलना में कोई परिवर्तन नहीं देखा गया, जो यह दर्शाता है कि $KNbO_3$ की छोटी मात्रा जोड़ने से T_{c0} पर कोई महत्वपूर्ण प्रभाव नहीं पड़ता। चुंबकीय मापन 15 K से 65 K के तापमान सीमा में मैग्नेटिक प्रॉपर्टी मेजरमेंट सिस्टम (MPMS) का उपयोग करके किया गया। नैनोकंपोजिट में 0.5 wt% NRs या NPs जोड़ने से सुपरकंडक्टिंग मापदंडों में उल्लेखनीय सुधार हुआ, जो फ्लक्स पिनिंग गुणों में सुधार का संकेत देता है। 0.5 wt% NPs वाले नमूने में क्रिटिकल करंट घनत्व (J_c) में 4.4 गुना वृद्धि देखी गई, जबकि 0.5 wt% NRs वाले नमूने में 3.6 गुना वृद्धि हुई, जो यह दर्शाता है कि $KNbO_3$-NPs YBCO के फ्लक्स पिनिंग और सुपरकंडक्टिंग गुणों को बेहतर बनाने में अधिक प्रभावी हैं। हालांकि, NRs या NPs की उच्च सांद्रता से J_c में कमी आई, जो संभवतः बढ़े हुए एग्लोमरेशन के कारण हुई। अध्ययन से यह भी पता चला कि नैनोकंपोजिट में पिनिंग गुणों में सुधार हुआ, क्योंकि बाहरी चुंबकीय क्षेत्रों के बढ़ने पर J_c की गिरावट की दर शुद्ध YBCO की तुलना में कम थी। इसके अलावा, मैग्नेटो-ट्रांसपोर्ट मापन का उपयोग करके सक्रियण ऊर्जा (U_0), कोहेरेन्स लंबाई ($\xi(0)$), और ऊपरी क्रिटिकल क्षेत्र ($H_{c2}(0)$) जैसे मापदंडों की गणना की गई। 0.5 wt% $KNbO_3$-NPs वाले नमूनों ने YBCO और अन्य नैनोकंपोजिट नमूनों की तुलना में बेहतर प्राप्त मापदंड दिखाए, विशेष रूप से YBCO-$KNbO_3$ NPs नमूने में। यह सुझाव देता है कि $KNbO_3$-NPs की उपयुक्त मात्रा जोड़ने से YBCO सामग्री में महत्वपूर्ण व्यावहारिक अनुप्रयोग क्षमता के साथ सुधार किया जा सकता है।

हमने YBCO पतली परतों में $KNbO_3$-NPs जोड़ने के प्रभावों का अध्ययन किया। YBCO और YBCO-$xKNbO_3$ (x = 0.5 और 1.0 wt%) नैनोकंपोजिट पतली परतों को पल्स्ड लेजर डिपोजिशन तकनीक का उपयोग करके सिंगल क्रिस्टल $SrTiO_3$ (STO)(100) सब्सट्रेट्स पर जमा किया गया। संरचनात्मक, भौतिक, परिवहन, और चुंबकीय गुणों का विश्लेषण किया गया, जिसमें चुंबकीय गुणों का आकलन -7 T से +7 T के चुंबकीय क्षेत्र सीमा में MPMS का उपयोग करके किया गया। YBCO-$KNbO_3$ नैनोकंपोजिट पतली परतों ने शुद्ध YBCO पतली परतों की तुलना में बेहतर प्रदर्शन दिखाया। सबसे उल्लेखनीय सुधार, क्रिटिकल करंट घनत्व (J_c) और पिनिंग गुणों में 3.5 गुना वृद्धि, YBCO-0.5wt%$KNbO_3$ पतली परत में देखी गई। इसके अलावा, नैनोकंपोजिट पतली परतों ने बढ़ते चुंबकीय क्षेत्रों के तहत J_c के क्षय की धीमी दर दिखाई, जो बेहतर पिनिंग गुणों को इंगित करता है। YBCO और $KNbO_3$-NPs के बीच लेटिस मिसमैच अतिरिक्त दोषों को पेश करता प्रतीत होता है, जिससे फ्लक्स पिनिंग गुणों में सुधार होता है। इन परिणामों से पता चलता है कि $KNbO_3$-NPs की छोटी मात्रा को शामिल करने से YBCO की इन-फील्ड प्रदर्शन क्षमता प्रभावी रूप से बढ़ सकती है।

Table of Contents

List of Figures

List of Tables