

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М.В.ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА МАГНЕТИЗМА

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

**Исследование свойств высокотемпературных
сверхпроводящих керамик магнитными методами**

Выполнил студент
419 группы:
Резников Я.Г

Научный руководитель:
профессор Перов Н.С.

Допущена к защите
Зав. кафедрой магнетизма
профессор Перов Н.С.

Москва 2019

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	3
ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР	3
ЭФФЕКТ МЕЙСНЕРА-ОКСЕНФЕЛЬДА	4
ТЕОРИЯ БКШ	5
ТИПЫ СВЕРХПРОВОДНИКОВ.....	6
ДВА ПОКОЛЕНИЯ ВТСП ПРОВОДОВ.....	7
ДЕФОРМАЦИЯ КАК ОГРАНИЧЕНИЕ ВТСП.....	8
МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВТСП	10
ВИБРАЦИОННЫЙ МАГНИТОМЕТР	10
ЧЕТЫРЕХЗОНДОВЫЙ МЕТОД	11
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.....	11
ОБРАЗЦЫ	11
ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ПЕРЕХОД.....	12
ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ВТСП.....	15
ДЕФОРМАЦИЯ ВТСП.....	19
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ.....	21
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	22

Введение

$\text{ReBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (ReBCO, Re - редкоземельный элемент) высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) были обнаружены в 1986 году. Это открытие привело к большому числу исследований в этой области и проложило путь для новых способов применения сверхпроводящих материалов. Технические проблемы, такие как нанесение ВТСП на длинные гибкие металлические ленты были решены лишь в конце 90-х и начале 2000-го года. В это время началась разработка ВТСП покрытых проводником (ВТСП ПП, HTSCC). Они предназначены для использования в энергетике, например, при высоких значениях силы тока, в кабелях и генераторах, ограничителях тока и др.

Определяющими характеристиками являются критическая температура, критический ток плотность и критическое магнитное поле. Целью данной бакалаврской работы является исследование сверхпроводящего перехода в ВТСП-лентах 2го поколения и зависимости его критических параметров (критического тока, температуры) от магнитного поля. А так же в данной работе представлен способ изучения влияния упругих деформаций на плотность критического тока ВТСП и полученные результаты.

Литературный обзор

Сверхпроводимость представляет собой способность определенных материалов пропускать ток с нулевым электрическим сопротивлением. Температура, ниже которой появляется сверхпроводимость, называется критической температурой T_c [1]. Сверхпроводимость может быть разрушена большим током или магнитным полем, превышающими определенное значение, называющиеся критическим током (I_c) и критическим магнитным полем (H_c) соответственно. Критический ток зависит от размера образца,

поэтому часто используется критическая плотность тока J_c . Она определяется как $\vec{j}_c = \vec{I}_c / A$, где A - поперечное сечение проводника. T_c , J_c и H_c являются ключевыми характеристиками, определяющими область существования сверхпроводимости и возможности применения сверхпроводящих материалов.

Существует несколько способов классификации сверхпроводников (СП). В одном из них ключевым параметром является критическая температура. В зависимости от критической температуры сверхпроводники можно разделить на низкотемпературные сверхпроводники и высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП).

Термин ВТСП был введен, когда в 1986 году был открыт новый класс сверхпроводников на основе оксида меди с $T_c > 30 \text{ K}$ [2,3]. ВТСП материалы с $T_c > 77 \text{ K}$ (температура кипения жидкого азота) имеют большое значение для практических применений, поскольку жидкий азот можно использовать в качестве теплоносителя, который относительно дешев и практичен в сравнении с жидким гелием.

Эффект Мейснера-Оксенфельда

При охлаждении СП ниже T_c в постоянном и слабом магнитном поле, магнитное поле выталкивается из СП. Это явление называется эффектом Мейснера-Оксенфельда. Физически это можно объяснить тем, что при $T < T_c$ на поверхности сверхпроводника начинает течь постоянный ток, и его поле компенсирует внешнее магнитное поле. Этот ток экранирования называется током Мейснера. Мейснеровский ток течет только в поверхностном слое определенной толщины, поэтому приложенное магнитное поле проникает в сверхпроводник на такое же расстояние. Ток Мейснера и приложенное магнитное поле экспоненциально уменьшаются, перемещаясь внутрь от поверхности сверхпроводника, и простираются до глубины проникновения Лондона [2]. Глубина проникновения в модели Лондона была введена в

лондонской теории сверхпроводимости (1948), которая была первой теорией для описания явления сверхпроводимости.

Теория БКШ

Лондонская теория не учитывает квантовые эффекты. Увеличение электропроводности не может полностью объяснить отсутствие сопротивления ниже критической температуры. Микроскопический механизм сверхпроводимости объясняется в теории Бардина-Купера-Шриффера (БКШ) (1957г.). Ключом к пониманию природы сверхпроводимости и созданию теории БКШ является явление Купера, которое заключается в следующем: металл описывается как система осциллирующих положительных ионов, образующих кристаллическую решетку вместе с относительно свободными коллективными электронами. Электрон, движущийся в кристалле, притягивает положительно заряженные ионы. В результате образуется область сжатых ионов с избыточным положительным зарядом. Другой электрон и вышеупомянутый электрон оба притягиваются к этой области. Два электрона образуют связанное состояние, называемое *куперовской парой*. Образование куперовских пар является квантовым эффектом. Их расстояние взаимодействия называется длиной когерентности. Образование куперовских пар приводит к уменьшению полной энергии коллективных электронов. В определенном состоянии системы куперовские пары являются коллективными и могут двигаться, не рассеиваясь кристаллической решеткой, будучи энергетически выгодными. Если электроны не рассеиваются кристаллической решеткой, электрического сопротивления нет. Это означает, что система находится в сверхпроводящем состоянии.

Типы сверхпроводников

Сверхпроводники классифицированы на I-го и II-го рода, в зависимости от их поведения во внешнем магнитном поле \vec{H} . В области слабых магнитных полей намагниченность сверхпроводника равна нулю для всех сверхпроводников. В этой области материалы находятся в сверхпроводящем состоянии. С увеличением магнитного поля зависимость $\vec{B}(\vec{H})$ для сверхпроводников I-го и II-го рода различна, где \vec{B} - средняя магнитная индукция внутри СП, а \vec{H} - внешнее магнитное поле (Рис.1). Сверхпроводники I-го рода переходят в нормальное состояние ($R \neq 0$), когда внешнее магнитное поле достигает критического значения H_c . В случае сверхпроводников II-го рода при $H = H_{c1}$ внешнее магнитное поле начинает проникать внутрь материала в виде тонких нитей магнитного потока, называемых вихрями Абрикосова, при сохранении сверхпроводимости. Сверхпроводимость существует до тех пор, пока внешнее магнитное поле не достигнет значения H_{c2} , после чего сверхпроводимость будет разрушена. H_{c1} называется первым критическим полем, а H_{c2} - вторым критическим полем. Состояние СП в области $H_{c1} < H < H_{c2}$ называется фазой Шубникова. Средняя магнитная индукция внутри СК в этой области поля не равна нулю. СП II-го рода более интересны для применения по сравнению с СП I-го рода, так как $H_{c2} > H_c$ [3].

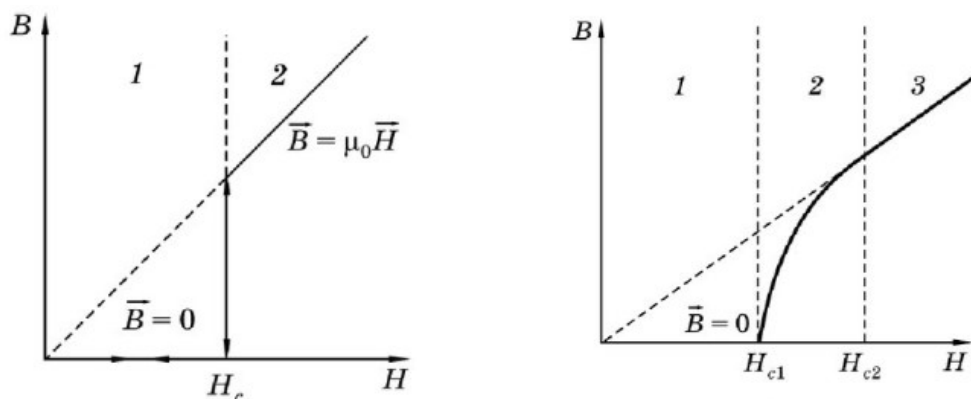


Рис.1 Величина магнитной индукции внутри сверхпроводника I-

го(слева) и II-го рода(справа) в зависимости от приложенного внешнего магнитного поля[2]

Два поколения ВТСП проводов

ВТСП 1-го поколения представляют собой ленты, в структуре которых жилы ВТСП (Bi-Sr-Ca-Cu-O, BSCCO) заключены в матрицу из серебра или сплава на его основе. Однако критический ток в данного рода ВТСП оказался неустойчив, а использование серебра как основы провода – экономически невыгодным. Несколько позднее появилась технология производства лент 2-го поколения на основе сверхпроводников систем $\text{ReBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (R – редкоземельный элемент, RBCO). ВТСП 2го поколения представляют собой многослойный композит состоящий из: ленты-подложки (сплав на основе никеля, хастеллой), буферные слои для осаждения сверхпроводника, ВТСП, а так же защитные, стабилизирующие слои из серебра, меди и др.[6,7]

Общий схема ВТСП 2П представлена на *Рис.2*

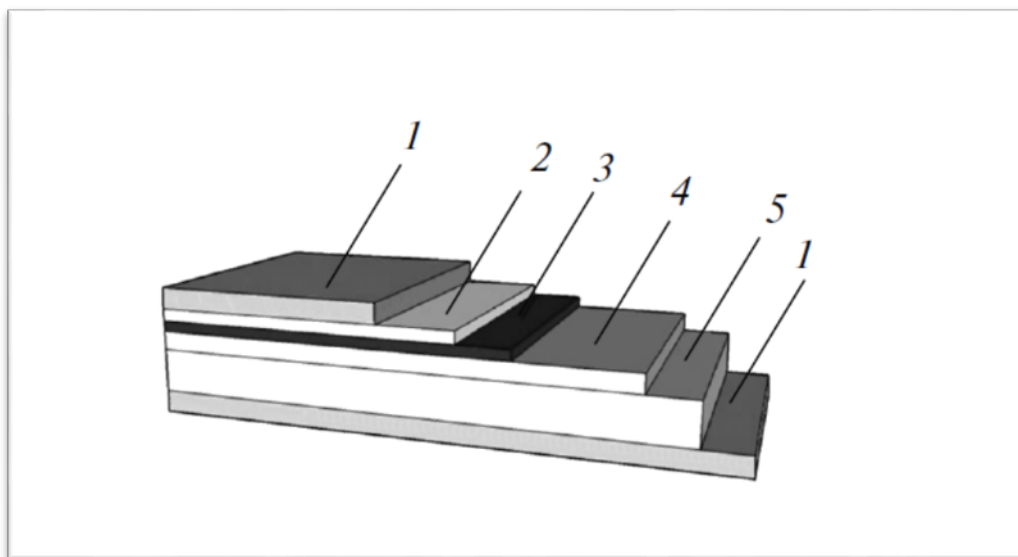


Рис 2 Структура ВТСП 2-го поколения: (1) медный защитный слой (2) серебряный защитный слой (3) ВТСП—Gd $\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, (4) буферные слои MnO и (5) подложка(Хастеллой С-276)[4].

Существуют несколько альтернативных путей производства ВТСП-лент 2-го поколения, различающихся методами создания текстуры: осаждение, стимулированное ионным пучком (IBAD), осаждение на наклонную подложку (ISD) и использование подложки с биаксиальной текстурой, получаемой с помощью прокатки и последующего рекристаллизационного отжига (RABiTS) [8, 9, 10].

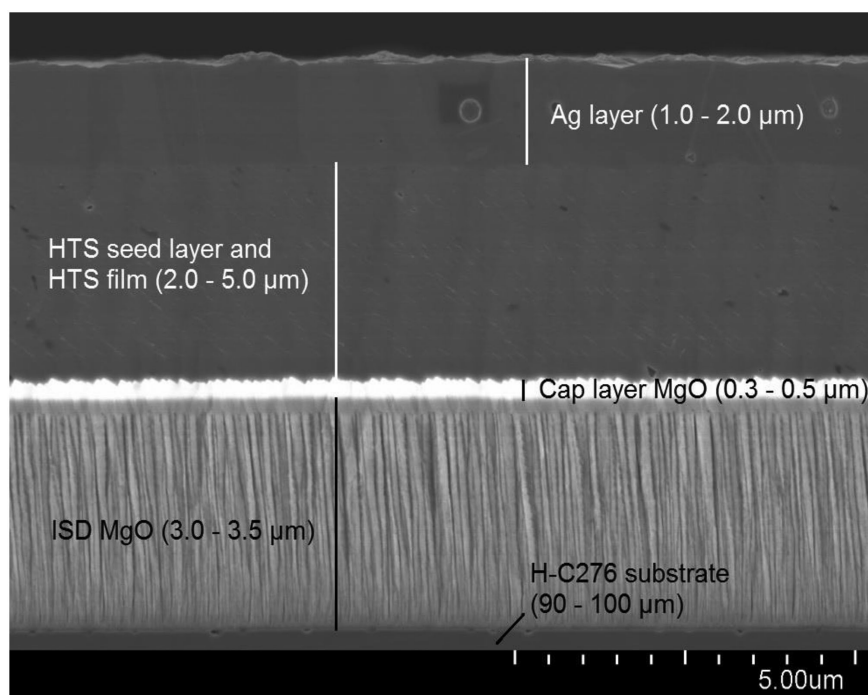


Рис.3.Пример применения ISD текстуры. SEM-изображение поперечного сечения обработанной ВТСП-лент: (сверху вниз) защитный слой серебра, затравочный (для напыления серебра) и обычный ВТСП слой, промежуточный слой MgO, ISD слой и часть подложки [5].

Деформация как ограничение ВТСП

В то время как некоторые материалы проявляют сверхпроводящие свойства при высоком давлении (например LaH_{10} [11], H_2S [12]), ВТСП – керамики являются весьма хрупкими, и плохо реагируют на внешнее воздействие. Слой ВТСП помещен в многослойную структуру ленты, его механические свойства напрямую зависят от толщины и материала подложки и внешнего металлического покрытия ленты. Производители ВТСП лент в паспорте устройства указывают критический радиус изгиба 4,0 -4,5 см, что является существенным ограничением в использовании ВТСП проводов. Например, это ограничение напрямую влияет на геометрию проектирования

Линий Электропередач(ЛЭП) на основе ВТСП, что является одной из главных возможностей применения данного материала.

Магнитные свойства ВТСП

Материал ВТСП в сверхпроводящем состоянии проявляет себя как диамагнетик, вытесняя из своего объема магнитное поле (эффект Мейснера-Оксенфельда). Однако ВТСП-лента состоит из других слоев: серебро и медь – диамагнитны, подложка из хастеллоя парамагнитна. Так что магнитные свойства всей ленты зависят от того, какой отклик имеет каждый из слоёв при определенном поле и температуре. При температуре ниже критической ВТСП имеет большой диамагнитный отклик, перекрывающий в сумме парамагнитный вклад подложки и металлической оболочки ленты. При температурах выше критической лента имеет парамагнитный отклик на внешнее поле [13, 14, 15].

Исследование сверхпроводящих материалов представляет интерес на предмет перехода из сверхпроводящего состояния в нормальное, как этот переход влияет на магнитные, резистивные свойства, как изменяются критические параметры: критическая температура и критический ток- от воздействия магнитного поля и деформаций изгиба.

Вибрационный Магнитометр

Для исследования магнитных свойств различных материалов часто используется Вибрационный Магнитометр. ВМ представляет собой высокочувствительный инструмент для определения магнитных характеристик различных магнитных материалов. Исследуемый образец, помещенный в однородное магнитное поле, приводится в колебательное движение с постоянной частотой и амплитудой. Магнитное поле колеблющегося образца создает в расположенных поблизости измерительных катушках переменное напряжение, пропорциональное магнитному моменту образца. Сигнал измерительных катушек усиливается и

детектируется синхронным детектором. Регистрируется зависимость магнитного момента от намагничивающего поля. Таким образом измеряются различные магнитные характеристики исследуемых материалов, такие как кривая намагничивания, намагниченность насыщения, петля гистерезиса, температурные зависимости намагниченности в полях различной величины.

Четырехточечный метод

Для измерений сопротивления проводников в виде тонких плёнок (например лент ВТСП) используется Четырехточечный метод, который позволяет получить более точные результаты, чем обычный двухточечный. Четырехточечный метод представляет собой способ измерения электрического сопротивления, в котором используются отдельные пары токоведущих и чувствительных к напряжению электродов. Разделение электродов тока и напряжения исключает сопротивление проводов и контактов из измерения. Схема ЧМ представлена на *Рис. 4*.

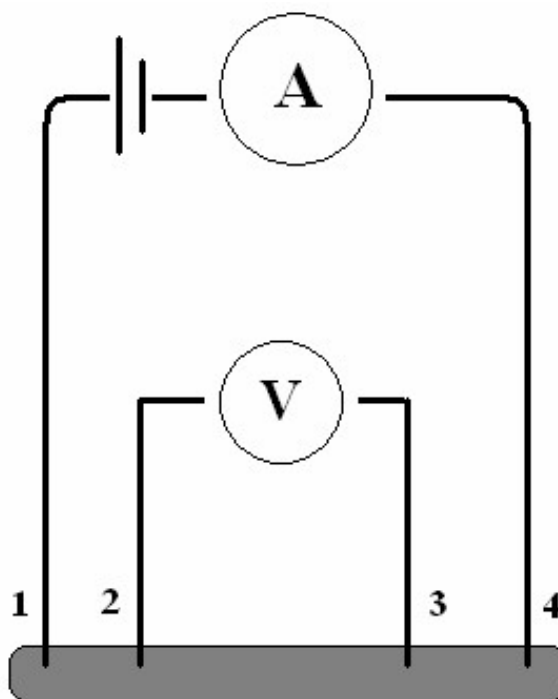


Рис. 4 Схема Четырёхзондового метода

Экспериментальная часть

Образцы

В данной работе использовались образцы лент ВТСП 2-го поколения состава $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$, предоставленные компанией THEVA (Исманинг, Германия).

Всего было исследовано 7 образцов, толщина буферных слоев MnO и ВТСП в этих образцах составляет по 3 мкм. Отличие лент состояло в разной толщине подложки и защитных слоев меди и серебра. Данные по каждому образцу представлены в *Таб. 1*

Номер ленты	Ширина, мм	Подложка, мкм	толщина, мкм	Ag, мкм	Cu, мкм
s1	4,0	63,5	80,0	1,0	8,5
s2	4,0	98,0	130,0	1,0	24,0
s3	4,0	52,0	80,0	21,0	--
s4	4,0	92,0	130,0	21,0	10,0
s5	12,0	206,7	215	1,3	--
s6	12,0	102,4	130	1,0	19,6
s7	4,0	51,0	95,0	23,0	14,0

Таб. 1 Данные образцов ВТСП, используемых в работе. Толщина слоя ВТСП каждого образца 3 мкм

Температурный переход

Для изучения сверхпроводящего перехода была исследована зависимость электрического сопротивления образца от температуры. Для измерения сопротивления использовался Четырехточечный Метод, описанный выше. К специально сделанной плате присоединялся образец, далее он припаивался к четырем изолированным участкам платы. Для обеспечения однородности тока соответствующие провода припаиваются дважды с каждого края образца.

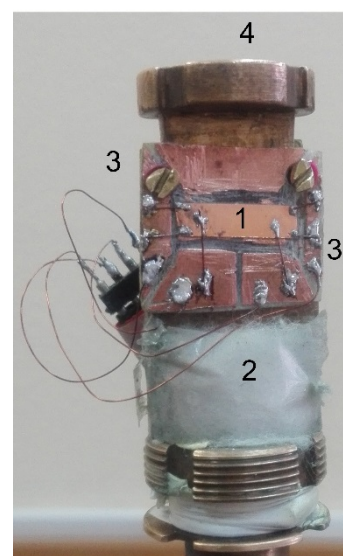


Рис 5

Отведенные от изолированных участков платы попарно подсоединялись к вольтметру и амперметру (на *Рис.5*: 1- образец, 2 – провода напряжения, 3-провода тока, 4-держатель). Плата соединяется с длинным держателем и закрывается латунной капсулой. Держатель помещается в ёмкость с азотом, вокруг которой находится сверхпроводящий магнит.

На конце держателя находится так же нагреватель, для изменения температуры внутри капсулы, и термодатчик.

В результате эксперимента был зафиксирован переход в сверхпроводящее состояние для различных образцов ВТСП. Эксперимент был произведен в двух режимах нагрева: быстром (скорость нагрева $\sim 0,5$ К/мин) и медленном ($\sim 0,3$ К/мин). Результаты показали заметную разницу в температурах для каждого образца в этих режимах (~ 5 К), эта разница объяснима большим градиентом температур между термопарой и образцом. В режиме малой мощности температура перехода для каждого образца равна $T_c = 94.0 \pm 0.5$ К. Данная температура соответствует *критической* из сверхпроводящего состояния в резистивное для образца помещенного в нулевое магнитное поле.

Образец	Критическая температура, К	
	Быстро	Медленно
S2	97,3	93,8
S7	100,1	94,5
S3	98,6	93,6

Таб. 2. Измерение температуры перехода из сверхпроводящего состояние в двух режимах

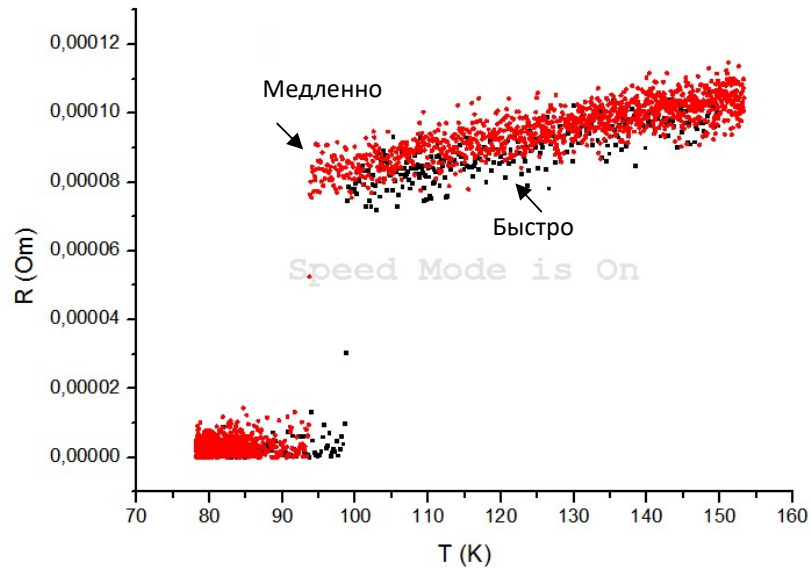


Рис. 6 График сверхпроводящего перехода для образца S3 в двух режимах нагрева: при большей (черный) и при меньшей (красный) мощности.

При включении тока в сверхпроводящем магните, в центре которого помещен образец, появляется магнитное поле, ориентированное вдоль плоскости образца, перпендикулярное току, проходящему через ленту.

Критическая температура уменьшается с увеличением внешнего магнитного поля. Для изучения этого явления образец S3 помещался в различные поля: 1.1Т, 2.2Т, 3.3Т и 4.4Т, нагревался в медленном режиме. Результаты представлены на Рис.7

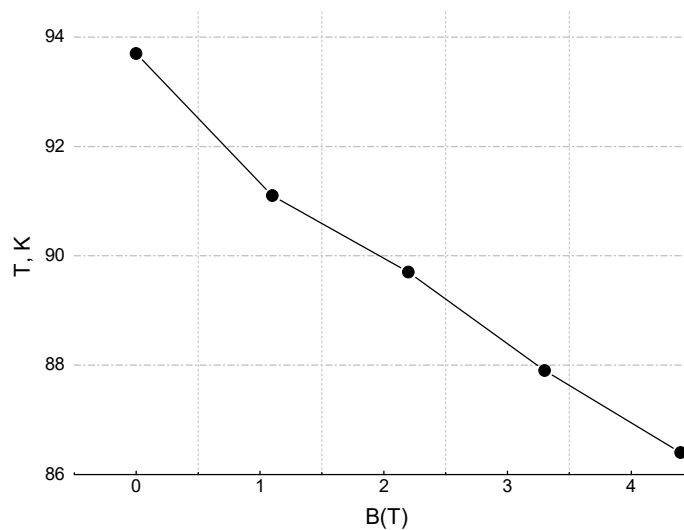


Рис.7 Зависимость критической температуры от внешнего магнитного поля для образца S3

Исследование магнитных свойств ВТСП

На вибрационном магнитометре (ВМ) были проведены исследования намагниченности различных образцов ВТСП лент при комнатной и низких (ниже 100К) температурах, а также сняты температурные зависимости намагниченности $M(T)$ от 80К до 90К.

Образцы S5 и S6, шириной 12 мм, были порезаны на участки по 4 мм шириной. Крайняя часть и центральная часть ленты исследовались отдельно. Край и центр обозначались лент S5(S6) обозначались соответственно S5k (S6k) и S5c (S6c).

Лента может иметь неоднородности еще на стадии производства, поэтому для исследования ленты необходимо исследовать несколько участков ленты для сравнения. От ленты каждого вида отрезались по 2 образца. При комнатной температуре каждый образец исследовался в двух ориентациях: плоскость образца находилась параллельно и перпендикулярно магнитному полю. Зависимость намагниченности насыщения от внешнего поля для различных ориентаций поля оказалась отличались по наклону только за счет геометрии образца и измерительной установки, Поэтому последующие измерения проводились лишь в ориентации образца перпендикулярной полю.

При комнатной температуре все образцы показали парамагнитный отклик на внешнее магнитное поле.

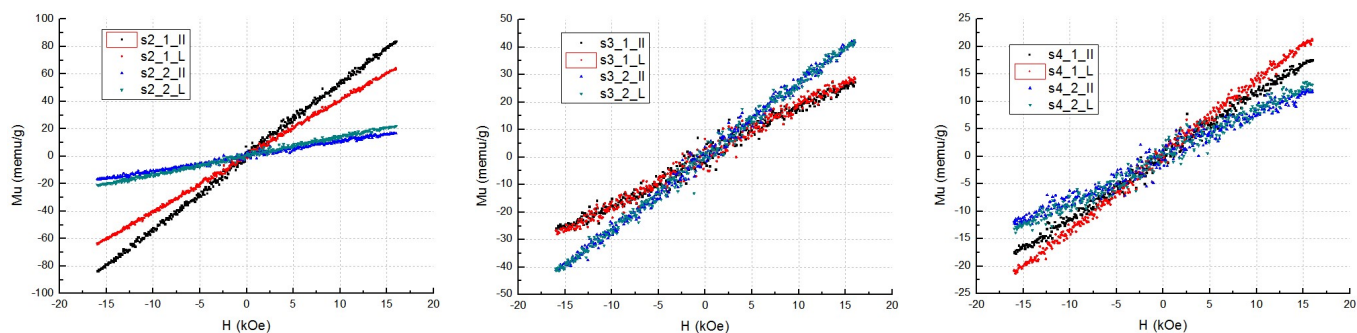


Рис 8 График зависимости намагниченности от внешнего магнитного поля для двух образцов лент S2, S3 и S4 в двух ориентациях: перпендикулярно (L) и параллельно (II) полю.

Для лент S5 и S6 различий магнитного момента края и центра ленты при комнатной температуре обнаружено не было.

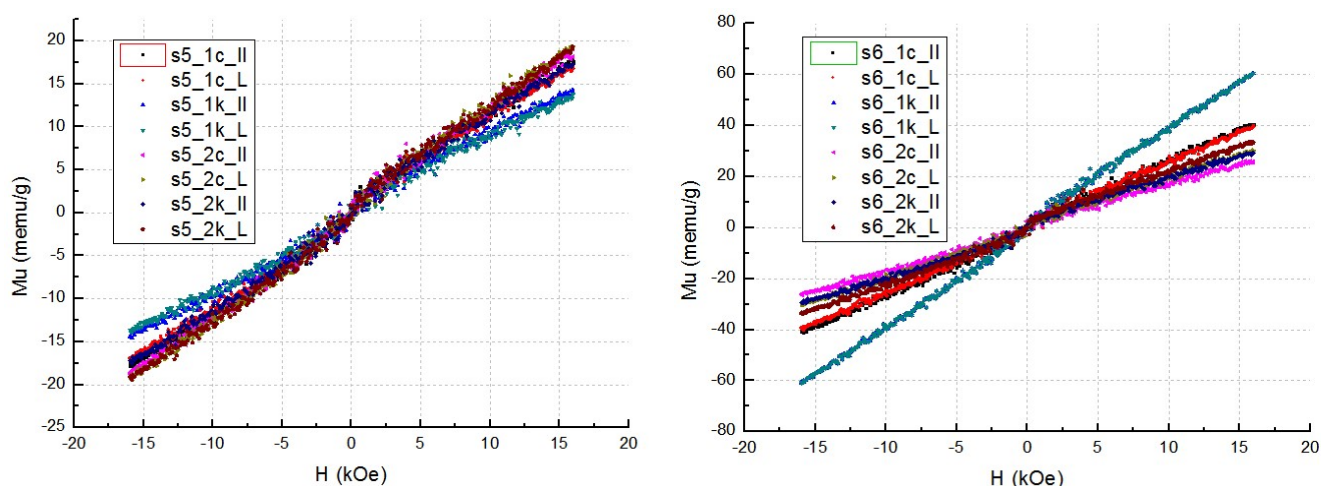


Рис 9 График зависимости намагниченности от внешнего магнитного поля для образцов с боковой (к) и центральной (с) частями лент S5 и S6 в двух ориентациях: перпендикулярно (L) и параллельно (II) полю.

При температурных измерениях образцы первоначально размагничиваются вне сверхпроводящего состояния (при $T = 95\text{K}$). Позже, уже охлажденные до 80K образцы по программе намагничиваются в поле до $H = 5000$ Э, потом поле убывает до 0 Э. Образцы имеют сильный диамагнитный отклик в малых магнитных полях. Это объясняется тем, что при малом поле сверхпроводник вытесняет магнитное поле. При увеличении внешнего воздействия, поле начинает проникать в ВТСП, сигнал постепенно переходит в парамагнитный. При размагничивании же поле уже проникшее в сверхпроводник

«замораживается» в нем, отчего и наблюдается парамагнитный сигнал размагниченного образца.

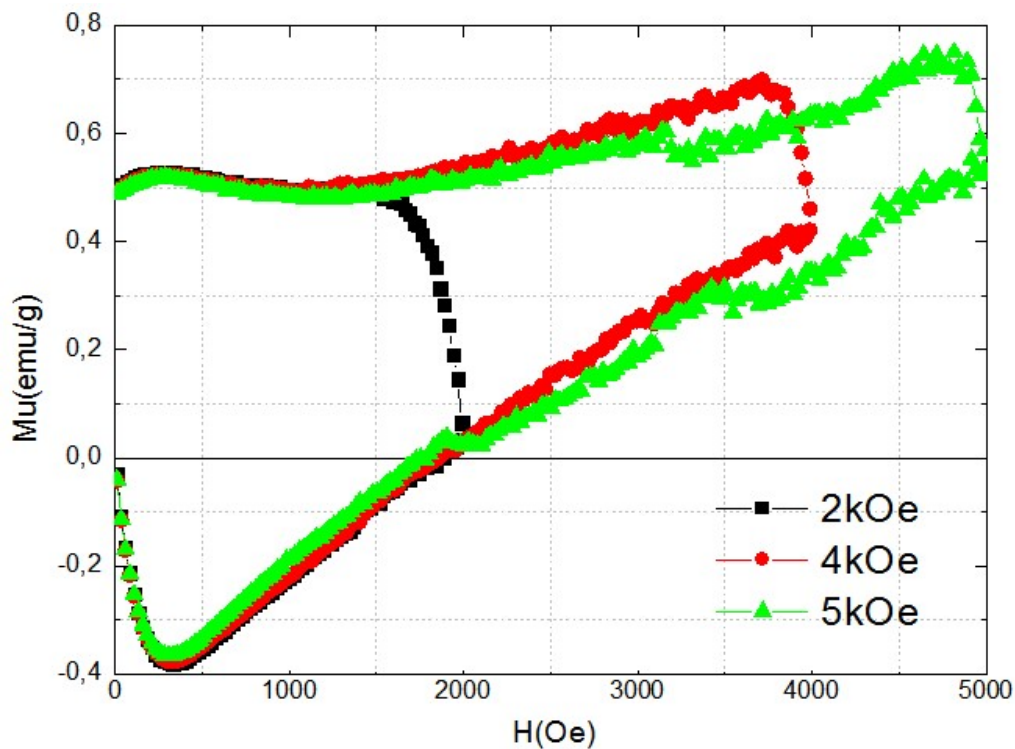
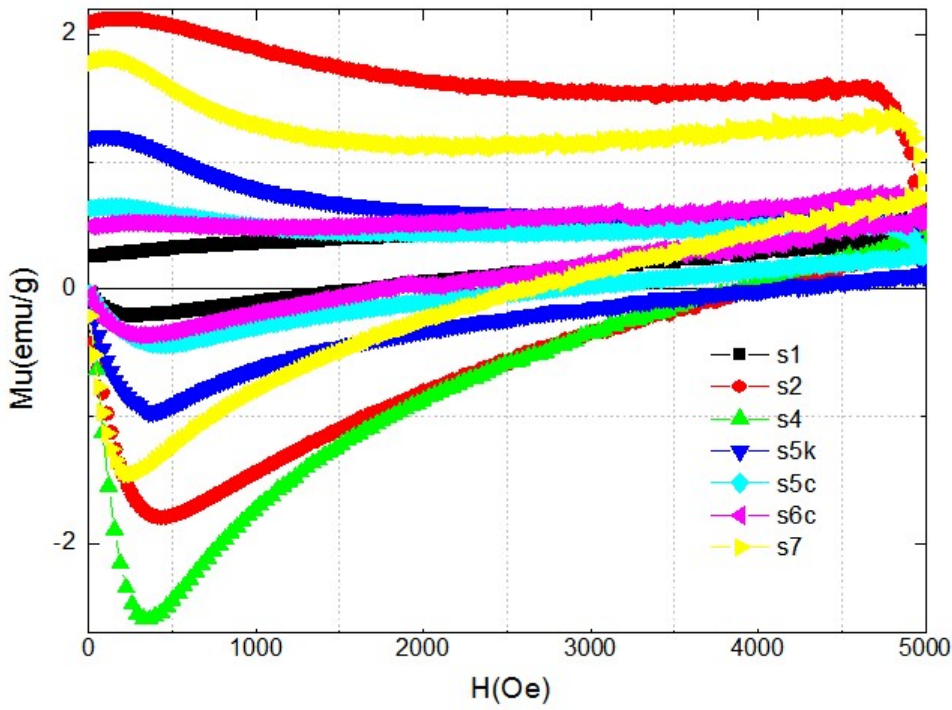


Рис.10 Кривая намагничивания и размагничивания образца Sb при температуре $T = 80\text{K}$ при различных максимумах поля намагничивания. На графике видно, что величина максимального поля намагниченности не влияет на вид кривой размагничивания.



№	$H_{\text{мин}}$ Э	M, emu/g
s1	284	-0,20
s2	435	-1,80
s4	329	-2,59
s5k	384	-0,97
s5c	434	-0,44
s6c	310	-0,37
s7	260	-1,46

Рис.11 Кривые намагничивания и размагничивания образцов S1, S2, S4, S5k, S5c, S6c, S7 (при $T = 80\text{K}$)

Таб.3 Значения экстремума намагниченности и значение поля $H_{\text{мин}}$, при котором оно достигается, для каждого из вышеперечисленных образцов.

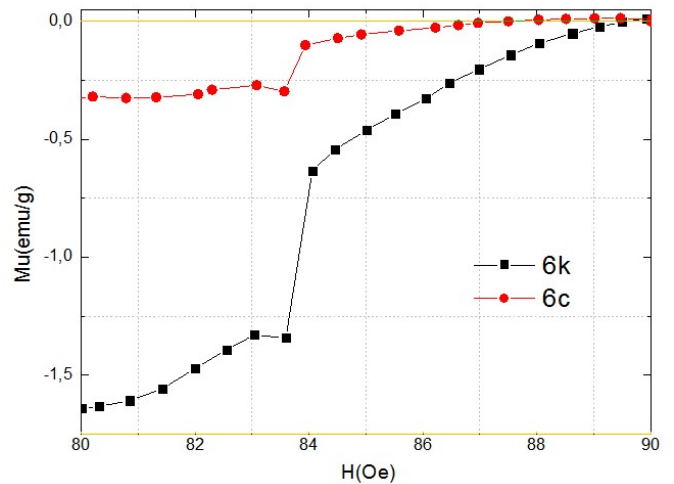
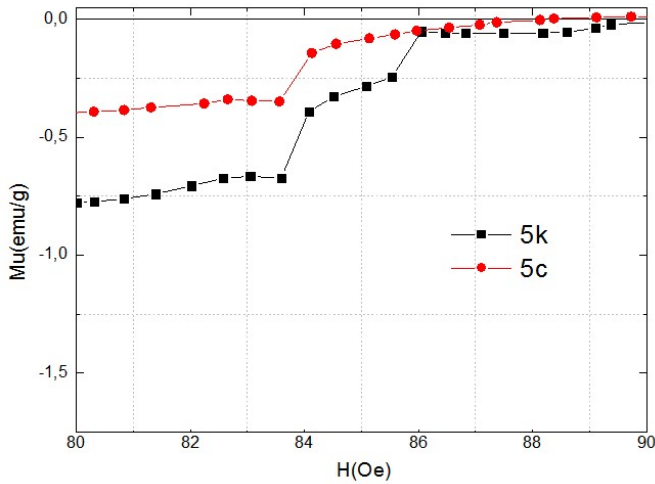


Рис 12 Температурная зависимость намагниченности (в поле $H = 350\text{Э}$) для центральной(с) и краевой(к) части лент S5 и S6. В нулевом поле в сверхпроводящем состоянии сигнал для разных частей ленты отличается, что говорит об неоднородности напыления ВТСП слоя внутри ленты

На графиках температурной зависимости удельной намагниченности видно, что до температуры $T = 83\text{K}$ значение намагниченности остается

постоянным. При последующем нагреве магнитное поле начинает проникать в сверхпроводник. При температуре $T = 89-93$ К отклик на магнитное поле становится парамагнитным (см. *Рис.12-13*). Стоит отметить, по данным для температурной зависимости сопротивления образцов, полученным ранее этот диапазон температур соответствует переходу ВТСП в резистивное состояние при малых полях.

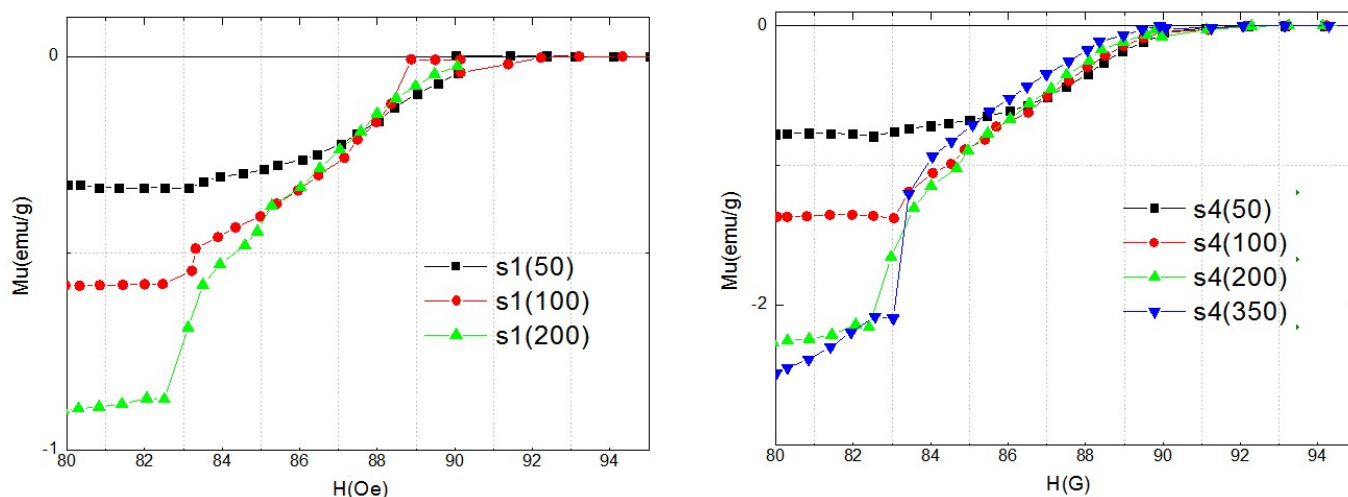


Рис.13 Температурная зависимость удельной намагниченности в различных магнитный полях 50Э, 100Э, 200Э (образец S1) и 350Э(образец S4)

Деформация ВТСП

Для исследования влияния упругих деформаций на значение плотности критического тока в ВТСП была сделана специальная установка. Первоначально исследование можно было проводить лишь для лент деформированных в резистивном состоянии. Модифицированная установка позволила деформировать образцы уже помещенные в жидкий азот, находящиеся в СП состоянии. Схема установки представлена на *Рис.14*. Метод исследования заключается в следующем: лента горизонтально помещается ванну с жидким азотом, подключается к подводющим проводам. Далее она изгибается путем смещения подводящих проводов вдоль направляющих рельс. В цепи пошагово увеличивается ток. При достижении критического значения, ВТСП слой образца переходит в резистивное состояние, ток распространяется уже по внешней оболочке ленты, тем самым

перегревая его и размыкая этот участок ленты. Критическое значение тока фиксирует измерительное устройство.

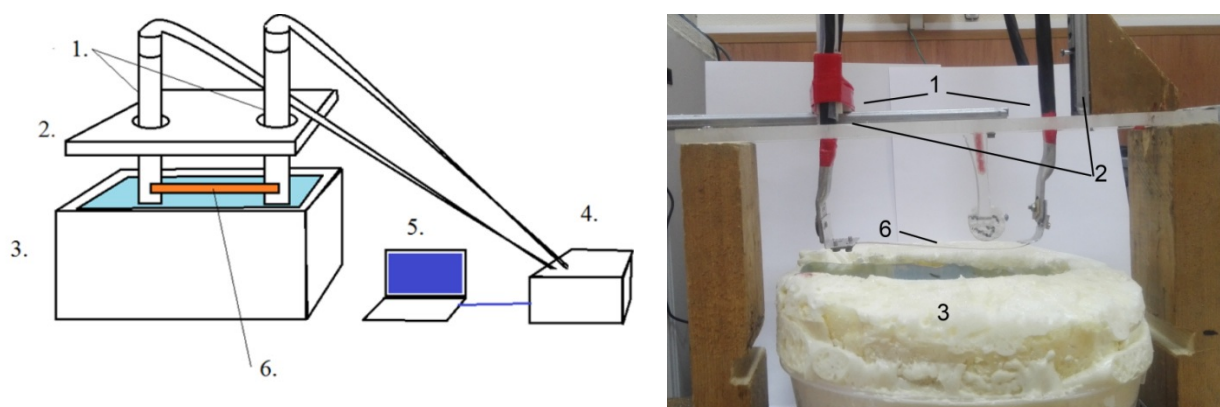


Рис.14 Схема измерительной установки и её воплощение: (1) Подводящие провода, (2) Крепление для ПП, (3) Ванна с жидким азотом, (4) Источник тока, (5) Обрабатывающее устройство, (6) Образец ВТСП

В ходе выполнения работы было обнаружено, что переход в резистивное состояние происходит в местах соединения к подводящим проводам, а не в месте изгиба ленты. Данный факт свидетельствует о том, что наибольшие деформации ВТСП создаются в момент крепления образца. Ранее полученные результаты не демонстрируют точной картины влияния деформаций разной величины на значение критического тока в ВТСП лентах. Достоверные результаты могут быть получены лишь в том случае, когда дефекты в местах крепления окажутся меньше, чем в месте изгиба ленты.

Основные результаты

В рамках данной бакалаврской работы были исследованы магнитные и температурные свойства образцов лент ВТСП состава $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$.

Были проведены исследования на вибрационном магнитометре (ВМ) различных образцов ВТСП лент при комнатной и низких температурах (80-95К), а также сняты температурные зависимости удельной намагниченности $M(T)$ в диапазоне температур от 80К до 90К. При $T = 83\text{К}$ поле начинает проникать в образец. Это подтверждают, что ВТСП $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ является СП II-го рода. Кривые намагничивания-размагничивания позволили определить минимум диамагнитного вклада для каждого вида ленты: при $T = 80\text{К}$ лежит в диапазоне $H = 350 \pm 80$ Э. Стоит отметить неоднородность напыления ВТСП материала в ленте в силу, которая подтверждается заметным различием магнитного момента в сверхпроводящем состоянии для центра и края лент S5 и S6.

Был исследован температурный переход из сверхпроводящего состояния в резистивное. Для различных образцов критическая температура оказалось равной $T_c = 94.0 \pm 0.5\text{К}$. Была получена зависимость критической температуры от внешнего магнитного поля при H от 0 до 4,4 Т.

Собрана установка для исследования влияния упругих деформаций на значение критического тока в лентах ВТСП. Выявлено, что дефекты ВТСП, приводящие к переходу в резистивное состояние участка ленты, происходят именно в местах крепления, а не в месте изгиба.

Благодарности

Автор благодарен своему научному руководителю, профессору Перову Н.С., за отзывчивое руководство бакалаврской работой, полезные обсуждения, а также за понимание и поддержку. Автор благодарит за его помощь в организации эксперимента, за полезные советы при измерениях образцов и разумную критику бакалаврской работы.

Автор выражает благодарность преподавателям, аспирантам и студентам кафедры магнетизма и, особенно, Лаборатории исследования магнитных свойств, за дружную и товарищескую атмосферу, за благоприятную среду для продуктивной научной деятельности.

Наконец, автор хотел бы поблагодарить своих родителей за поддержку во время всего периода всего обучения в бакалавриате.

Список Литературы

1. Н.Б.Брандт. Сверхпроводимость. *Соросовский Образовательный Журнал*, 1:100-107, 1996.
2. V.V. Schmidt. The Physics of Superconductors. Introduction to Fundamentals and Applications. *Springer Berlin Heidelberg*, 1997.
3. Bednorz, J. G. & Müller, K. A. Possible high T_c superconductivity in the Ba–La–Cu–O system. *Zeitschrift für Physik B Condensed Matter* **64**, 189-193, (1986).
4. А. В. Троицкий [и др.] “Поведение в магнитных полях и механические свойства низкоомных соединений GdBa₂Cu₃O_{7-δ} 2G лент” *Перспективные материалы*, № 11 - 2015 г., с. 56 - 62.

5. Koenen *et al.*: “Stainless steel as substrate material for HTS tapes processed via the ISD MgO Route,” *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, VOL. 29, NO. 4, JUNE 2019
6. S.S. Fetisov, V.V. Zubko, A.A. Nosov, N.V. Polyakova, V.S. Vysotsky. “Losses in Power Cables Made of 2G HTS Wires with Different Substrates”, *Physics Procedia* 36 (2012), P. 1319–1322.
7. V.E. Sytnikov, V.S. Vysotsky, I.P. Radchenko, N.V. Polyakova. “1-G versus 2-G – comparison from the practical standpoint for HTS power cables use,” *Journal of Physics: Conference Series* 97 (2008) 012058
8. W. Prusseit, R *at al*, “ISD process development for coated conductors,” *Physica C, Supercond. Appl.*, vol. 426–431, pp. 866–871, Jan. 2005.
9. superox.ru (сайт компании-производителя ВТСП, Москва, Россия)
10. Amit Goyal *at all* “Rolling-Assisted Biaxially Textured Substrates for High-Performance YBCO Superconductors,” *MRS BULLETIN/AUGUST 2004*
11. Maddury Somayazulu *at all* “Evidence for superconductivity above 260 K in lanthanum superhydride at megabar pressures,” *Phys. Rev. Lett.* 122, 027001 (2019)
12. A.P. Drozdov, M.I. Erements *at all* “Conventional superconductivity at 203 kelvin at high pressures in the sulfur hydride system” *Nature* 525, 73–76 (03 September 2015)
13. I. Zivkovic *at all* “Superconducting transition in ruthenocuprate $\text{RuSr}_2\text{GdCu}_2\text{O}_8$ viewed from the studies of the imaginary part of ac susceptibility” *Europhys. Lett.*, 60 (6), pp. 917–923 (2002)
14. A. P. Smith *at all* “Comparison of **C** in GdBCO tape using Dc

magnetisation and harmonic Ac susceptibility measurements” *Transactions on Applied Superconductivity*(2018)

15. Kyu Jeong Song *at all* The Magnetic Properties of Several HTS GdBCO-Coated Conductors” *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, VOL. 29, NO. 5, AUGUST 2019