

МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИЯ ДЛЯ НОВЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

УДК 538.945

ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ВТСП-ЛЕНТ МЕТОДОМ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ МАГНИТО-ОПТИЧЕСКОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

© 2024 г. М. А. Осипов^а, *, Д. А. Абин^а, И. А. Руднев^а

^аНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

*E-mail: max.vfk@gmail.com

Поступила в редакцию 04.07.2023 г.

После доработки 10.07.2023 г.

Принята к публикации 28.07.2023 г.

В настоящей работе подробно разобраны особенности применения методики магнитооптической визуализации для исследования ВТСП-лент. Представлено подробное описание методики эксперимента, особенностей исследовательской установки для исследования при низких температурах. Описаны особенности проникновения магнитного поля в сверхпроводник, подробно описана процедура калибровки магнитооптической пленки и алгоритмы вычисления профилей магнитного поля по магнитооптическим изображениям.

Ключевые слова: высокотемпературный сверхпроводник, ВТСП-ленты 2-го поколения, магнитооптическая визуализация, профиль магнитного поля

DOI: 10.56304/S2079562923010189

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы активное развитие получают технологии изготовления сверхпроводящих материалов в виде тонких композитных лент. Основным токонесущим элементом таких лент является высокотемпературный сверхпроводник (ВТСП) $REBa_2Cu_3O_{7-x}$ (где RE – редкоземельный элемент), поэтому эти ленты называются ВТСП-ленты (в английской литературе СС-ленты, от английского “coated conductor”). ВТСП ленты представляют собой структуру с достаточно сложной архитектурой. На тонкой металлической подложке (толщиной от 30 до 100 мкм) располагаются буферные слои толщиной несколько десятков нанометров, нанесенные различными физическими и химическими методами. На буферные слои осаждают непосредственно слой ВТСП толщиной порядка 1–2 мкм. После чего вся лента покрывается защитным слоем серебра толщиной несколько микрон. Далее, в зависимости от применения, лента может быть покрыта медным слоем (для улучшения термических свойств и шунтирования сверхпроводника в случае перехода в нормальное состояние) и полиамидным изоляционным слоем. Толщина итоговой ленты составляет порядка 50–100 мкм, а ширина от 4 до 12 мм, в то время как длина ленты может составлять сотни метров. ВТСП-ленты обладают высокими значениями критического тока, порядка 40 А на миллиметр ширины при температуре 77 К, что соответствует инженерной плотности тока порядка $5–10 \cdot 10^4 \text{ А/см}^2$.

Это делает ВТСП-ленты перспективным материалом для применения в области электроэнергетики, позволяя создавать высокоэффективные линии электропередачи, моторы и генераторы [1–5]. В силу того, что ВТСП-композиты также обладают высокими значениями плотности критического тока в сильных магнитных полях, это делает их привлекательными для изготовления сверхпроводящих магнитов с высокими значениями магнитного поля, что особенно актуально для применения в современных исследовательских установках: токамаках, ускорителях [6, 7]. Однако этим спектр применения ВТСП-лент не ограничен. Сильно нелинейная вольт-амперная характеристика ВТСП-лент позволяет создавать токоограничители с выдающимися характеристиками [8].

В силу того, что ВТСП является сверхпроводником второго рода, ВТСП-ленты способны пропускать магнитное поле в виде вихрей Абрикосов, которые закрепляются на центрах пиннинга, что позволяет создавать пассивно устойчивые системы левитации без активного управления [9]. Это свойство открывает широкие возможности использования объемных ВТСП в левитационных подшипниках, поездах на основе магнитной подвески (магнитная левитация), накопителях кинетической энергии, двигателях и генераторах. [9, 10]. Эта технология особенно актуальна при создании магнито-левитационного транспорта [11–16].

Во всех этих применениях крайне важна однородность свойств ВТСП-лент, а именно однород-

ность критического тока. Особенно важным является исследование поперечной локальной однородности с высоким разрешением (несколько десятков микрон), которая может указывать на наличие различных типов производственных дефектов или дефектов, вызванных механическими нагрузками при изготовлении и эксплуатации готовых изделий из ВТСП-лент. Однако наличие внешних слоев делает невозможным непосредственное исследование ВТСП-слоя с помощью оптических методик или электронного микроскопа. Транспортные измерения контактным методом сложны в использовании, не дают достаточно высокого разрешения. Также, при отсутствии медного покрытия, процедура припаивания контактов к серебряному покрытию легко приводит к его деламинации, а прижимные локальные контакты могут легко повредить сверхпроводящий слой. Более того, покрытые полиамидной изоляцией ленты не подлежат контактному измерению. Поэтому исследования однородности ВТСП-лент обычно проводятся с помощью бесконтактных методов. Самый распространенный метод характеризует продольной токонесущей способности ВТСП-лент — экспериментальная установка TAPESTAR [17, 18]. Она позволяет получать информацию о величине критического тока вдоль ленты и дает возможность измерять длинномерные ленты в жидком азоте при прокатке с катушки на катушку, поэтому является стандартным инструментом всех производителей ВТСП-лент, с помощью которой они составляют паспорт каждой конкретной произведенной ВТСП ленты. Однако для измерения локальной неоднородности в КС с хорошим пространственным разрешением необходимо использование более чувствительных локальных методов. Наиболее распространенными из них является сканирующая зондовая микроскопия Холла [19, 20] — хорошо известный метод с хорошим пространственным разрешением и относительно простой измерительной системой. Для получения более высокого разрешения используется методика магнитооптической визуализации (МОВ) (см., например, обзор [21], монографию [22]), которая также доказала свою эффективность при изучении магнитных свойств ВТСП-лент.

К настоящему времени проведен ряд исследований ВТСП-лент с применением техники магнитооптической визуализации. Так, в [23] исследовалось распределение плотности постоянного и переменного транспортного тока, в работе [24] — распространение нормальной зоны при возникновении тепловой флуктуации. МОВ методика использовалась для изучения контроля качества ВТСП-лент, спаев и кабелей на основе ВТСП-ленты [26, 27]. Также МОВ применялась для исследований механических свойств СС-лент [23]. В работах [28–30] представлены данные магнитооптических (МО) экспериментов по намагничиванию и

перемагничиванию ВТСП-ленты при различных температурах. В работе [30] проведен детальный анализ результатов магнитооптических измерений топографии поля в ВТСП-композитных лентах при различных температурах, разработана методика определения критической плотности тока из этих измерений.

В настоящей работе будет подробно разобраны особенности применения методики магнитооптической визуализации для исследования ВТСП-лент.

МЕТОДИКА МАГНИТООПТИЧЕСКОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Методика магнитооптической визуализации позволяет визуализировать распределение магнитного поля, а также получать численные значения нормальной к поверхности ленты компоненты магнитного поля. Методика основана на использовании эффекта Фарадея — вращении плоскости поляризации линейно поляризованного света в магнитном поле [31]. Для реализации методики необходимо в качестве индикаторной пленки вещество с высокой константой Верде, которая характеризует увеличение угла поворота плоскости поляризации в магнитном поле. Использование индикаторных пленок для исследования сверхпроводников накладывает дополнительные ограничения на индикаторные пленки. Они должны функционировать в широком диапазоне температур, от комнатной температуры до температуры в несколько Кельвин, а константа Верде должна слабо зависеть от температуры. Этим параметрам удовлетворяют индикаторные пленки из висмут- и галлий-содержащие иттриевые феррит-гранаты с плоскостью легкого намагничивания (B_i : ФГ пленки) [32]. Эти пленки представляют собой прозрачные монокристаллические слои, выращиваемые методом жидкофазной эпитаксии на немагнитной подложке. В качестве подложки используется прозрачный слой гадолиний-галлиевого граната. На рабочую поверхность преобразователя наносится зеркальный слой серебра или алюминия, от которого происходит отражение света. Эти пленки обладают аномально большим удельным вращением плоскости поляризации света (до 4 мкм^{-1} комнатной температуры) и высокой прозрачностью. Температура Кюри данных пленок превосходит 400 К, а константа Верде практически не меняется с изменением температуры, что делает B_i : ФГ пленки хорошим инструментом исследования ВТСП. На данный момент планарные B_i : ФГ пленки являются одним из лучших инструментов исследования в области высокотемпературной сверхпроводимости.

Рассмотрим подробнее физические принципы визуализации магнитооптического поля при помощи индикаторных пленок. Индикаторная пленка помещается непосредственно на сверхпровод-

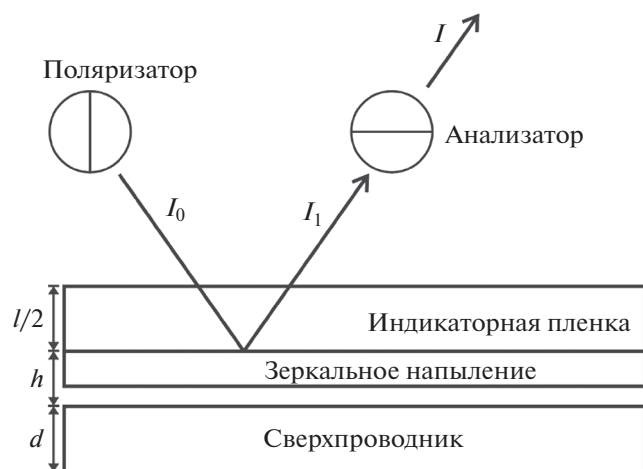


Рис. 1. Схема магнитооптического эксперимента.

ник, зеркальным слоем к сверхпроводнику (рис. 1) и освещается вертикальным линейно поляризованным светом (для удобства, на рисунке падающий и отраженный свет изображены под углом). Свет отражается от МО пленки, проходит через анализатор, после чего наблюдается визуально или попадает в цифровую камеру. Поляризатор и анализатор выставляются таким образом, чтобы, в отсутствии внешнего магнитного поля интенсивность наблюдаемого света была бы минимальной. При приложении внешнего магнитного поля, свет повернется на угол, пропорциональный вертикальной компоненте магнитного момента:

$$\alpha = C_v M_z l c a, \quad (1)$$

где C_v — постоянная Верде, M_z — вертикальная составляющая намагниченности, а l — длина пути света, то есть двойная толщина $Bi : \Phi G$.

В отсутствии магнитного поля, индикаторная пленка имеет спонтанную намагниченность M_s , которая лежит в плоскости пленки. В геометрии Фарадея угол поворота плоскости поляризации света зависит только от составляющей намагниченности M_z , нормальной к поверхности пленки, которая отсутствует в нулевом поле. При приложении перпендикулярного магнитного поля вектор спонтанной намагниченности повернется на угол

$$\varphi = \arctg \frac{B_z}{B_0}, \quad (2)$$

где B_0 — размагничивающее поле МО пленки, то есть поле, создаваемое спонтанным магнитным

моментом. Тогда нормальная составляющая намагниченности будет задаваться формулой вида

$$M_z = M_s \sin \varphi = M_s \sin \left[\arctg \frac{B_z}{B_0} \right]. \quad (3)$$

Тогда поворот плоскости поляризации света будет нелинейно зависеть от магнитного поля:

$$\alpha = C_v M_s \sin \left[\arctg \frac{B_z}{B_0} \right]. \quad (4)$$

Интенсивность света I_1 , отраженного от индикаторной пленки толщиной $l/2$ и коэффициентом поглощения γ , равна

$$I_1 = I_0 e^{-\gamma l}, \quad (5)$$

где I_0 представляет собой интенсивность падающего поляризованного светового пучка. Интенсивность света, проходящего через анализатор и регистрируемого цифровой камерой, определяется законом Малюса:

$$I = I_0 e^{-\gamma l} \sin^2 (\alpha + \Delta\alpha) = I_1 \sin^2 (\alpha + \Delta\alpha), \quad (6)$$

где $\Delta\alpha$ — отклонение взаимного положения анализатора и поляризатора от положения в 90° .

Также следует учитывать, что даже при идеально выставленных углах между поляризатором и анализатором всегда будет присутствовать остаточная интенсивность I_b даже при отсутствии магнитного поля. Это вызвано неидеальностью поляризатора и анализатора, частично пропускающими неполяризованный свет I_0 .

Другим важным фактором является пространственная неоднородность падающего света и отраженного света. Это связано с рядом факторов: пространственной неоднородностью падающего пучка (обычно интенсивность распределена по Гауссу), ненулевая константа Верде оптических компонент микроскопа, неоднородность индикаторной пленки и зеркального слоя. Небольшой вклад вносит неоднородность образца и держателя образца под индикаторной пленкой в силу частичной ее прозрачности. Все это приводит к тому к зависимости от координаты отраженной интенсивности $I_1(x, y)$ и фоновой интенсивности $I_b(x, y)$.

Учитывая вышесказанное, на основе формул (4) и (6) можно получить зависимость вертикальной составляющей индукции магнитного поля в плоскости индикаторной пленки B_z от интенсивности измеренного излучения

$$B_z(x, y) = B_0 \operatorname{tg} \left[\arcsin \left\{ \frac{1}{C_v M_s} \arcsin \left(\sqrt{\frac{I(x, y) - I_b(x, y)}{I_1(x, y)}} \right) + \Delta\alpha \right\} \right]. \quad (7)$$

Используя полученную функцию, можно провести градуировку индикаторной пленки (изме-

речь зависимость интенсивности от приложенного поля) в одной точке, после чего подогнать коэффициенты уравнения 7 и использовать полученную функцию для пересчета интенсивности магнитооптических изображений в значения индукции магнитного поля. Более подробно процедура калибровки и пересчета будет рассмотрена в соответствующем разделе статьи.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Рассмотрим принципиальное устройство установки для магнитооптических исследований на примере сделанной нами магнитооптической установки. Внешний экспериментальной установки представлена на рис. 2. Магнитооптическая пленка (1) помещается непосредственно на образец (2), который клеится теплопроводящим клеем к холодному пальцу (3) оптического гелиевого криостата (4). Внешнее магнитное поле создается с помощью резистивных магнитов (5) — катушек из медных проводов. Поле в данной установке варьируется от 0 до 42.3 мТл. Откачка криостата производится при помощи вакуумного поста (6). В рамках текущего этапа проекта для охлаждения использовался жидкий азот, который заливался в азотный стакан (7). В рамках задач данного этапа температуры кипения жидкого азота (77.4 К) было достаточно. Для охлаждения до более низких температур подается гелий из гелиевого сосуда Дьюара через переливной сиффон, который вставляется вместо азотного стакана. Система позиционирования (8) криостата позволяет поместить магнитооптическую пленку в фокус поляризационного микроскопа (9). Запись оптических изображений производится при помощи цифровой камеры (10). Полученные изображения могут быть в дальнейшем переведены в распределение магнитного поля, проникающего в ВТСП ленту.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Типичное магнитооптическое изображение представлено на рис. 3. Представлены результаты при внешнем магнитном поле 33 мТл. Индикаторная пленка лежит на ВТСП-ленте. Яркость индикаторной пленки соответствует величине магнитного поля — чем ярче индикаторная пленка, тем выше величина магнитного поля. В той области, где индикаторная пленка располагается над ВТСП-лентой, она показывает профиль проникновения магнитного поля в ВТСП-ленту. Также видно, что вне ленты пленка светлая и однородная, что соответствует внешнему магнитному полю. Внешнее поле проникает в ВТСП ленту в виде вихрей Абрикосова. Градиент интенсивности индикаторной плен-

ки говорит о градиенте проникшего в ВТСП внешнего поля. Устанавливается градиент магнитного поля, который, согласно модели Бина [33] с поправкой на геометрический фактор ВТСП-ленты, пропорционален критической плотности тока ленты. Поэтому чем выше глубина проникновения, тем выше критический ток ленты. Более подробное исследование формы профилей проникновения магнитного поля в ВТСП представлены в работах [28–30], в данной работе сосредоточимся на интерпретации результатов магнитооптического эксперимента. В центральной части ленты есть область, куда магнитное поле не проникло, поэтому интенсивность в этой области соответствует фоновым значениям интенсивности. Также видно, что вблизи краев ленты индикаторная пленка более яркая, следовательно, магнитное поле в этой области выше. Это вызвано сгущением линий магнитного поля, вытесненного из ленты.

КАЛИБРОВКА МАГНитоОПТИЧЕСКОЙ ПЛЕНКИ И РАСЧЕТ ПРОФИЛЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Для получения численных значений магнитного поля необходима предварительная градуировка магнитооптической пленки. Согласно (7) зависимость можно представить в виде:

$$B_z(x, y) = \varphi(i), \quad (8)$$

где i — нормированная интенсивность, которая является числом в диапазоне от 0 до 1:

$$i = \frac{I(x, y) - I_b(x, y)}{I_1(x, y)}. \quad (9)$$

В силу того, что на практике калибровка индикаторной пленки в каждой точке изображения является невыполнимой или очень трудной задачей, калибровку производят в одной точке ($x = a, y = b$).

Измеряется зависимость $I(B_z^{ext})$ интенсивности от внешнего магнитного поля, после чего вычитается фон и производится нормировка интенсивности так, чтобы максимальное поле (поле засветки) соответствовало максимальной интенсивности. По результатам измерения мы получаем зависимость нормированной интенсивности от поля, которая представлена на рис. 4. Практика показывает, что данная зависимость не зависит от выдержки и других параметров съемки, и характерна для данной конкретной магнитооптической пленки. Поэтому данная зависимость может быть измерена один раз и использована для калибровки. Из графика на рис. 4 видно, что зависимость хорошо аппроксимируется квадратичной функцией (с коэффициентом достоверности аппроксимации R^2 порядка 0.9993), откуда легко может быть

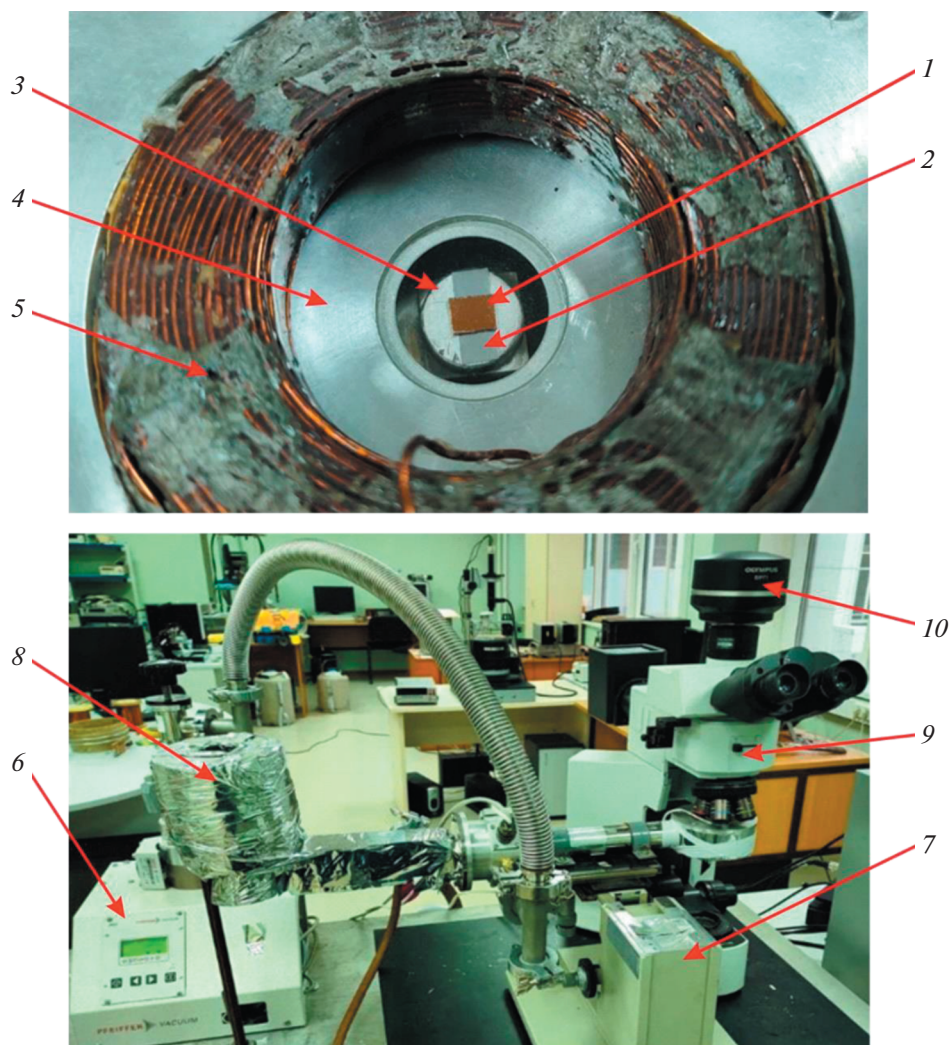


Рис. 2. Внешний вид установки по магнитооптической визуализации распределения магнитного поля: 1 — магнитооптическая пленка; 2 — исследуемый образец; 3 — холодный палец; 4 — оптический гелиевый криостат проточного типа; 5 — резистивные магниты; 6 — вакуумный пост; 7 — азотный стакан; 8 — система позиционирования; 9 — поляризационный микроскоп; 10 — цифровая камера.

рассчитана зависимость $B_z(i)$, которая является корневой. Это хорошо согласуется с формулой (7), которая при разложении в ряд Тейлора дает ряд со степенями $i^{(2n+1)/2}$, где n — целое неотрицательное число.

Тогда процедура пересчета измеренной интенсивности заключается в следующем. Производится съемка фонового МО изображения ВТСП-ленты при нулевом магнитном поле (рис. 5а) и МО изображения проникновения магнитного поля в ВТСП-ленту при необходимой величине внешнего магнитного поля (рис. 5б). Изображения пересчитываются в профили интенсивности (рис. 5в). После чего из профиля проникновения магнитного поля вычитается фоновый профиль, полу-

ченный профиль корректируется в соответствии с фоновым изображением

$$I_N(x, y) = [I(x, y) - I_b(x, y)] \frac{I_b(x, y)}{I_b(a, b)}, \quad (10)$$

где a, b указывают на положение на изображении, где была записана калибровочная кривая, либо, на положение, где известно величина магнитного поля. Проблема в том, что калибровку нужно производить при температурах выше критической температуры ВТСП. После чего при охлаждении возможно смещение положения образца на холодном пальце криостата в силу термического сжатия держателя образца. Поэтому обычно за a, b принимают точку с известным значением поля, например, за пределами ВТСП ленты, где по-

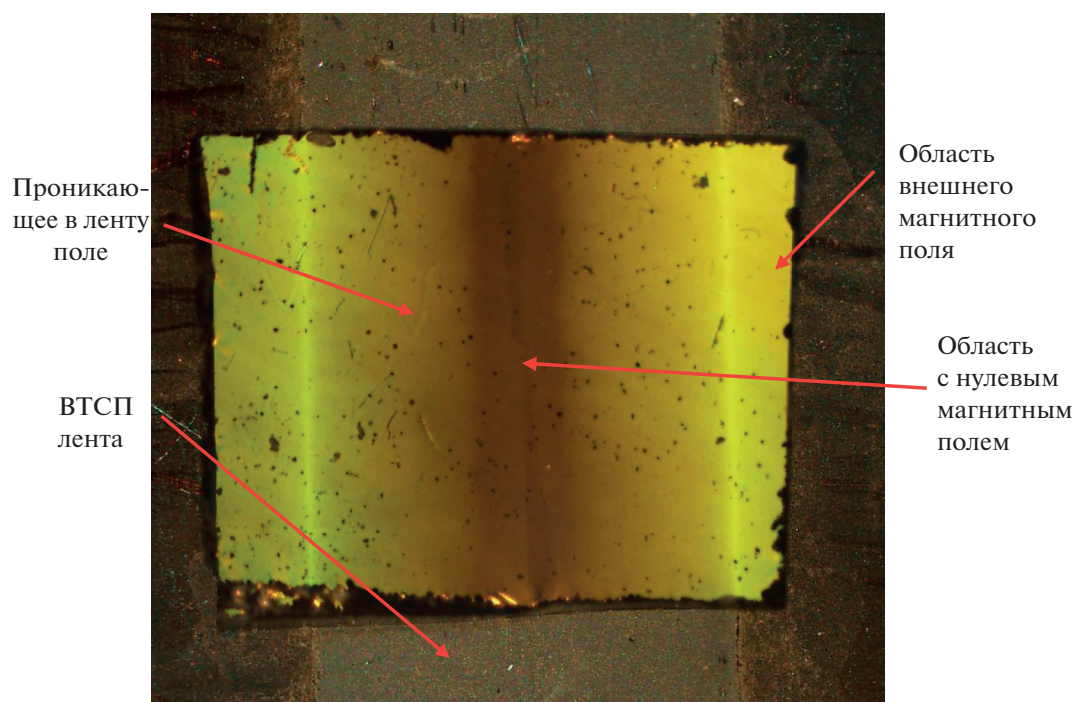


Рис. 3. Магнитооптическое изображение ВТСП ленты, находящейся во внешнем поперечном магнитном поле 33 мТл. Температура 77 К.

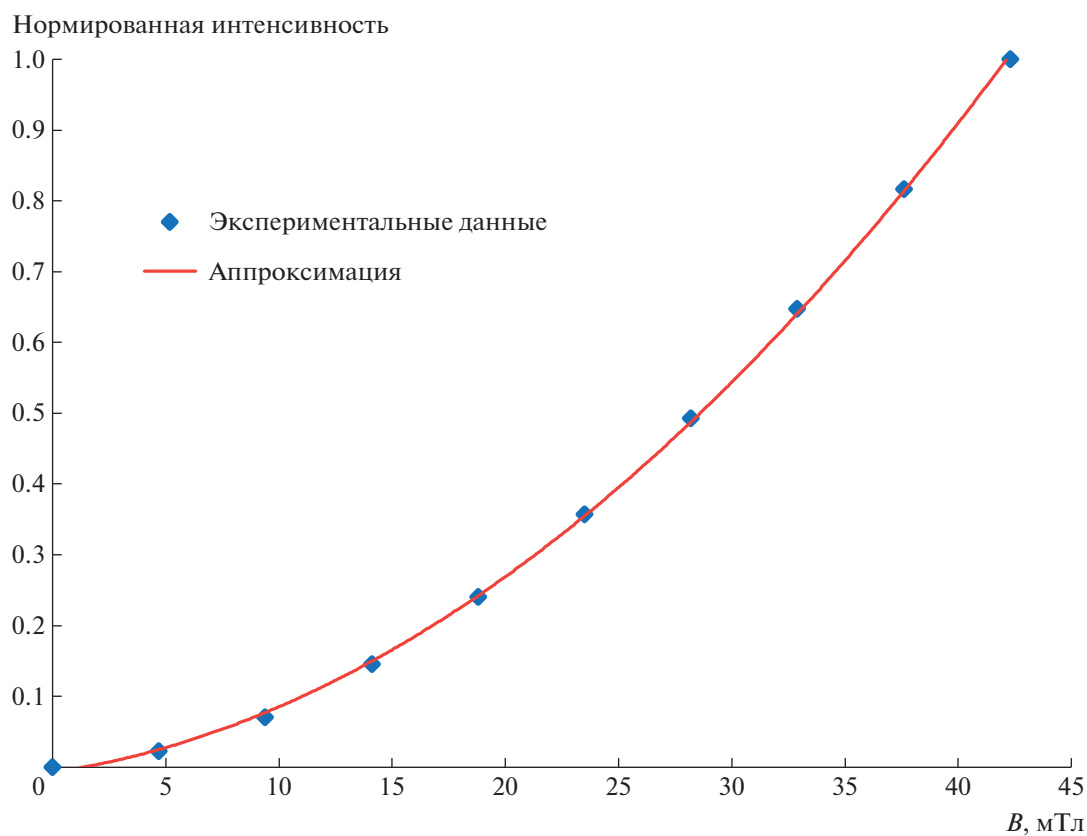


Рис. 4. Зависимость нормированной интенсивности магнитооптической пленки от индукции внешнего магнитного поля.

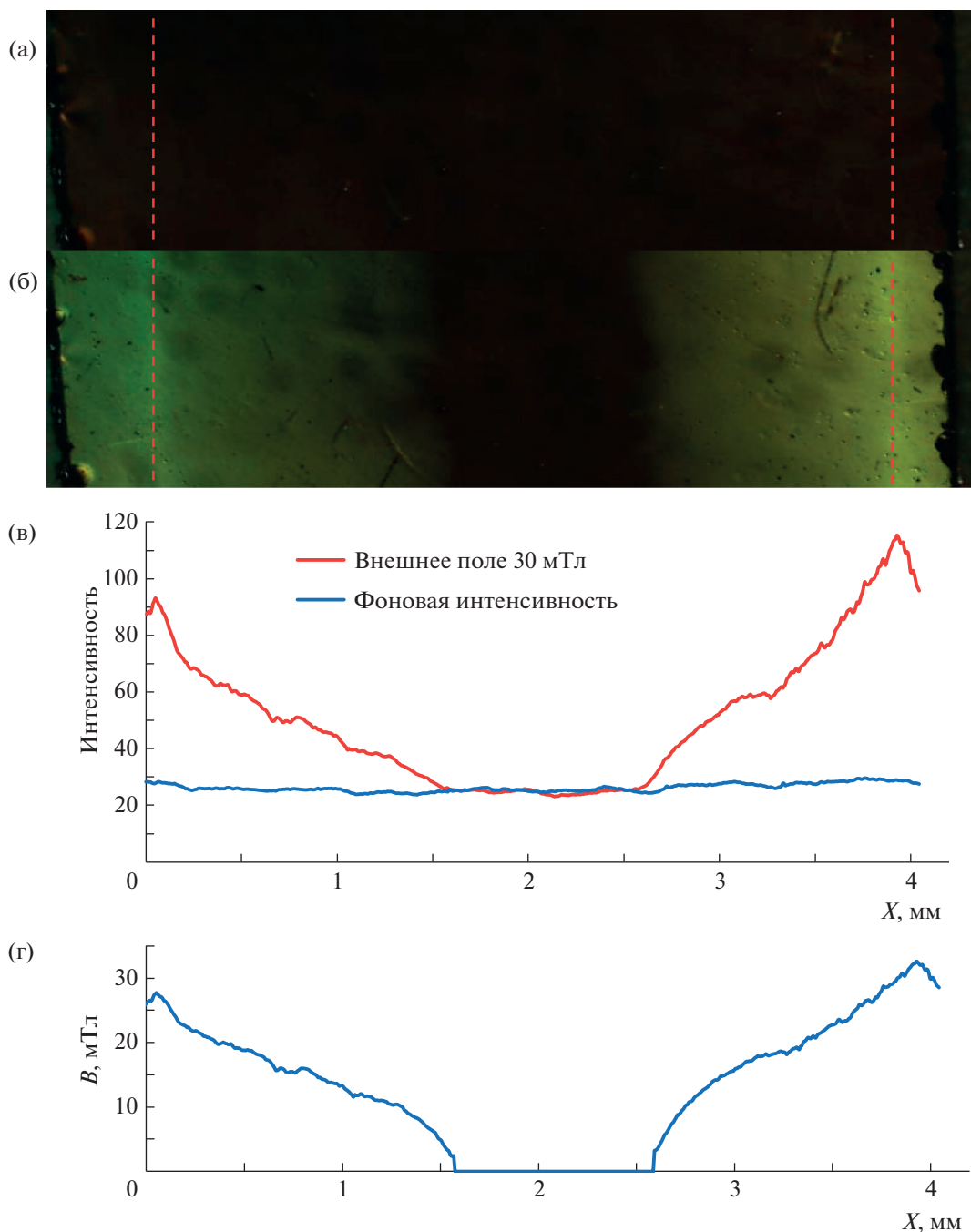


Рис. 5. Изображения магнитооптической индикаторной пленки над ВТСП-лентой без внешнего магнитного поля (а) и во внешнем магнитном поле 30 мТл (б). ВТСП лента находится под индикаторной пленкой и не видна на изображениях, границы ленты обозначены красными пунктирными линиями. Из изображений рассчитаны поперечные профили интенсивности (в) и итоговый профиль проникновения магнитного поля в ВТСП-ленту при внешнем магнитном поле 30 мТл (г). Температура измерения 77.5 К.

ле соответствует внешнему полю. После корректировки интенсивности вычисляется нормированная интенсивность $i(x, y)$

$$i(x, y) = i(a, b) \frac{I_N(x, y)}{I_N(a, b)}, \quad (11)$$

где $i(a, b)$ – значение нормированной интенсивности при величине поля в точке (a, b) . В нашем случае это значение $i(a, b)$ при величине 30 мТл, полученное из зависимости на графике, изображенном на рис. 4. Тогда итоговый профиль проник-

новения магнитного поля рассчитывается из $i(a, b)$ по известной корневой зависимости $B_z(i) = \Phi^{-1}(i)$. Полученный профиль представлен на рис. 5в. Несимметричность профиля может быть объяснена непараллельностью МО-пленки и сверхпроводящего слоя, возникающей вследствие неидеального прилегания МО пленки и сверхпроводящей ленты. В основе ВТСП лент лежит металлическая подложка, полученная прокатными методами, поэтому она не является идеально ровной, всегда имеет некоторую кривизну в поперечном разрезе. Остальные слои наносятся методами напыления и осаждения. Поэтому форма ленты повторяет форму подложки. Это приводит к тому, что индикаторная пленка всегда будет неидеально прилегать в ВТСП ленте, всегда будет образовываться небольшой угол между плоскостью ВТСП и плоскостью МО пленки. Поскольку отношение ширины ленты к расстоянию h между МО слоем и ВТСП слоем (см. рис. 1) очень велико, даже малый угол может привести к сильному увеличению h в одной части МО пленки по сравнению с другой, что приводит к сильному падению поля в этой области. В работе [30] было показано, что угол между ВТСП и МО пленкой в 1° может приводить к искажению профиля порядка 15%. Подобная картина наблюдается на профиле на рис. 5г. Разница в высоте пиков объясняется непараллельностью МО пленки и ВТСП ленты, вызванной неидеальностью формы ВТСП-ленты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлено подробное описание методики низкотемпературной магнито-оптической визуализации и изложены основные детали ее применения для исследования высокотемпературных сверхпроводящих лент. Описанная процедура калибровки магнитооптической пленки и процедуры вычисления профилей магнитного поля дает представления об основных методах обработки магнитооптических изображений.

Следует отметить, что из-за наличия защитных и шунтирующих слоев в ВТСП лентах, метод низкотемпературной магнитооптической визуализации является практически единственным безальтернативным способом исследования однородности ВТСП лент с высоким пространственным разрешением в 5–10 мкм.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00394, <https://rscf.ru/project/23-19-00394/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Supreeth D.K. et al.* // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2022. V. 32 (3). P. 1–15.
2. *Zhang H., Mueller M.* // Supercond. Sci. Technol. 2021. V. 34 (4). P. 045018.
3. *Zimmermann A.W. et al.* // Energy Rep. 2020. V. 6. P. 180–188.
4. *Ciceron J. et al.* // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2018. V. 28 (4). P. 5701005.
5. *Uglietti D.* // Supercond. Sci. Technol. 2019. V. 32 (5). P. 053001.
6. *Zhai Y., Brown T., Menard J.E., van der Laan D.C., Weiss J.D., Johnson Z.* // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2022. V. 32 (6). P. 4203005.
7. *Rossi L., Senatore C.* // Instruments. 2021. V. 5 (1). P. 8. <https://doi.org/10.3390/instruments5010008>
8. *Zhu J., Chen S., Jin Z.* // Electronics. 2022. V. 11 (3). P. 297. <https://doi.org/10.3390/electronics11030297>
9. *Brandt E.H.* // Science. 1989. V. 243. P. 4889.
10. *Bernstein P., Noudem J.* // Supercond. Sci. Technol. 2020. V. 33. P. 033001.
11. *Werfel F.N. et al.* // Supercond. Sci. Technol. 2012. V. 25. P. 014007.
12. *Webster J.G., Stephan R.M., de Andrade R., Ferreira A.C., Sotelo G.G.* Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering. 2017. United States: Wiley InterScience. P. 1–18.
13. *Wang J. et al.* // Physica C Supercond. 2002. V. 378–381. P. 809–814.
14. *Schultz L. et al.* // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2005. V. 15 (2). P. 2301–2305.
15. *Sotelo G.G., de Oliveira R.A.H., Costa F.S., Dias D.H.N., de Andrade R., Stephan R.M.* // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2015. V. 25 (3). P. 1–5.
16. *Deng Z. et al.* // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2016. V. 26 (6). P. 3602408.
17. www.theva.com/
18. *Furtner S., Nemetschek R., Semerad R., Sigl G., Prusseit W.* // Supercond. Sci. Technol. 2004. V. 17. P. S281–S284.
19. *Fuger R., Hengstberger F., Eisterer M., Weber H.W.* // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2007. V. 17 (2). P. 3753–3756.
20. *Higashikawa K., Shiohara K.* // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2012. V. 22 (3). P. 5–8.
21. *Jooss Ch., Albrecht J., Kuhn H., Leonhardt S., Kronmuller H.* // Rep. Prog. Phys. 2002. V. 65. P. 651.
22. *Johansen T.H., Shantsev D.V.* Magneto-Optical Imaging. NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry. 2004. London: Springer Dordrecht. V. 142.
23. *Villaume A., Porcar L., Bourgault D., Antonevici A., Caroff T., Leggeri J.P., Villard C.* // Supercond. Sci. Technol. 2008. V. 21. P. 034009.

24. Song H., Davidson M.W., Schwartz J. // *Supercond. Sci. Technol.* 2009. V. 22. P. 062001.
25. Jung Y., Kwak K., Lee W., Rhee J., Youm D., Yoo J., Han Y.H., Park B.J. // *Supercond. Sci. Technol.* 2012. V. 25. P. 065001.
26. Wang X., Kamiya Y., Ishiyama A., Yagi M., Maruyama O., Ohkuma T. // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2012. V. 22. P. 5801004. <https://doi.org/10.1109/TASC.2012.2184790>
27. Abraimov D., Gurevich A., Polyanskii A., Cai X.Y., Xu A., Pamidi S., Larbalestier D., Thieme C.L.H. // *Supercond. Sci. Technol.* 2008. V. 21. P. 082004.
28. Руднев И.А., Осипов М.А. // *Изв. РАН: Сер. физ.* 2013. Т. 77 (3). С. 369–372.
29. Rudnev I., Osipov M. // *J. Supercond. Nov. Magn.* 2014. V. 27. P. 951–954.
30. Применко А.Э., Осипов М.А., Руднев И.А. // *ЖТФ*. 2017. Т. 87 (9). С. 1336–1345.
31. Faraday M. // *Phil. Trans. Philos. Trans. R. Soc. London.* 1846. V. 136. P. 1–20. <https://www.jstor.org/stable/108303>.
32. Dorosinskii L.A., Indenbom M.V., Nikitenko V.I., et al. // *Physica C Supercond.* 1992. V. 203. P. 149. [https://doi.org/10.1016/0921-4534\(92\)90521-D](https://doi.org/10.1016/0921-4534(92)90521-D)
33. Bean C.P. // *Rev. Mod. Phys.* 1964. V. 61. P. 31.

Peculiarities of Investigation of HTS Tape by Low-Temperature Magneto-Optical Visualization

M. A. Osipov¹, *, D. A. Abin¹, and I. A. Rudnev¹

¹*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia*

*e-mail: max.vfk@gmail.com

Received July 4, 2023; revised July 10, 2023; accepted July 28, 2023

Abstract—In this paper, we analyze in detail the features of the application of the magneto-optical imaging technique for studying HTS tapes. We present a detailed description of the experimental technique, features of the research facility for low temperatures research. The features of the penetration of a magnetic field into a superconductor are described, the procedure for calibrating a magneto-optical film and algorithms for calculating magnetic field profiles from magneto-optical images are described in detail.

Keywords: high-temperature superconductor, 2nd generation HTS tapes, magneto-optical imaging, magnetic field profile