

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 621.317.4

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ
ХОЛЛОВСКИЙ 3D-МИКРОСКОП

© 2026 г. Х. Р. Ростами*, И. П. Никитин

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова

Российской академии наук

Россия, 141190, Фрязино Московской обл., пр. Введенского, 1

**E-mail: rostami@ms.ire.rssi.ru*

Поступила в редакцию 17.03.2026

После доработки 30.04.2026

Принята к публикации 08.09.2026

На основе преобразователей Холла разработан высокочувствительный растровый микроскоп повышенного пространственного разрешения с площадью обзора $5 \times 5 \text{ мм}^2$. Дифференциальная методика с фиксацией начала и конца перемещения датчика обеспечивает точность сканирования по осям X , Y , Z около 10 и около 1 мкм, соответственно в грубом и плавном диапазонах. Конструкция микроскопа позволяет измерять не только постоянное, но и переменное магнитное поле в широком диапазоне магнитных полей и частот. Микроскоп применяется для измерения топологии магнитного поля $B(X, Y, Z)$ на поверхности и вокруг образцов без применения формул электродинамики. Это позволяет исследовать пространственно-временные характеристики монокристаллических и поликристаллических высокотемпературных сверхпроводников $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ и $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$.

Ключевые слова: преобразователи Холла, холловский микроскоп, дифференциальная методика, высокотемпературные сверхпроводники, границы двойникования.

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследованию вихревых структур в высокотемпературных сверхпроводниках (ВТСП) $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO) и $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ (BSCCO) посвящено большое число работ, так как детальное изучение свойств вихрей, их динамики и пиннинга является одним из способов получить более глубокое понимание микроскопических механизмов сверхпроводимости [1–7]. Достаточно подробно изучены, например, поля рассеяния вихрей в зависимости от вихревой структуры и пиннинга, особенности взаимодействия вихрей с искусственно созданным наномасштабным периодическим ландшафтом пиннинга, а также вихревые

состояния со структурой вихря, отличной от абрикосовской вихревой нити, и фазовые переходы между вихревыми состояниями [1, 2]. С увеличением внешнего поля двойниковые ВТСП распадаются на нанокристаллиты [3, 4], размеры которых сравнимы с пространственными размерами вихрей. Поэтому явления, связанные с размерами центров пиннинга и их распределением по поверхности образца, а также со взаимодействием между вихрями, будут завуалированы. Изучение этих явлений требует разработки новых прецизионных методик, позволяющих с большой контрастностью выделить границы двойникового (ГД) и селективно изучать физические процессы вблизи и на ГД.

Хорошим подходом для изучения физических процессов и структуры ВТСП может служить исследование особенностей проникновения (выхода) и захвата магнитного потока (ЗМП) дефектами образца и пространственного распределения параметров ЗМП в таких средах [3, 4]. Микроскопы на основе пьезопреобразователей с верхним пределом перемещений в несколько десятков микрон позволяют наблюдать распределение ЗМП вблизи и на ГД и смещение вихрей на расстояниях около $10 \text{ \AA}$. Однако их использование требует применения сложных схем коррекции из-за гистерезиса и нелинейности перемещения [8]. Для исключения гистерезиса при прямом и обратном перемещениях координатных столиков очень важно точно фиксировать начальные точки измерений.

Как было показано в работах [3, 4, 9], использование фронта переменного осциллирующего затухающего локального магнитного поля (ОЗЛМП) в качестве зондирующего поля позволяет существенно улучшить пространственное разрешение холловского микроскопа и повысить точность измерений. В отличие от традиционных методик, такой способ позволяет одновременно исследовать как кристаллические, так и магнитные микросостояния объектов и обнаруживать незначительные пространственные разбросы локальных характеристик образца. Например, использование ОЗЛМП в качестве зондирующего поля позволило обнаружить и исследовать мелкомасштабные ГД, а также замаскированные ГД больших размеров [3, 4] в эпитаксиальных пленках и монокристаллических и квазимонокристаллических ВТСП-образцах.

Разработанные к настоящему времени микроскопы в основном применяются для получения двумерной картины распределения поля, а для построения трехмерной картины применяются модели и программы с использованием формул электромагнетизма. Корректное построение 3D-картины удастся осуществить лишь для структур с ранее известной топологией [10]. При исследовании пространственного распределения параметров неоднородных полей и полей размагничивания поликристаллических образцов 3D-картину распределения поля можно получить только с помощью непосредственных измерений [9].

В настоящей работе описан высокочувствительный низкотемпературный трехмерный растровый холловский микроскоп, позволяющий проводить исследование объектов локальным и нелокальным способами с высокими линейностью и пространственным разрешением и получить подробную информацию о важных микроскопических и макроскопических параметрах сверхпроводников безотносительно к геометрии исследуемого образца.

2. КОНСТРУКЦИЯ МИКРОСКОПА

Структурная схема системы позиционирования микроскопа показана на рис. 1. Конструкция столиков X - и Y -перемещения представлена на рис. 2 в увеличенном масштабе. На рис. 3 изображена сборная конструкция системы позиционирования микроскопа.

Рис. 1. Структурная схема системы позиционирования микроскопа...

Рис. 2. Конструктивная схема столиков X - и Y -перемещения в увеличенном масштабе...

Рис. 3. Сборная конструкция системы позиционирования микроскопа с изображением омических контактов...

Соответствие между X -, Y - и Z -перемещениями образца на координатном столике и напряжениями потенциометров позиционирования устанавливается следующим образом. Сначала задается минимальное расстояние 1 мкм между строго параллельными тщательно отполированными поверхностями направляющей оправы с образцом 2 и медным диском 3, в котором установлены преобразователи Холла (ПХ). Для этого подложка из NdGaO_3 толщиной 1 мм устанавливалась в оправе 12 (см. рис. 1), внутри которой имелась выемка глубиной 1 мм, а затем оправа с подложкой устанавливалась внутри направляющей 18 и фиксировалась с помощью винтика 17. Далее с помощью Z -перемещения обеспечивался контакт между винтиком 6 и направляющей оправой с образцом 18. Винтик 6, создающий омический контакт с направляющей оправы с образцом 2, ввинчивался через изолятор 7 в медный диск 3. Затем после фиксации разрыва контакта, что соответствовало минимальному зазору между медным диском 3 и направляющей оправы с образцом 2 (см. рис. 3), направляющая оправы с образцом 2 отодвигалась на 2 мкм с помощью дифференциального микровинта Z -перемещения. После этого ввинчиванием винтика 6 устанавливался омический контакт с направляющей оправы с подложкой 2. Далее направляющая оправы с образцом 2 отодвигалась на 10 мм, и установленная подложка заменялась подложкой из NdGaO_3 толщиной 1 мм, на поверхность которой была нанесена эпитаксиальная пленка YBCO толщиной около 1 мкм. После этого осуществлялось Z -перемещение направляющей оправы с

образцом 2 к винтику 6 до фиксации омического контакта. Затем винтик 6 отвинчивался до разрыва контакта, после чего проводилось измерение.

Размеры и толщина отполированной с обеих сторон подложки задавались заранее, исходя из технологических требований напыления пленок. Медная оправка с углублением строго по толщине подложки также позволяла выполнить замену подложки на пленку с боковой стороны, не меняя заранее установленный зазор между образцом и ПХ. Кроме того, толщина подложки и образца дополнительно измерялась с помощью микроскопа. Для этого сначала с помощью двух омических контактов по оси Z (сверху и снизу) устанавливалась толщина подложки (один из винтиков фиксировался, а другой регулировался). Точность зазора 2 мкм контролировалась также с помощью экстраполяции кривой $B(Z)/B^{\max}(0)$ к оси ординат, смещенной по оси Z на 2 мкм. Такую процедуру настройки необходимо проводить перед измерениями и для образцов другой толщины. Это позволяет компенсировать люфты резьбы микровинта при прямом и обратном перемещениях образца по оси Z .

Таким же образом задавались и контролировались начало и конец перемещения столиков в X - и Y -направлениях. Перемещение столиков в трех направлениях регулировалось дифференциальными микровинтами, редукторами и вращающими механизмами с точностью 10 и 1 мкм соответственно в грубом и плавном диапазонах. Вращающие механизмы, управляющие работой червячных передач, подключены к синхронным двигателям СД-54, которые имели скорость 60 оборотов в минуту и позволяли менять направление вращения путем переключения емкости. Работа двигателей управлялась с помощью электроники путем фиксации начала и конца перемещения в направлениях X , Y , Z по сигналу от омических контактов. Это позволяло существенно повысить точность перемещения в трех направлениях независимо от размера рабочей поверхности датчика.

На рис. 4 приведена сборная конструктивная схема верхней части газопроточного микрокриостата с механизмами вращения в плоскости XY и дифференциальными винтами регулирования Z -перемещения.

Рис. 4. Сборная конструктивная схема верхней части газопроточного микрокриостата с механизмами X - и Y -вращения

Для измерения зависимости $B(Z)$ в автоматическом режиме в микроскопе вместо ручного управления дифференциальными винтами 15, 16, 17 Z -перемещения предусмотрены независимые вращающие механизмы, подключенные к синхронным двигателям СД-54 (на рис. 4 не показаны). Такой механизм позволял плавно и с высокой точностью менять расстояние между поверхностью образца и ПХ. Потенциометры 11 и 12 X - и Y -перемещений использовались в случае экспресс-измерений, когда зондирование выделенных областей образца проводилось автоматически с помощью компьютера. Сильфоны 7, 8 использовались

с целью исключения передачи вибрации вращающихся механизмов (из-за работы двигателей СД-54) стержням 18, 19 ходовых гаек столиков X- и Y-перемещения. Внутренние отверстия втулок 22, 23, 28 были изготовлены с помощью развертки, благодаря чему обеспечивался минимальный зазор между внутренними поверхностями втулок и поверхностями стержней червяков X- и Y-перемещения. Это позволяло обеспечить максимально прецизионное и равномерное перемещение ходовых гаек X- и Y-столиков в микроскопе. Дифференциальные винты 15, 16, 17 обеспечивали жесткое перемещение вращающихся механизмов вверх или вниз при заданном расстоянии между поверхностью образца и ПХ.

3. ПРИНЦИП РАБОТЫ МИКРОСКОПА

Для построения нормированных осевых распределений $B(X)/B(0)$, $B(Y)/B(0)$ и $B(Z)/B(0)$ кубик малого размера с тремя одинаковыми по техническим характеристикам ПХ на трех взаимно перпендикулярных гранях закреплялся на трехкоординатный столик микроскопа. Таким образом измерялись компоненты B_x , B_y , B_z , величина $B = (B_x^2 + B_y^2 + B_z^2)^{1/2}$ и тензоры магнитного поля произвольного направления.

Для контроля параллельности сканирования поверхности образца было использовано радиальное распределение плотности ЗМП для однородно намагниченных эпитаксиальных пленок YBCO. При изменении угла наклона между поверхностями образца и преобразователя Холла изменялись показания ПХ. Чтобы убедиться, что этот угол не меняется при перемещения ходовых гаек, были построены зависимости $B_z(X)$ и $B_z(Y)$ в прямом и в обратном направлениях сканирования. Таким образом, по показаниям ПХ определялась степень параллельности сканирования образца по отношению к поверхности ПХ, что не накладывает жестких ограничений на точность установки и геометрические характеристики образцов. Для юстировки X- и Y-столиков также было использовано радиальное распределение намагниченности однородно намагниченной магнитной пленки. Для исключения гистерезиса при перемещения по оси Z были построены зависимости $B_{tr}(Z)/B_{tr}^{max}(0)$ в прямом и обратном направлениях сканирования.

Сигналы положения образца по координатам X и Y вырабатывались многооборотными потенциометрами, связанными с поворотными тягами и червячными передачами. После установки образца координатный столик выводится в положение, соответствующее краю линии, проходящей примерно посередине длинной стороны плоскости образца. Устанавливается соответствие между механическими перемещениями образца в направлениях X, Y, Z и соответствующими напряжениями многооборотных потенциометров позиционирования. Затем устанавливается нужная температура в измерительной камере и проводится настройка электронной схемы магнитометра. После

выбора размера поля обзора интересующего участка и задания значений координат Y , Z образец перемещается относительно ПХ вдоль оси X . Для каждого значения координаты X измеряется величина поля, и данные автоматически считываются компьютером. После окончания сканирования по оси X вводится новое значение координаты Y , для него повторяется измерения и т.д. В результате снимается двумерная картина распределения поля над образцом. Далее образец по заданному шагу перемещается по оси Z вверх и заново снимается распределение поля над образцом.

В магнитометре в качестве основного ПХ использовался ПХЭ 603 118 А, Б, изготовленный методом оптической литографии на основе гетероэпитаксиальной структуры $n\text{-InSb-}i\text{-GaAs}$ (ООО “ВЕГА – ФЛЕКС”, Санкт-Петербург) [11]. Преобразователь ПХЭ 603 118 А, Б с внешним размером $3 \times 2 \times 0.6 \text{ мм}^3$ имеет следующие параметры: размер рабочей поверхности $100 \times 50 \text{ мкм}^2$; магнитная чувствительность $0.81\text{--}1.28 \text{ В/Тл}$ при $B = 0.1 \text{ Тл}$ и токе 100 мА ; остаточное напряжение $30\text{--}60 \text{ мкВ}$; входное сопротивление 5.2 Ом ; выходное сопротивление 7.5 Ом ; рабочая температура $1.5\text{--}373 \text{ К}$; температурный коэффициент магнитной чувствительности $0.005 \text{ \%}/^\circ\text{C}$; температурный коэффициент остаточного напряжения $0.2 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$; коэффициент нелинейности 0.3% при $B = 2 \text{ Тл}$; коэффициент расходимости менее 0.1% при $B = 0.1 \text{ Тл}$; ток питания 100 мА ; верхний предел индукции 10 Тл . ПХ с такими характеристиками обеспечивают линейность $0.2\text{--}0.3\%$ в диапазоне полей до 2 Тл , что существенно превосходит линейность 2DEG-сенсоров AlSb/InAs с двумерным электронным газом и других видов ПХ. Кроме того, ПХ на основе $n\text{-InSb-}i\text{-GaAs}$ обладают самой высокой удельной чувствительностью и сравнительно лучшими метрологическими, полевыми и температурными характеристиками.

В случае использования промышленных ПХ минимальный зазор между рабочей поверхностью ПХ и поверхностью образца может составить до 200 мкм . В этом случае для установления точного значения магнитного поля необходимо построить нормированное осевое распределение $B_{\text{тр}}(Z)/B_{\text{тр}}^{\text{max}}(0)$. Экстраполяция кривой к оси ординат, смещенной по оси Z на 200 мкм , показала, что потери сигнала на расстоянии 200 мкм от поверхности образцов составляют не более 5% от $B_{\text{тр}}^{\text{max}}(0)$.

4. ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОСКОПА

Испытания показали, что благодаря использованию фиксаторов начала и конца перемещения столиков и применению принципа дифференциального перемещения разрешение системы позиционирования по трем координатам было лучше 1 мкм . Полный оборот тяги создает линейное перемещение в соответствующем направлении на 1 мкм . Полное линейное перемещение по осям X и Y составляло 5 мм . По оси Z система

обеспечивала линейное перемещение на расстояние 25 мм с разрешением не хуже 1 мкм. В работе [10] программно-управляемая система перемещения станка EP2006H (фирма Everprecision, Тайвань) обеспечивала точность позиционирования около 5 мкм по осям X, Y и около 9 мкм по оси Z при комнатной температуре. Для достижения более высокого пространственного разрешения (примерно 3 мкм) авторам пришлось промоделировать и корректировать показания ПХ для образца с ранее известной топологией.

Динамический диапазон предложенного микроскопа по магнитному полю в случае использования магнитометра [12] составляет $(10^{-7} - 3 \cdot 10^{-1})$ Тл. Стабильность величин заданного магнитного поля и температуры лучше, чем 10^{-9} Тл и 10^{-2} К, соответственно. Чувствительность предлагаемого микроскопа по магнитному полю составляет примерно $2.5 \cdot 10^{-7}$ Тл/Гц^{1/2} [12]. Для оценки чувствительности микроскопа сначала с помощью откалиброванного ПХ определялась постоянная катушки при сравнительно большом токе через соленоид, а затем при заданном малом токе определялись величина поля и магнитная чувствительность микроскопа.

Коэффициент нелинейности микроскопа в основном определялся нелинейностью ПХ во всем динамическом диапазоне вне зависимости от чувствительности и точности магнитометра. Для его определения через соленоид пропускался линейно нарастающий ток и измерялась величина поля. По степени отклонения линейности тока и поля было установлено, что коэффициент нелинейности микроскопа выше в области слабых полей и достигает значений 0.01% при $B = 10^{-2}$ Тл. Такая высокая линейность обеспечивается как в режиме, когда датчик фиксирован и меняется поле, так и в режиме, когда поле фиксировано и идет сканирование образца по отношению к датчику.

Известно [3], что слабые магнитные поля (величиной около $10^{-8} - 10^{-7}$ Тл) проникают в керамические ВТСП. Как показали исследования [3, 4], в режиме охлаждения образца в магнитном поле (FC, field cooling) такие поля также захватываются монокристаллическими ВТСП-образцами YBCO и BSCCO. Следовательно, широкий динамический диапазон необходим, в частности, для прецизионного измерения первого джозефсоновского критического магнитного поля проникновения гипервихрей в керамических ВТСП [3] и термодинамических первых критических полей суб- и нанокристаллитов ВТСП-образцов [3, 4]. Для этого измерялись параметры плотности ЗМП и ее изменение с изменением топологии захваченного потока. По уровню ЗМП оценивалась мейснеровская доля в ВТСП-образцах. Было обнаружено, что магнитный поток, захваченный в участках с сильным пиннингом, замыкается не только вокруг ВТСП-образца, но и через участки с более слабым пиннингом. Следовательно, на разных расстояниях от образца можно селективно измерить вклады в

величину $B_{tr}(X,Y,Z)$ фрагментов плотностей магнитного потока, захваченных в разных структурных единицах образца.

5. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

На рис. 5 приведена магнитополевая зависимость пространственного распределения плотности ЗМП $B_{tr}(X,Y,Z)$ вблизи монокристаллического образца BSCCO размером $4 \times 4 \times 0.6$ мм³, измеренная в нулевом магнитном поле (ZFC) с накоплением магнитного потока (ZFCMFA, zero field cooling with magnetic flux accumulation) [3, 4] в поле 10^{-2} Тл при температуре 77.4 К на расстоянии 50 мкм от поверхности образца (координата Z менялась в диапазоне от 50 мкм до 1 мм). Как видно на рис. 5, в середине образца зависимость проходит через нуль от минимума к максимуму. С удалением от поверхности образца ПХ постепенно перестает замечать часть потока, захваченного в кристаллитах, которая через слабые связи замыкается внутри образца. Это приводит к убыванию зависимости $B_{tr}(X,Y,Z)$. С приближением к краю образца силовые линии плотности ЗМП меняют свое направление и начинают замыкаться не внутри, а вокруг образца [12].

Рис. 5. Пространственное распределение плотности захваченного магнитного потока $B_{tr}(X,Y,Z)$ вокруг образца...

Рисунок 6 демонстрирует пространственное разрешение микроскопа: радиальное распределение $B_{tr}(r)$, измеренное в режиме ZFC при температуре 77.4 К для квазимонокристаллического образца YBCO (а) и для эпитаксиальной пленки YBCO (б). Как видно на рис. 6а, в образце отчетливо видны домены размерами примерно 3–4 мм, при этом разрешение микроскопа при радиальном сканировании не хуже, чем 100 мкм. Радиальное распределение $B_{tr}(r)$ для эпитаксиальной пленки было использовано для юстировки X- и Y-столиков и определения степени параллельности сканирования образца по отношению к поверхности ПХ. На рис. 6в приведено нормированное осевое распределение $B_{tr}(Z)/B_{tr}^{max}(0)$ для монокристаллического образца BSCCO, измеренное в режимах FC (1) и ZFC (2) при температуре 77.4 К.

Рис. 6. Пространственные распределения плотности захваченного магнитного потока...

Пространственное разрешение микроскопа зависит не только от величины ступеней задающего ОЗЛМП, но и от распределения двойников по размерам, чувствительности магнитометра [3] и размера рабочей поверхности ПХ. Проводя регистрацию слабых полей с помощью предложенного микроскопа, позволяющего в однородном поле картографировать распределение слабых полей объектов с разрешением 1 мкм при приложении ОЗЛМП, можно добиться более высокого разрешения, чем 1 мкм [3, 4].

В работах [13, 14] был продемонстрирован принцип работы двухступенчатого холловского магнитометра чувствительностью примерно $8 \cdot 10^{-11}$ Тл с пространственным разрешением около 300 нм, имевшего высокую степень линейности и точности в диапазоне магнитных полей (10^{-11} – 10^{-7}) Тл. Использовался гибридный ПХ на основе полупроводникового ПХ и тонкой двойниковой эпитаксиальной пленки YBCO в качестве чувствительной зоны. В предложенном магнитометре, в отличие от классических магнитометров, увеличение пространственного разрешения приводило не к уменьшению, а наоборот, к повышению чувствительности магнитометра, так как локальные слабые магнитные поля регистрируются внутри рабочей поверхности ПХ с помощью отдельно взятых "изолированных" однородно намагниченных двойников, намагниченность которых растет с уменьшением их размеров за счет существенного роста их критических токов. Благодаря регулированию полем размеров двойников YBCO-пленки, пространственное разрешение зонда можно менять в широком диапазоне от минимального размера двойников 10–20 нм до размера рабочей поверхности ПХ первой ступени 50×100 мкм². Первая ступень также служит для одновременного интегрального усиления локальных полей однородно намагниченных двойников YBCO-пленки. Следовательно, увеличение рабочей поверхности ПХ приводит к повышению его производительности, а увеличение тока через ПХ – к росту чувствительности ПХ.

Сравнительно высокое разрешение по X- и Y-направлениям по сравнению с размерами эффективной рабочей поверхности ПХ ($S_{\text{eff}} \sim 50 \times 100$ мкм²) может быть достигнуто в случае использования в микроскопе ПХ с размером чувствительной зоны около 1×1 мкм² [15].

В связи с тем, что осциллирующее затухающее во времени магнитное поле существенно уменьшает величину S_{eff} ПХ по сравнению с S [9], использование ПХ с $S \sim 1 \times 1$ мкм² [15], а также установка пьезопреобразователя на головку движущегося механизма микроскопа [8] позволяют обнаружить двойники гораздо меньшего размера и достичь более высокого пространственного разрешения (около 0.081 мкм) [3, 4], что открывает серьезные перспективы для применения холловских микроскопов в различных областях науки и техники.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания по теме 0030-2019-0014.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Schlüssel Y., Lenz T., Rohner D. et al.* Phys. Rev. Appl. 2018. V. 10. P. 034032.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.10.034032>
2. *Zechner G., Lang W., Dosmailov M., Bodea M.A., Pedarnig J.D.* Phys. Rev. B. 2018. V. 98. P. 104508. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.98.104508>
3. *Ростами Х.Р.* // Письма в ЖЭТФ. 2017. Т. 105. С. 754.
<https://doi.org/10.7868/S0370274X17120098>
4. *Rostami Kh.R.* Int. J. Mod. Phys. B. 2018. V. 32. № 31. P. 1850346.
<https://doi.org/10.1142/S0217979218503460>
5. *Kalisky B., Kirtley J.R., Analytis J.G., Chu J-H., Fisher I.R., Moler K.A.* Phys. Rev. B. 2010. V. 81. P. 184513. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.81.184513>
6. *Kalisky B., Kirtley J.R., Analytis J.G., Chu J-H., Fisher I.R., A. Kathryn, K.A. Moler* Phys. Rev. B. 2011. V. 83. P. 064511. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.83.064511>
7. *Tranquada J.M.* Physics. 2010. V. 3 P. 41. <https://doi.org/10.1103/Physics.3.41>
8. *Barrett R.C., Quate C.F.* Rev. Sci. Instrum. 1991. V. 62. P. 1393.
<https://doi.org/10.1063/1.1142506>
9. *Ростами Х.Р.* ПТЭ. 2019. № 3. С. 150. <https://doi.org/10.1134/S003281621903025X>
10. *Игнатъев В.К., Орлов А.А., Перченко С.В., Станкевич Д.А.* // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. № 15. С. 3. <https://doi.org/10.21883/PJTf.2017.15.44864.16434>
11. Преобразователи Холла (ГОСТ 7.82–2001, 01.01.2021 г.) <http://sensorspb.ru/price5.doc>
12. *Ростами Х.Р.* ПТЭ. 2016. № 2. С. 112. <https://doi.org/10.7868/S0032816216010110>
13. *Rostami Kh.R., Nikitin I.P.* Measurement. 2020. V. 153. P. 107423.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107423>
14. *Rostami Kh.R., Nikitin I.P.* Sens. Actuators A Phys. 2022. V. 346. P. 113841.
<https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113841>
15. *Oral A. Bending S.J., Henini M.* J. Vac. Sci. Technol. B. 1996. V. 14. P. 1202.
<https://doi.org/10.1116/1.588514>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Структурная схема системы позиционирования микроскопа: 1, 2 – X-, Y-платформы; 3, 4 – ходовые гайки; 5, 6 – червячные колеса; 7, 8 – червяки; 9, 10 – регулирующие пластины; 11 – нагреватель; 12 – оправа; 13 – образец; 14–16 – регулирующие винтики; 17 – зажим; 18 – направляющая оправы с образцом
- Рис. 2.** Конструктивная схема столиков X-, Y-перемещений в увеличенном масштабе: 1 – ходовые гайки X-, Y-перемещений; 2 – платформы X-, Y-перемещений; 3 – латунный контактный винтик; 4 – изолирующий тефлоновый направляющий винтик; 5, 6 – закрепляющие винтики; 7 – держатель контактной системы
- Рис. 3.** Сборная конструкция системы позиционирования микроскопа с изображением омических контактов: 1 – образец; 2 – направляющая оправы с образцом; 3 – медный диск; 4, 5 – преобразователи Холла; 6 – латунный винт; 7 – тефлоновый изолятор; 8 – латунный цилиндр; 9, 10 – омические X-, Y- контакты (такие же контакты имеются с боковых сторон); 11–13 – направляющие втулки скольжения; 14, 15 – нержавеющие трубки; 16 – жгуты проводов
- Рис. 4.** Сборная конструктивная схема верхней части газопроточного микрокриостата с механизмами X-, Y-вращений и дифференциальными винтами регулирования Z-перемещения: 1, 2 – синхронные двигатели СД-54; 3, 4 – червячные колеса X-, Y-перемещений; 5, 6 – червячные колеса регулирования X-, Y-потенциометрами; 7, 8 – развязывающие X-, Y-сильфоны; 9, 10 – фиксирующие держатели; 11, 12 – потенциометры X-, Y-перемещений; 13, 14 – фланцы; 15–17 – дифференциальные регулирующие винтики Z-перемещения; 18, 19 – нержавеющие стержни X-, Y-вращений; 20 – вентиль откачки паров хладагента; 21 – фланец; 22, 23 – направляющие втулки; 24–26 – теплоизолирующая вата; 27 – теплоизолирующий пенопластовый уплотнитель, 28 – нержавеющие стержни Z-перемещения со втулкой
- Рис. 5.** Пространственное распределение плотности захваченного магнитного потока $B_{tr}(X,Y,Z)$ вокруг образца, измеренное в режиме ZFCMFA в поле 100 Гс. Расстояние между образцом и ПХ $Z = 50$ мкм. Температура 77.4 К
- Рис. 6.** Пространственные распределения плотности захваченного магнитного потока: **а** – радиальные распределения $B_{tr}(r)$ для квазимонокристаллического образца YBCO, **б** – распределения для эпитаксиальной пленки YBCO, **в** – нормированное осевое распределение $B_{tr}(Z)/B_{tr}^{max}(0)$ для монокристаллического образца BSCCO. Температура 77.4 К

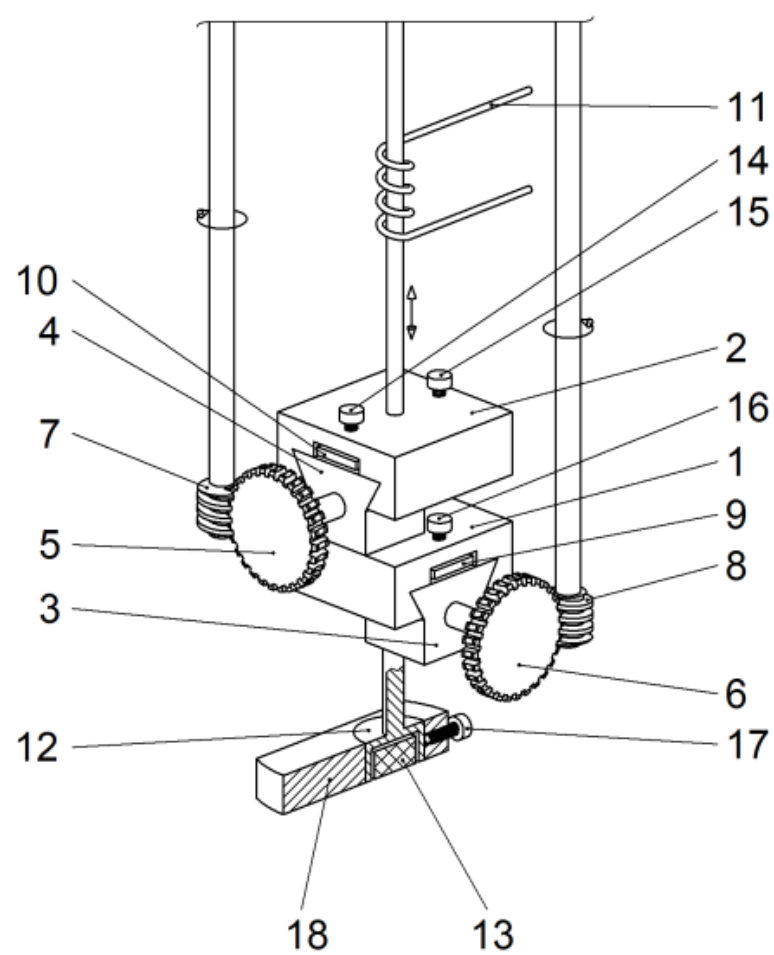


Рис. 1.

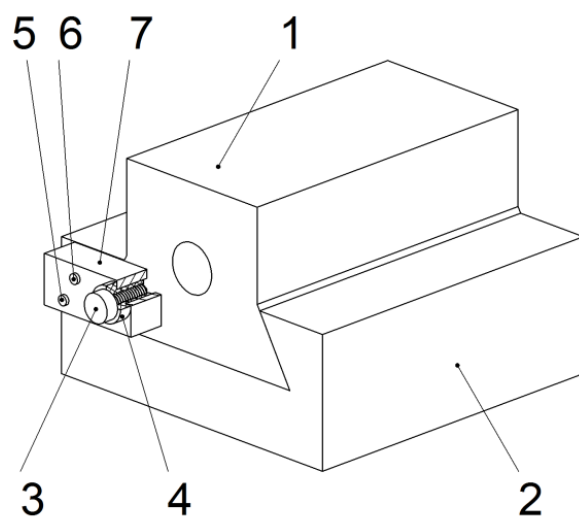


Рис. 2.

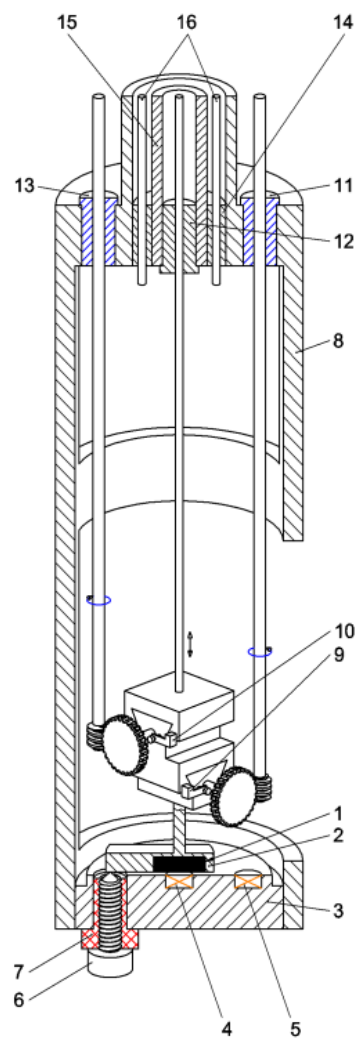


Рис. 3.

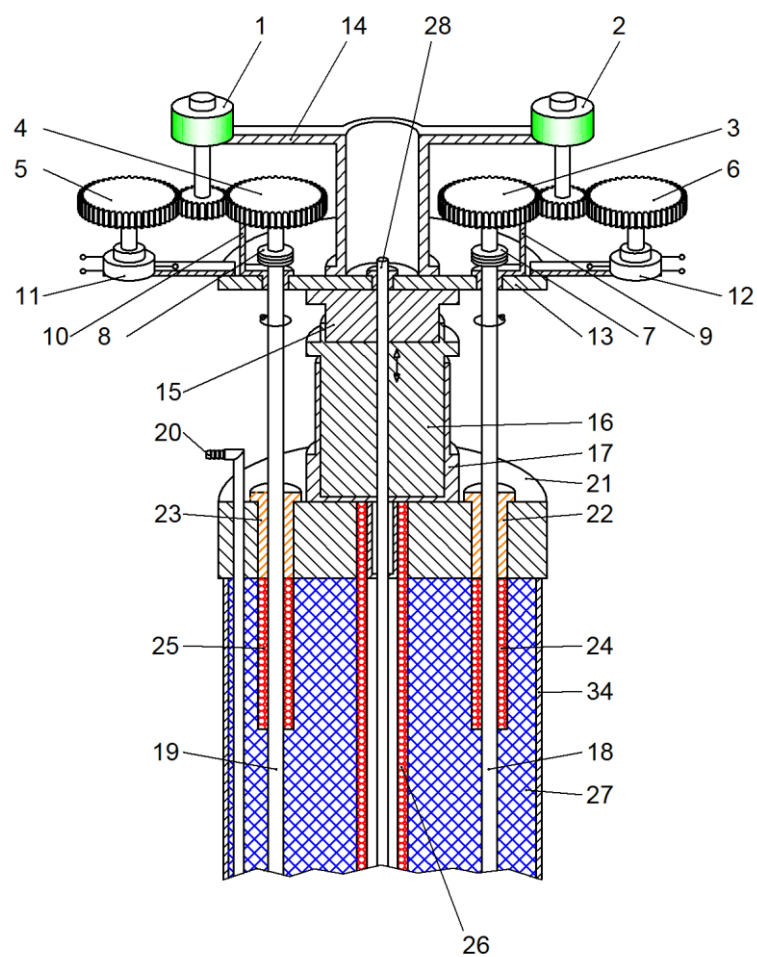


Рис. 4.

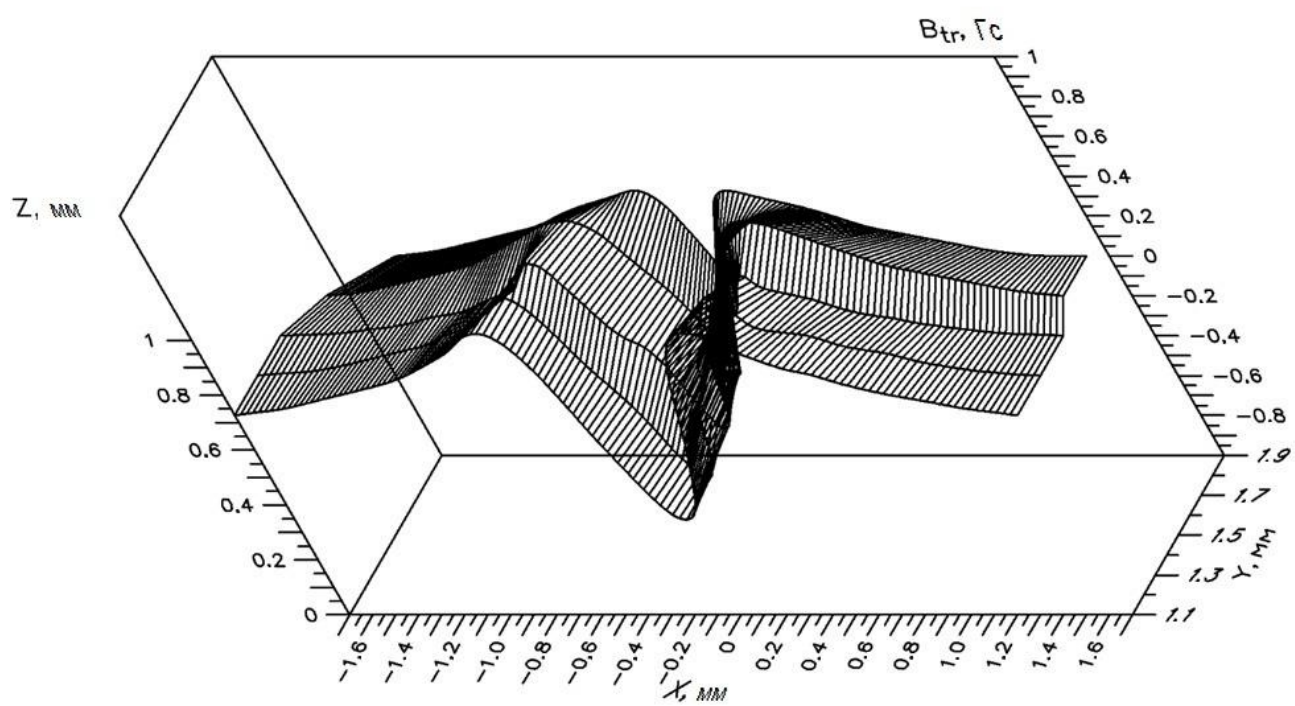


Рис. 5.

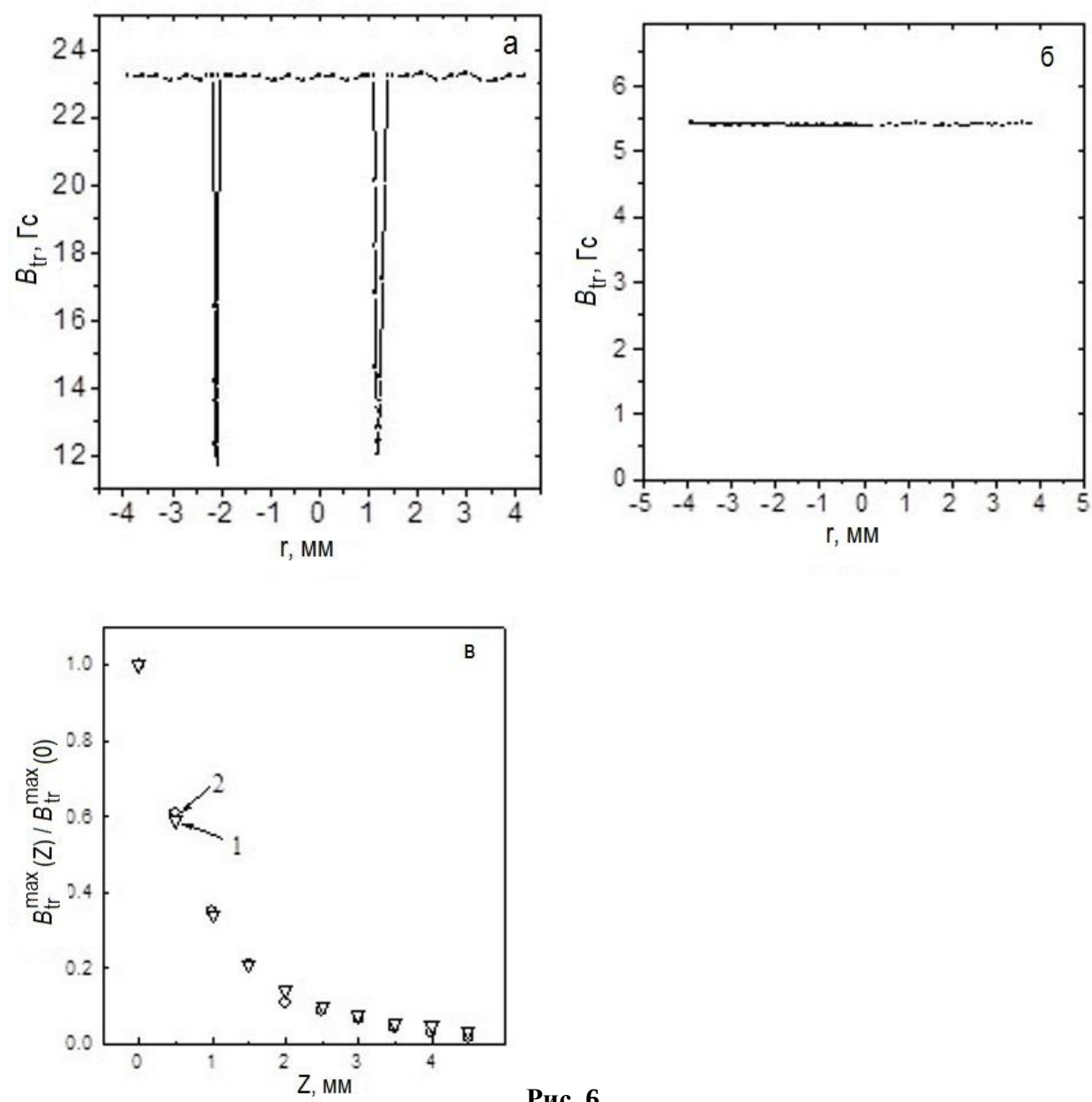


Рис. 6.