_____ ЛАБОРАТОРНАЯ ____ ТЕХНИКА

УДК 53.086

ХОЛЛОВСКИЙ МИКРОСКОП ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ

© 2019 г. Х. Р. Ростами

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН Россия, 141190, Фрязино, Московской обл., пл. Введенского, 1

e-mail: rostami@ms.ire.rssi.ru Поступила в редакцию 09.04.2018 г. После доработки 26.11.2018 г. Принята к публикации 27.12.2018 г.

На основе преобразователей Холла разработан трехмерный растровый микроскоп с магнитной чувствительностью ~ $2.5 \cdot 10^{-3}$ Гс/Гц^{1/2}. Динамический диапазон микроскопа по магнитному полю составляет от 10^{-3} до $\pm 3 \cdot 10^3$ Гс. Стабильность величины заданного магнитного поля лучше чем 10^{-5} Гс. Минимальная величина магнитного поля при его ступенчатом задании составляет 10^{-3} Гс. Максимальный размер площади обзора исследуемых объектов 5 × 5 мм². Минимальные размеры шага сканирования по осям *X*, *Y* составляют 10 и 1 мкм соответственно при грубом и плавном перемещении столиков. Максимальный размер перемещения по оси *Z* равен 25 мм с минимальным шагом сканирования 10 и 1 мкм соответственно при грубом и плавном перемещении. Микроскоп позволяет создавать аппаратную функцию произвольной формы за счет комбинации заданных величин: температуры, транспортного тока, постоянного магнитного поля и осциллирующего, затухающего во времени, переменного магнитного поля. Приведены примеры применения микроскопа для исследования высокотемпературных сверхпроводников BSCCO и YBCO.

DOI: 10.1134/S003281621903025X

В диагностических целях широко применяются холловские микроскопы [1—4], которые обеспечивают непосредственное измерение индукции магнитного поля, обладают широкими функциональными возможностями, позволяют визуализировать магнитное микросостояние протяженных объектов, просты в изготовлении и имеют низкую стоимость. Однако у них сравнительно низкие пространственное разрешение и чувствительность к регистрируемому сигналу, что не позволяет отчетливо выделить спектры сигнала отклика объектов на слабое магнитное поле.

Как показано в [5, 6], при исключении влияния на объект спада импульса магнитного поля и использовании в качестве задающего поля только фронта переменного затухающего магнитного поля H(t) удается существенно повысить пространственное разрешение микроскопа при исследовании динамики магнитного потока в высокотемпературных сверхпроводниках (ВТСП). При приложении к образцу затухающего магнитного поля, амплитуда которого с высокой стабильностью ступенчато изменяется, были обнаружены и селективно выделены незначительные пространственные выбросы локальных характеристик образца. Таким образом, в отличие от традиционных методик, возможно одновременное исследование кристаллических и магнитных микросостояний объектов [5].

Разработанные к настоящему времени микроскопы измеряют двумерную картину распределения магнитного поля на поверхности образца. Однако при исследовании пространственных распределений неоднородных полей, полей размагничивания и т.д. требуется получить трехмерную картину распределения магнитного поля вблизи поверхности и вокруг образцов [5–7]. Исходя из вышеизложенного, разработка трехмерного растрового микроскопа с повышенным пространственным разрешением, позволяющего локальным способом проводить исследование объектов в однородных и локальных осциллирующих затухающих магнитных полях, представляется актуальной задачей.

Для комплексного исследования пространственного распределения магнитного поля вблизи поверхности образца в микроскопе предусмотрено два режима сканирования.

В первом режиме изменяется поле и измеряется сигнал неподвижного датчика. В данном режиме микроскоп обладает более высоким разрешением, что позволяет наблюдать перемещение



Рис. 1. Структурная схема микроскопа. 1 - держатель; 2, 3 - (X, Y)-столик; 4 - несущая; 5 - меднаяоправа; 6 - образец; 7 - медный диск; 8, 9 - преобразователи Холла; 10 - фланец; 11 - штанга; 12 - поворотные тяги; 13, 14 - червячные передачи; 15 - фиксаторы; 16 - проточный микрокриостат; 17 - микрокапилляр; 18 - тонкая капиллярная сетка; 19 термометр; 20 - соосные медные соленоиды; 21 - гелиевый криостат КГ-100; 22 - экспресс-нагреватель;23 - биполярный источник тока; 24, 25, 26 и 27 - токовые ключи.

вихрей и пятен магнитного потока в ВТСП-образцах на расстояния в единицы нанометров.

Во втором режиме фиксируется поле и производится сканирование по координатам. Разрешение в данном случае определяется размерами измерительного зонда и точностью перемещения координатных столиков.

Образец, закрепленный на подвижном координатном столике, в ходе измерений можно перемещать в трех взаимно перпендикулярных направлениях по отношению к датчику. При этом при каждом значении B_z для пространственных изменений магнитного поля объекта по осям X, Y, превышающих $S_{eff}^{1/2}$ (S_{eff} – эффективная площадь рабочей поверхности датчика), может быть установлена истинная картина распределения магнитного поля $B_z(X, Y, Z)$ над образцом.

Схема конструкции микроскопа представлена на рис. 1. Перед измерениями держатель 1 (см. рис. 1) столика (2, 3) при помощи дифференциального микровинта поднимается вверх по оси Z, и через окно в несущей 4 в столик ввинчивается медная оправа 5 с образцом 6. Затем столик с образцом подводится на минимальное расстояние ~1 мкм к медному диску 7 с преобразователями Холла (п.Х.) 8, 9. Фланец 10 жестко связан с штангой 11. Внутри штанги проходят поворотные тяги 12, обеспечивающие посредством червячных передач 13, 14 соответствующие линейные перемешения координатного столика в направлениях X, *Y*. Фиксаторы 15 служат для фиксации начала и конца работы червячных передач. Вся система перемещения находится внутри проточного микрокриостата 16.

Жидкий гелий или азот, поступающий через спиралеобразный микрокапилляр 17 (бифилярно намотанный поверх нагревателя), проходит через тонкую капиллярную сетку 18 и подается в микрокриостат. Термометр 19, приклеенный клеем $Б\Phi 2$ к образцу, совместно с нагревателем 17 при помощи модернизированной схемы на основе терморегулятора РТП-3М обеспечивают температуру в камере с точностью лучше 0.01% в диапазоне 2.5–300 К. Токовые и холловские контакты п.Х., разработанного на основе датчика ПХЭ 607118А1, утоплены в глубь подложки, а провода подведены с ее боковых сторон. Измерительные провода проходят между соосных тонких нержавеющих трубок центральной штанги 11. Проточный микрокриостат размещен внутри двух соосных резистивных (с медными обмотками) соленоидов 20. Вся система находится внутри гелиевого криостата ГК-100 (21) и окружена цилиндрическим магнитным экраном, изготовленным из алюминия и пермаллоя. Нагреватель 22 служит для быстрого изменения температуры.

Сигналы положения образца по координатам *X*, *Y* вырабатываются многооборотными потенциометрами, связанными с поворотными тягами *12* и червячными передачами (в схеме не показаны), синхронно работающими с червячными передачами *13*, *14*. При заполнении криостата жидким азотом большая секция катушек *20* создает поле в диапазоне от 10^{-3} до $\pm 1.3 \cdot 10^3$ Гс. Вторая секция катушек *20* служит для компенсации постоянной составляющей поля Земли по координате *Z*.

На рис. 2 приведена структурная схема системы позиционирования микроскопа. Для обеспечения однородной температуры образца и уменьшения влияния на результаты измерения остаточных магнитных полей (X, Y)-платформы I, 2 и ходовые гайки 3, 4 изготовлены из меди, а длинные винты для перемещения ходовых гаек — из латуни. Для уменьшения трения, меняющегося из-за изменения коэффициентов теплового расширения медных координатных столиков, и снижения нагрузок на винты вращения выбран угол наклона 60° между рабочими поверхностями платформ и ходовых гаек.

При настройке механической части установки минимальное расстояние между строго параллельными, тщательно отполированными поверхностями оправы образца и медного диска, в котором установлены п.Х., составляло 1 ± 0.1 мкм. Такое расстояние задавалось следующим образом. Сначала с помощью подложки из NdGaO₃ толшиной 1 мм. установленной в оправе, внутри которой имелась выемка глубиной 1 мм, при Z-перемещении обеспечивалось касание винтиком оправы. Винтик, создающий омический контакт с оправой, ввинчивался через изолятор в медном диске. Затем, после фиксации разрыва контакта, что соответствовало минимальному зазору между медным диском и оправой, с помощью дифференциального микровинта Z-перемещения оправа отодвигалась на 2 мкм. После этого ввинчиванием винтика устанавливался омический контакт с оправой. Далее оправа отодвигалась на 10 мм, и установленная подложка заменялась подложкой из NdGaO₃ толщиной 1 мм, на поверхность которой лазерным распылением была нанесена эпитаксиальная пленка YBa₂Cu₃O_{7-x} (YBCO) толщиной ~1 мкм. Далее осуществлялось Z-перемещение оправы с образцом к винтику до фиксации омического контакта. Затем винтик отвинчивался до разрыва контакта, после чего проводилось измерение.

Размеры и толщина зеркально отполированной с обеих сторон подложки задавались заранее, исходя из технологических требований напыления пленок. Медная оправа с углублением строго по толщине подложки также позволяла выполнить замену подложки на пленку с боковой стороны, не меняя заранее установленный зазор между образцом и п.Х. Кроме того, толщина подложки и образца дополнительно измерялись 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 по зависимости $B_{tr}(Z)/B_{tr}^{\max}(0)$ с помощью экстраполяции кривой к оси ординат, смещенной по оси Z на -2 мкм.

Такую процедуру настройки необходимо проводить перед измерениями и для образцов другой



Рис. 2. Структурная схема системы позиционирования микроскопа. 1, 2 - X-, *Y*-платформа; 3, 4 - ходовые гайки; <math>5, 6 - червячные колеса; 7, 8 - червяки; 9, 10 - пластины, регулирующие степень соприкосновения рабочих поверхностей платформы и ходовых гаек; 11 - нагреватель; 12 - оправа; 13 - образец.

толщины. Это позволяет компенсировать люфты резьбы микровинта при прямом и обратном перемещении образца по оси Z.

Чтобы уменьшить усилие вращающих механизмов, способное привести к деформации винтиков при детектировании омических контактов, сопротивление контактов регистрировалось с помощью высокочувствительного преобразователя сопротивление—напряжение. С помощью омических контактов таким же образом задавались и контролировались начало и конец перемещения (*X*, *Y*)-столиков.

Для контроля степени параллельности плоскостей, поверхности образца и (*X*, *Y*)-столиков при сканировании были использованы радиальные распределения плотности захваченного магнитного потока эпитаксиальных пленок YBCO и намагниченности однородно намагниченной магнитной пленки. При изменении угла наклона между поверхностями образца и п.Х. изменялось показание п.Х. Для контроля неизменности угла наклона при перемещении ходовых гаек, а также отсутствия гистерезиса были построены зависимости $B_z(X)$ и $B_z(Y)$ в прямом и в обратном направлениях сканирования. Таким образом, по показаниям п.Х. определялась степень параллельности сканирования образца по отношению к поверхности п.Х.

Для исключения гистерезиса, который мог появиться при перемещении по оси Z, были построены нормированные осевые распределения $B_{tr}(Z)/B_{tr}^{max}(0)$ в прямом и обратном направлениях сканирования.

После установки образца координатный столик выводился в положение, соответствующее краю линии, проходящей примерно посередине длинной стороны плоскости образца. Устанавливалось соответствие между механическими перемещениями образца в направлениях X, Y, Z и соответствующими показаниями многооборотных потенциометров позиционирования. Затем задавалась требуемая температура в измерительной камере и проводилась настройка электронной схемы магнитометра. Быстрое и точное перемещение столиков в трех направлениях обеспечивалось дифференциальными микровинтами с точностью 10 и 1 мкм соответственно в грубом и плавном диапазонах. В грубом интервале после выбора размера поля обзора интересующего участка исследуемого образца и задания значения координат *Y*, Z образец перемещался с шагом 1 мкм относительно п.Х. вдоль оси Х. Для каждого значения координаты Х измерялась величина поля, и данные автоматически считывались компьютером. После окончания сканирования по оси Х вводилось новое значение координаты Y, и для него измерения повторялись и т.д. В результате была получена двумерная картина распределения поля над образцом [8]. Далее образец перемещали по оси Z вверх на заданный шаг и заново снимали распределение поля над образцом. На основе полученных данных строили трехмерное изображение $B_{z}(X, Y, Z)$. Экспресс-выбор соответствующей области поверхности образца (для сканирования) также можно осуществлять с помощью винтов, на которых установлены омические контакты.

Для измерения магнитного момента образцов были использованы два близких по техническим характеристикам п.Х. марки ПХЭ 607118А1 (НПО "Сенсор", Санкт-Петербург). Оба п.Х. находились в одной плоскости, при этом один из них был размещен в центре медного диска под образцом, а другой – опорный п.Х. – на расстоянии 9 мм от центра, в невозмущенном образцом магнитном поле. Чувствительности п.Х. выравнивались путем регулировки тока опорного п.Х. Каждый раз перед измерениями после задания необходимой температуры образец сначала перемещали по оси Z на расстояние 25 мм, после чего с помощью электронной схемы компенсировали сигнал разбаланса п.Х., который имел разные значения для установленных температур. Температурный разбаланс преобразователей Холла особенно сильно сказывался при регистрации слабых магнитных полей.

Для изменения параметров неоднородного поля и их измерения три одинаковых по техническим характеристикам п.Х. размещали на трех строго взаимно перпендикулярных гранях кубика размером $5 \times 5 \times 5$ мм, который закрепляли на трехкоординатном столике микроскопа. В результате измеряли три компоненты B_x , B_y , B_z и ве-

личину поля $B = (B_x^2 + B_y^2 + B_z^2)^{1/2}$ произвольного направления. Этим же способом были измерены все тензоры магнитного поля — основные элементы матрицы градиентов магнитного поля:

$$B_{x,y,z} = \frac{\frac{\partial B_x}{\partial x}}{\frac{\partial B_y}{\partial x}} \frac{\frac{\partial B_x}{\partial y}}{\frac{\partial B_y}{\partial z}} \frac{\frac{\partial B_y}{\partial z}}{\frac{\partial B_y}{\partial y}} \frac{\frac{\partial B_y}{\partial z}}{\frac{\partial B_z}{\partial z}}$$

а также параметры созданного поля в отверстии соленоида.

Вышеприведенные принципиальные решения позволили существенно расширить технические возможности предлагаемого микроскопа по сравнению с ранее разработанным нами микроскопом [9]. Принцип действия входящего в состав микроскопа высокочувствительного холловского магнитометра подробно описан в [10, 11].

Предложенный микроскоп позволяет проводить исследования во внешних магнитных полях величиной от 10^{-3} до $\pm 3 \cdot 10^3$ Гс в диапазоне температур 2.5–300 К. Нестабильность и нелинейность во всем динамическом диапазоне развертки поля не хуже 0.01%. Температуру также можно сканировать по заданному закону во всем указанном диапазоне с нестабильностью не хуже 0.01% [12, 13].

Испытания показали, что при прецизионном изготовлении деталей микроскопа разрешение системы позиционирования по обеим координатам, благодаря использованию фиксаторов 15 (см. рис. 1) начала и конца перемещения столиков и применению принципа дифференциального перемещения, было лучше 1 мкм. Полный оборот тяги обеспечивал линейное перемещение в соответствующем направлении <1 мкм. Полное линейное перемешение по осям Хи Усоставляло 5 мм. По оси Z система обеспечивала линейное перемещение на расстояние 25 мм с разрешением не хуже 1 мкм. Это на порядок лучше ранее достигнутого нами в [9] разрешения. В микроскопе, описанном в [9], перемещения по осям Z, X, Y обеспечивались с помощью головок, имеющих минимальный шаг 10 мкм.



Рис. 3. Пространственное распределение плотности захваченного магнитного потока $B_{tr}(X, Y, Z)$ вокруг монокристаллического образца BSCCO, полученное при сканировании с шагом 50 мкм по координатам *X*, *Y*для расстояния между образцом и п. Х. в диапазоне Z = 50 мкм–1 мм. Температура 77.4 К.

Сравнительно высокое разрешение по (X, Y)направлениям предусмотрено и в случае использования в микроскопе п.Х. с рабочими поверхностями $S \sim 10 \times 10$ мкм² [3] и $S \sim 1 \times 1$ мкм² [1] (у использованных нами в установке п.Х. площадь рабочей поверхности $S \sim 50 \times 100$ мкм²). Исследования плотности захваченного магнитного потока в ВТСП-образцах также показали, что разрешение разработанного холловского микроскопа по индукции магнитного поля составило $\approx 2.5 \cdot 10^{-3} \, \Gamma c / \Gamma u^{1/2}$. динамический диапазон микроскопа по магнитному полю — от 10^{-3} до $\pm 3 \cdot 10^{3}$ Гс, стабильность величины заланного поля не хуже 10⁻⁵ Гс. Более широкий линамический лиапазон в области слабых полей по сравнению с ранее предложенным в [9] микроскопом необходим для исследования параметров гипервихрей в ВТСП. Такие слабые поля создавались благодаря питанию соленоида высокостабильным биполярным генератором разрядных токов, управляемым двоичным кодом [12, 13]. Для оценки чувствительности микроскопа сначала на сравнительно большом токе с помощью откалиброванного п.Х. устанавливалась постоянная (ток-поле) катушка, а затем при известном токе определялась величина поля и вычислялась магнитная чувствительность микроскопа.

В случае неутопления контактов в глубь подложки п.Х. или при использовании п.Х. промышленного производства из-за токовых и потенциальных контактов, имеющихся на его поверхности, минимальный зазор между рабочей поверхностью п.Х. и поверхностью образца составит около 200 мкм. При этом пространственное разрешение микроскопа не определяется размерами рабочей поверхности п.Х. (в нашем случае 50×100 мкм²) и составит ~200 мкм. В этом случае для установления точного значения величины максимального



Рис. 4. Радиальные распределения $B_{tr}(r)$ для квазимонокристаллического образца YBCO [5] (**a**) и эпитаксиальной пленки YBCO (**б**). Температура 77.4 К.

магнитного поля $B_{tr}^{\max}(0)$ в центре на поверхности образцов необходимо построить нормированные осевые распределения $B_{tr}(Z)/B_{tr}^{\max}(0)$ от координаты *Z*. Экстраполяция кривых к оси ординат, смещенной по оси *Z* на –200 мкм, показала, что потери сигнала на расстоянии 200 мкм от поверхности образцов составляют <5% от $B_{tr}^{\max}(0)$.

Для создания осциллирующего, затухающего во времени, переменного магнитного поля параллельно медному соленоиду (индуктивностью $L \approx$ ≈ 4.13 Гн с остаточным активным сопротивлением обмотки $R \approx 92.2$ Ом при T = 77.4 K), создающему внешнее поле, подключалась емкость C == 0.05 мкФ (см. рис. 1). Параметры соленоида выбирались, исходя из конструкции криостата и требований к созданию максимально возможного однородного магнитного поля в отверстии соленоида. Задающим являлось только значение емкости, которое выбиралось, исходя из обеспечения наиболее высокой разрешающей способности методики, что достигалось воздействием на образец максимального числа колебаний затухающего внешнего магнитного поля.



Рис. 5. Магнитополевая зависимость плотности захваченного магнитного потока $B_{tr}(H_0)$ [5]: **а** – для эпитаксиальной пленки YBCO, измеренная с помощью затухающего магнитного поля; **б** – для той же эпитаксиальной пленки YBCO, измеренная в обычном режиме, когда параллельно соленоиду подключен резистор. *I* – при росте внешнего магнитного поля, *2* – при его убывании. Температура 77.4 К.

При одновременном поступлении от компьютера на токовые ключи 24, 25 и 26 (см. рис. 1) импульсов прямой и обратной полярности происходит подсоединение биполярного источника тока 23 к соленоиду L и отключение емкости C и резистора R_1 . В этом случае магнитная энергия накапливается в соленоиде. При смене полярностей импульсов, поступающих от компьютера в токовые ключи 24, 25 и 26, источник тока 23 отключается, подсоединяется резистор R_1 и включается в цепь соленоида L емкость C. В результате в соленоиде возникает переменное затухающее магнитное поле $H(t) = H_0 \exp(\beta t) \cos\Omega t$, где $\beta = R/(2L) = 11 \text{ c}^{-1} - 1$ коэффициент затухания, $\Omega = (\omega^2 - \beta^2)^{1/2} \approx 352 \ \Gamma_{II}$ – собственная частота колебательного контура, $\omega^2 = 1/(LC)$. LC-контур устойчиво работает в частотном диапазоне до 5 кГц. Увеличение емкости С до 100 мкФ приводит к исчезновению колебаний и к переходу системы в режим работы, аналогичный традиционным методикам, когда параллельно соленоиду вместо емкости подключен резистор. Для создания однородного магнитного поля в токовые ключи 25 и 27 от компьютера подаются разнополярные импульсы, которые отключают емкость C и включают в цепь резистор R_2 .

На рис. 3 приведено пространственное распределение захваченного магнитного потока $B_{tr}(X, Y, Z)$ вблизи монокристаллического образца Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8 + x} (BSCCO), измеренное при температуре 77.4 К с шагом 50 мкм по координатам X, Y для расстояния между образцом и п.Х. в диапазоне Z = 50 мкм—1 мм. Рис. 4 демонстрирует пространственные возможности микроскопа. Радиальное распределение $B_{tr}(r)$ для квазимонокристаллического образца YBCO измерено в режиме ZFC при температуре 77.4 К. Согласно рис. 4а, в образце отчетливо видны границы доменов размером ~3–4 мм, при этом разрешение микроскопа при радиальном сканировании было не хуже 50 мкм.

На рис. 4б приведено радиальное распределение $B_{tr}(r)$ для эпитаксиальной пленки, измеренное в режиме ZFC при температуре 77.4 К. Эта зависимость была использована для юстировки (Х, Ү)-столиков. Для демонстрации возможностей микроскопа в режиме затухания поля и сравнения полученных результатов с измеренными с помощью традиционной методики на рис. 5 приведены магнитополевые зависимости плотности захваченного магнитного потока $B_{tr}(H_0)$. На рис. 5а приведена зависимость для эпитаксиальной пленки ҮВСО, измеренная с помощью локального затухающего поля, а на рис. 56 для той же эпитаксиальной пленки ҮВСО – магнитополевая зависимость, измеренная в обычном режиме для случая, когда параллельно соленоиду подключался резистор [5].

Как показано в [5], в случае применения осциллирующего, затухающего во времени магнитного поля эффективная площадь S_{eff} рабочей поверхности использованного в микроскопе п.Х. становится существенно меньше, чем заданный размер его рабочей поверхности *S*. Это дополнительно повышает пространственное разрешение микроскопа по сравнению со случаем применения однородного поля. Пространственное разрешение и чувствительность микроскопа можно улучшить также при применении зондов другого типа, например датчиков на основе гетеропереходов с двумерным газом в канале [14].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Oral A., Bending S.J., Henini M. // J. Vac. Sci. Technol. B. 1996. V. 14. P. 1202.
- Gregory J.K., Bending S.J., Sandhu A. // Rev. Sci. Instrum. 2002. V. 73. P. 3515.
- Cambel V., Fedor J., Gregusova D., Kováč, P., Hušek I. // Supercond. Sci. Technol. 2005. V. 18. P. 417. http:// doi.org/10.1088/0953-2048/18/4/007.
- 4. Игнатьев В.К., Орлов А.А., Перченко С.В., Станкевич Д.А. // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. № 15. С. 3. doi 10.21883/PJTF.2017.15.44864.16434

- 5. Ростами Х.Р. // ФТТ. 2013. Т. 55. № 9. С. 1677.
- 6. *Ростами Х.Р.* // Письма в ЖЭТФ. 2017. Т. 105. № 12. С. 754.
- 7. Антонов В.Г., Петров Л.М., Щелкин А.П. // Средства измерений магнитных параметров материалов. Л.: Энергоатомиздат, 1986.
- 8. *Гудошников С.А., Венгрус И.И., Снигирев О.В. //* Сверхпроводимость: физика, химия, техника. 1994. Т. 7. С. 746.
- 9. Ростами Х.Р. // Измер. техника. 2014. № 12. С. 51.
- 10. Ростами Х.Р. // Измер. техника. 2016. № 12. С. 40.
- 11. *Ростами Х.Р. //* ПТЭ. 2016. № 2. С. 112. doi 10.7868/ S0032816216010110
- 12. *Ростами Х.Р.* Патент № 2007862 С1 РФ. МПК: H03M1/66 //Бюл. № 3. Опубл. 15.02.94.
- 13. *Ростами Х.Р.* Патент № 94038958 РФ. МПК: H03K005/00 A1 // Бюл. № 20. Опубл. 20.07.96.
- 14. Bending S.J. // Physica C. 2010. T. 470. № 19. P. 754.