———— ДИАГНОСТИКА МАТЕРИАЛОВ ———

УДК 538.945

ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АССИМЕТРИЧНЫХ КОЛЕЦ ИЗ ВТСП УВСО ПЛЕНОК, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО НАПЫЛЕНИЯ

© 2019 г. А. И. Ильин^{1,} *, А. А. Иванов², О. В. Трофимов¹, А. А. Фирсов¹, А. В. Никулов¹, А. В. Зотов¹

¹Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской АН, Россия, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д. 6 ²Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ" Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31 *E-mail: ilin@iptm.ru Поступила в редакцию 19.09.2018 г.

Пленки ВТСП YBCO толщиной 200–400 нм были получены импульсным лазерным напылением, как без фильтрации, так и в режимах скоростной фильтрации частиц потока распыленного вещества. При помощи ACM и CЭM было определено, что размер крупных частиц в плоскости пленок при напылении без фильтрации находится в диапазоне от 60 до 1000 нм. После фильтрации максимальный размер частиц в плоскости пленок был менее 500 нм. На поверхности обнаружены два вида неровностей после напыления: неровности, полученные из округлых частиц и неровности из ограненных кристаллов. Из пленок ВТСП методами электронной литографии и травления ионами аргона через маску были изготовлены микро и наноструктуры. Была обнаружена корреляция между характерными размерами неровностей на поверхности пленок и доступным латеральным разрешением изготавливаемых микроструктур. Для структур из ВТСП пленок, представляющих собой ассиметричные кольца с характерной шириной линий 800 нм были определены температурные зависимости сверхпроводящего перехода и обнаружены ассиметричные ВАХ.

DOI: 10.1134/S0544126919020042

введение

Пленки ҮВСО применяются в магнитометрии и высокочастотных устройствах, таких как резонаторы, перестраиваемые фильтры, антенны, приемные катушки медицинских томографов и т.д. Использование ВТСП позволяет улучшить параметры аппаратуры [1]. Востребованы однородные по толщине пленки, которые получают магнетронным или электронно-лучевым напылением [2], подбирая состав мишени к режиму напыления. Получение пленок ВТСП в режимах импульсного лазерного распыления позволяет добиться конгруэнтного распыления мишени после превышения порога абляции до величин около 2 Дж/см² [3, 4]. По кристаллической структуре хорошие пленки являются текстурованными и состоят из монокристаллических доменов диаметром 2-12 нм [5-8] двух кристаллических ориентаций орторомбической сверхпроводящей фазы YBa₂Cu₃O_{7 - х} с осью С, перпендикулярной плоскости (100) в подложках SrTiO₃. В общем случае из эрозионного факела при распылении разлетается поток частиц мишени разных размеров, осаждение которых на подложку формирует

147

пленку [9]. Такие компоненты потока, как атомы и ионы, должны позволять получать ровную поверхность, в то время как крупные частицы образуют шероховатую поверхность. Если исключить влияние крупных частиц лазерного факела на шероховатость поверхности, то она должна составлять в самом хорошем случае 1-2 нм, т.к. для YBCO параметр решетки С в направлении (001) составляет около 1.2 нм и является ступенькой минимального размера между кристаллическими плоскостями, перпендикулярными направлению роста вдоль оси С. Если же учесть неравномерный рост доменов в текстурованной пленке по мере увеличения ее толщины, то величина шероховатости будет увеличиваться с толщиной пленки. Как минимальную величину толщины пленки, сохраняющей сверхпроводимость, так и увеличение шероховатости с толщиной наблюдали в работе [10] на пленках YBa₂Cu₃O_{7 - х} толщиной от 10 до 50 нм. Рельеф поверхности влияет на качество и доступную ширину линий наноструктур, получаемых из пленок методами электронной литографии с использованием травления через маску. Исследование такого влияния важно при со-



Рис. 1. Схема напылительной установки. 1 – лазерный луч; 2 – кварцевая линза; 3 – подложка; 4 – нагреватель; 5 – входные окна; 6 – мишень; 7 – эрозионный факел.

здании наноструктур на пленках с известной шероховатостью.

В данной работе были оценены возможности технологий электронной литографии для получения наноструктур с разной шириной линий из ВТСП YBa₂Cu₃O_{7 – х} на подложках из титаната стронция после фильтрации и без фильтрации частиц эрозионного факела для получения разных характеристик рельефа поверхности при импульсном лазерном напылении и измерены некоторые электрические характеристики наноструктур.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве подложек для эпитаксиального роста использовали монокристаллические пластины SrTiO₃(100). Кристаллографическая ориентация поверхности подложек определялась необходимостью обеспечить максимальный критический ток синтезируемых слоев, чему соответствует ориентация (001) пленок YBCO. Мы использовали подложки 5 × 10 мм² толщиной 0.5 мм. Поверхность подложек перед напылением очищали травлением в смеси ($H_2SO_4 + HNO_3$) и промыванием в дистиллированной воде.

Использованная в данной работе установка для импульсного лазерного напыления (рис. 1) состояла из эксимерного лазера CL7100 и вакуумного поста ВУП-4 с насосом Varian SH-110 и турбомолекулярного поста Varian TPS-compact, что позволяло получать в напылительной камере без масляный вакуум и менять давление окислительной среды от 1 атмосферы до 10⁻⁶ мм рт. ст. Для контроля энергии лазерного импульса часть излучения отводили светоделительной пластиной на измеритель энергии и мошности LabMax-TOP с сенсором J-50MUV-248. Лазерное излучение вводили в напылительную камеру через окно из кварца или CaF₂ и фокусировали в пятно на поверхность мишени кварцевой линзой с фокусным расстоянием 215 мм. В качестве скоростного фильтра, который позволяет отделить быструю мелкодисперсную фракцию распыленного потока вещества от медленной крупноразмерной, мы использовали вращающийся диск с отверстием [11]. Диск с окном диаметром 8, 6 и 4 мм, расположенным на расстоянии 75 мм от оси вращения находился на расстоянии 30-35 мм от мишени. Частота вращения диска составляла 100 Гц. Параметры излучения эксимерного лазера KrF: длина волны 248 нм, энергия импульса до 200 мДж, длительность импульса 15 нс, частота следования импульсов до 20 Гц. Эксперименты проводили при плотности энергии выше порога абляции: в районе 1.5-2 Дж/см² с пятном на поверхности мишени площадью примерно 6 мм².

Мишенью служили керамические таблетки $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ диаметром 2 см с плотностью 85% от плотности монокристаллов. Мишени были приготовлены из порошка стехиометрического состава производства Уральского завода химреактивов ТУ6-09-02-465-87. После прессования порошка и спекания при 930°С в течение 20 ч, у спеченных таблеток наблюдалась сверхпроводимость при температуре кипения жидкого азота, что подтверждалось их левитацией в магнитном поле. Для нагрева подложки и синтезируемой в процессе напыления (и при последующем ее отжиге) пленки применялась мини-печь, позволяющая изменять температуру от комнатной до 1000°С. Печь представляет собой алундовый тигель цилиндрической формы с внутренним диаметром 26 и длиной 45 мм, обмотанный спиралью из нихромовой проволоки и помещенный в керамические трубки для электроизоляции. Подложку приклеивали с помощью серебряной пасты к диску из сапфира диаметром 24 и толщиной 1.5 мм и помещалась в середину тигля на расстояние 17-22 мм от края. Диск из сапфира использовали для того, чтобы подложки различной формы и размеров размещались в центре печи. Температура нагрева контролировалась термопарой Pt – Pt + 10% Rh, спай которой находился в контакте с дном тигля. Для определения температуры положки показание этой термопары калибровались по термопаре Pt – Pt + 10% Rh, помещенной вместо подложки. Тонкие пленки YBa₂Cu₃O_{7-x}были получены распылением материала мишени сфокусированным лазерным излучением и последующим осаждением распыленного вещества на подложку из монокристаллического титаната стронция, нагретого до температуры 700-760°С. В процессе осаждения в рабочей камере под-



Рис. 2. Подложка SrTiO₃ (100) в ACM с кривой шероховатости; среднеквадратичное отклонение шероховатости (R_q) 0.13 нм (*a*). Поверхность YBCO пленки после напыления без фильтрации лазерного факела; среднеквадратичное отклонение шероховатости (R_q) 42.9 нм (δ).

держивалось давление от 0.4 до 0.8 мм рт. ст газаокислителя (закись азота N_2O или кислород O_2). По окончании напыления температуру нагревателя подложки понижали до 500°С, после чего в рабочую камеру напускали воздух до 1 атм. Далее полученная пленка в течение 30 мин охлаждалась до комнатной температуры. Оценки толщины пленочных слоев до литографии проводили с помощью экспресс-литографии контрольных образцов, в которых формировалась ступенька, высота которой измерялась профилометром Dektak-150.

Подробное изучение рельефа поверхности проводили в АСМ с оптической схемой контроля изгиба кантилевера (схемой регистрации смещения отраженного луча света (beam deflection)), а также в СЭМ JEOL JSM-840А и EVO-50. Диаметр острия кремневой иглы кантилевера составлял величину менее 60-50 нм. Экспонирование рисунка наноструктуры под технологию "lift-off" осуществляли в СЭМ JEOL JSM-840А или EVO-50, со встроенным программно-аппаратным комплексом NanoMaker с использованием резиста ПММА 950 К 2%. Необходимая для подобной литографии коррекция эффекта близости была осуществлена с учетом состава и особенностей пленки ВТСП на подложке титаната стронция, в программном обеспечении Nanomaker. Для дальнейшего травления ВТСП ионами аргона, была использована маска из пленки Al, напыленного способом термического испарения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полированная поверхность подложек SrTiO₃ (100) имела максимальный размах шероховатости порядка 0.7 нм, а среднеквадратичное отклонение (R_{q}) 0.13 нм (рис. 2*a*).

Размер крупных округлых частиц на поверхности пленки толщиной 450 нм, полученной без фильтрации, был определен в величину до 1мкм при среднеквадратичной шероховатости R_q 40-50 нм (рис. 2б). На АСМ изображении на рис. 26 минимальная величина округлых частиц, которые можно было разрешить с использованием нашей иглы, составила величину чуть менее 50-70 нм. Из пленок, имеющих на поверхности частицы размером от 1 мкм до 50-70 нм были получены микроструктуры с шириной линий от 1.5 мкм и больше хорошего качества (рис. 3а). Рисунок структур с шириной линий менее 1.5 мкм существенно портился по мере уменьшения заданной ширины сужениями, в отдельных местах сопоставимыми с поперечными размерами линий (рис. 3*в*), вплоть до их разрыва.

Размер крупных частиц на поверхности пленок, полученных в результате напыления с фильтрацией через отверстие 8 мм на рис. 4*a* составлял 200—500 нм. Крупные частицы были удалены друг от друга на расстояние в несколько микрон на волнистой, но относительно ровной поверхности пленки. Минимальный размер частиц по сравнению со случаем напыления без фильтрации не изменился и составил величину чуть менее 50—70 нм при $R_{\rm q}$ оцененном в 4—5 нм.



Рис. 3. Внешний вид в СЭМ микроструктур из YBCO пленок, полученных после напыления без фильтрации лазерного факела: (*a*), (*в*) – заданная литографией ширина линий 4 и 0.8 мкм, соответственно; (*б*) – с фильтрацией лазерного факела через отверстие 8 мм; заданная литографией ширина линий 0.7 мкм.

Другой характер приобрела поверхность пленок, полученных в результате напыления с фильтрацией через отверстие 6 и 4 мм (рис. 4*6*, 4*6*). Пленки состояли из округлых зерен диаметром 300-400 нм и высотой до 5 нм с R_q в гладких местах около 1-2 нм. Кроме этих зерен на поверх-



Рис. 4. Внешний вид в АСМ поверхности YBCO пленки, поученной с фильтрацией лазерного факела через отверстие 8 (*a*), 6 (*б*) и 4 мм (*в*). На вставке рис. (*в*) показана столбчатая структура доменов на грани кристалла с шириной столбцов не более 10 нм. Стрелки показывают зерна с шероховатостью 1–2 нм.

ности присутствовали кристаллы с правильной огранкой в виде пирамид с трех-четырех угольными основаниями, со сторонами до 200 нм и высотой до 60 нм рис. 4*б*. На боковых гранях можно было видеть огранку доменной структуры кристаллов. На пленке, полученной фильтрацией через отверстие 4 мм, ограненные частицы были выше, их огранка и зерна выражены лучше. При обоих режимах фильтрации отсутствовали округлые частицы размером в 50–70 нм, которые на-

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА том 48 № 2 2019

блюдались на пленках полученных без фильтрации и с фильтрацией через отверстие 8 мм.

Скорость напыления при размерах фильтрующих отверстий 8, 6, 4 мм составляла 5.4, 3.6 и 2.7 нм/мин, соответственно. Увеличение скорости напыления при фильтрации через отверстие 6 мм до 14 нм/мин за счет повышения частоты лазерных импульсов до 18 Гц (в 4 раза) принципиально не изменило вид поверхности. Она состояла из округлых гладких зерен диаметром 200 нм, на которых были распо-



Рис. 5. Зависимость сопротивления от температуры R(T) и температурная зависимость $I_c(T)$ для наноструктуры; на вставке ВАХ при T = 73.3 К и направлениях тока -I и +I.

ложены ограненные кристаллы с огранкой доменной структуры на боковых гранях. Из пленок, полученных с фильтрацией лазерного факела через отверстие 8 мм, были изготовлены наноструктуры с ровными границами (рис. *36*) и шириной линий 0.7 мкм.

Температура сверхпроводящего перехода пленок не обнаружила зависимости от режимов фильтрации и находилась в пределах 85.6-88.4 К. В кольцевых структурах изготовленной геометрии (рис. 3а, б) температура сверхпроводящего перехода (рис. 5) (R = 0 при t = 81.5 K) оказалась выше, чем температура кипения жидкого азота $T_{\rm N}$ = 77 K, и ниже первого максимума $T_c = 92$ К YBCO. Температурная зависимость критического тока (треугольники на рис. 5) может быть представлена выражением $I_c(T) = I_c(0)(1 - T/T_c)^{3/2}$ (линия на рис. 5 слева), где $I_c(0) = 0.33$ А есть критический ток экстраполяции $T=0; T_c=81.5$ К. Значению критического тока соответствует своя плотность $j_c(0) = I_c(0)/s =$ $= 4 \times 10^7$ А: типичная для качественной пленки YBCO. Выявленная при измерениях асимметрия ВАХ (см. вставку рис. 5) свидетельствует о возможности наблюдения постоянного напряжения и, как следствие, "выпрямления" неравновесного шума или переменного тока. Ранее данное явление наблюдалось при измерениях асимметричных структур из обычных, низкотемпературных сверхпроводников в [12, 13].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Известно, что у мелкодисперсной компоненты потока (атомы, ионы, кластеры) скорость разлета в вакууме составляет до 10^6 см/с, в то время как у крупных частиц – продуктов разрушения мишени – менее 10⁴ см/с [9]. При размерах фильтрующих отверстий 8, 6 и 4 мм, расположенных на расстоянии 75 мм от оси вращения, и скорости вращения диска 100 Гц оценка времени экспозиции составила 170, 127 и 85 мкс. За время этой экспозиции при расстоянии от мишени до диска, составляющем в нашем случае около 30 мм, и при синхронной работе лазера с окном, через диск успеют пролететь только частицы со скоростью больше 1.7×10^4 , 2.36×10^4 , 3.5×10^4 см/с (соответственно размерам отверстий 8, 6 и 4 мм). В условиях фильтрации через отверстие 8 мм из процесса формирования пленок были исключены частицы с размерами более 500 нм. Эти частицы разлетаются из факела со скоростями менее 1.7×10^4 см/с. После напыления через фильтры 6 и 4 мм на поверхности отсутствовали округлые частицы с размером 50-70 нм, дающие размах шероховатости до 20-40 нм, которые наблюдали при напылении без фильтрации и с фильтрацией через отверстие 8 мм. Можно полагать, что уменьшение размеров фильтрующего отверстия до 6мм и меньше привело к фильтрации частиц 50-70 нм, которые разлетаются со скоростями менее 2.36×10^4 см/с. Уменьшение размера фильтрующего отверстия до 4 мм не выявило изменения размера частиц на поверхности. По-видимому, из-за большой скорости разлета частицы размером менее 50 нм деформируются о поверхность и не дают существенного вклада в ее шероховатость, т.к. шероховатость наиболее гладких участков составляла 1-2 нм.

Крупные неровности на поверхности пленок, полученных через фильтры 6 и 4 мм образуют кристаллы с хорошей огранкой размером в основании до 0.2 мкм. Огранка настолько хорошая, что выявляются домены с поперечным размером до 10 нм, перпендикулярные поверхности пленки. На поверхности кристаллов имеется своя шероховатость, которая оценивается нами в величину до 5 нм, вероятно обусловленная разной скоростью роста отдельных доменов. Шероховатость величиной 4 нм показывают пленки толщиной 50 нм, выращенные на подложках MgO в работе [10]. Ограненные кристаллы не могут образоваться непосредственно из продуктов лазерного факела, а могут вырасти на благоприятно ориентированных зародышах осажденного материала. Такому росту способствует увеличение доли мелкодисперсных составляющих факела (при фильтрации через отверстия 4 и 6 мм), разлетающихся с высокими скоростями (мелкие кластеры, атомы и ионы из мишени), которые облегчают миграцию уже адсорбированных атомов. Преимущественный рост отдельных кристаллов (зерен) наблюдали ранее [14] на поперечных срезах в пленках алюминия, микролегированных несколькими элементами после магнетронного напыления на подложки с разной температурой. Влияние поверхностной диффузии на образование ограненных кристаллов можно оценить на примере сплошных пленок висмута, которые в результате отжига в сверхвысоком вакууме [15] могли превратиться в перфорированные или островковые пленки из ограненных кристаллов. Рост ограненных кристаллов при калибровке через отверстие 8 мм или при напылении без калибровки был подавлен высокой долей низкоэнергетичных крупных частиц из факела. Большая доля таких частиц понижает подвижность атомов на поверхности, а, кроме того, не дает вторичного распыления уже адсорбированных атомов. Таким образом, мы наблюдаем два вида неровностей на поверхности пленки: обусловленные крупными частицами лазерного факела и ограненными кристаллами. Для получения гладких пленок с шероховатостью на уровне 1-4 нм без ограненных кристаллов на больших поверхностях необходимо уменьшить время распыления, например, увеличением скорости осаждения. Скорость осаждения можно увеличить, уменьшив расстояние от экрана до подложки (рис. 1) или меняя размер пятна излучения, сфокусированного на мишени или, наконец, увеличивая энергию импульса. Чем больше размер пятна, тем более направленным, вытянутым становится образующийся факел, и плотность потока вещества по нормали к поверхности мишени тоже растет. Все эти параметры могут быть связаны друг с другом и дают в конкретном случае распределение крупных шероховатостей по поверхности. Например, увеличение плотности энергии



Рис. 6. Доступное разрешение литографии (заштрихованная область на рисунке) в зависимости от размера частиц на поверхности пленки (открытый кружок представляет результаты работы [10]).

требует увеличение диаметра пятна, что сразу же отражается на диаграмме направленности потока распыленного вещества.

Между качеством наноструктур и размером крупных частиц на поверхности пленок обнаруживается некоторое соответствие: при размере крупных частиц до 1 мкм (рис. 26), хорошего качества микроструктуры получали с шириной линий больше 1.5 мкм (рис. 3а), а при размере крупных частиц до 500 нм – с шириной линий свыше 700 нм (рис. 36). Такой же результат получается при сравнении геометрии структур с одинаковой заданной шириной линий, изготовленных из пленок "без" и "с" фильтрацией, т.е.разной шероховатостью — из пленок с фильтрацией получается практически совершенная литография с шириной линий 500-700 нм (рис. 36), в то время как из пленок без фильтрации (рис. 3с) – очень плохая. При обоих режимах напыления литография становится хуже при минимальной ширине, заданной рисунком литографии, близкой к размерам крупных неровностей на поверхности пленки: при 1 и 0.5 мкм, соответственно. Причина ухудшения качества заключается в локальном уменьшении поперечных размеров после травления в местах с низким рельефом. Можно полагать, что ухудшение качества наноструктур после травления ионами аргона происходит в результате стравливания пленки ВТСП в направлении вдоль поверхности подложки под маской. В таком случае для получения заданной ширины линий литографии не имела значения природа образованных неровностей: округлые частицы из лазерного факела или ограненные кристаллы, а имел значение только их размер в плоскости

пленки и перпендикулярно ей. С учетом результатов работы [10] зависимость между шириной линий в наноструктурах с хорошими границами после травления и размером частиц на поверхности представлена на рис. 6. Приблизительно пропорциональная зависимость позволяет оценить возможности применяемой технологии для получения наноструктур доступного размера в зависимости от качества поверхности пленки ВТСП.

выводы

1. На поверхности пленки, полученной без фильтрации лазерного факела, максимальный размер частиц в плоскости пленки достигал 1 мкм. Фильтрация лазерного факела через отверстия 8 мм уменьшила размер частиц до 500 нм. Расчетная скорость частиц, формирующих пленку, была больше 1.7×10^4 см/с. После фильтрации через отверстия 6 и 4 мм пленку формировали частицы с размером менее 50 нм, скорость разлета которых была больше 3.5×10^4 см/с. Это позволяло получить шероховатость пленки R_q 1–2 нм на площади в несколько квадратных мкм.

2. При фильтрации через отверстие свыше 8 мм рельеф поверхности формируют крупные частицы, прошедшие через фильтр. При фильтрации через отверстие 6 и 4 мм наиболее крупные шероховатости образуют ограненные кристаллы, которые вырастают в процессе напыления. В обоих случаях измеренная шероховатость R_q на площади более 20×20 мкм² качественно сохраняется.

3. Между качеством наноструктур и размером крупных частиц на поверхности пленок обнаруживается соответствие: хорошего качества наноструктуры получаются, если ширина линий больше крупных шероховатостей на поверхности пленки более чем в 1.5 раза.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 007-00220-18-00. А.А. Иванов благодарен за поддержку его работы фонду РФФИ (проект №18-02-00192).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Schneider J., Kohlstedt H., Woerdenweber R. Nanobridges of optimized YBa₂Cu₃O₇ thin films for superconducting flux-flow type devices // Appl. Phys. Lett. 1993. V. 63(17). P. 2426–2428.
- Sochnikov I., Shaulov A., Yeshurun Y., Logvenov G., Božovic I. Large oscillations of the magnetoresistance in nano-patterned high temperature superconducting films // Nature Nanotechnology. 2010. V. 5. P. 516–519.
- Кузнецов А.В., Санников И.И., Иванов А.А., Менушенков А.П. Температурная зависимость критического тока пленок YBa₂Cu₃O_{7 – δ} // Письма в ЖЭТФ. 2017. Т. 106. Вып. 5. С. 299–304.

- 4. Tulina N.A., Ivanov A.A., Rossolenko A.N., Shmytko I.M., Ionov A.M., Mozhchil R.N., Bozhko S.I., Borisenko I.Y., Tulin V.A. X-ray photoelectron spectroscopy studies of electronic structure of $Nd_{2-x}Ce_{x}CuO_{4-y}$ and $YBa_{2}Cu_{3}O_{7-y}$ epitaxial film surfaces and resistive switchings in high temperature superconductor-based heterostructures // Materials Letters. 2017. V. 203. P. 97–99.
- Wu J.Z., Shi J.J., Baca J.F., Emergo R., Haugan T.J., Maiorov B., Holesinger T. The effect of lattice strain on the diameter of BaZrO₃ nanorods in epitaxial YBa₂Cu₃O_{7-δ} films // Supercond. Sci. Technol. 2014. V. 27(4). P. 044010-1–044010-7.
- Mele P., Matsumoto K., Horide T., Ichinose A., Mukaida M., Yoshida Y., Horii S., Kita R. Systematic study of BaSnO₃ doped YBa₂Cu₃O_{7-x} films // Physica C. 2009. V. 469. P. 1380–1383.
- Varanasi C.V., Burke J., Brunke L., Wang H., Lee J.H., Barnes P.N. Critical current density and microstructure variations in YBa₂Cu₃O_{7-x} + BaSnO₃ films with different concentrations of BaSnO₃ // J. Mater. Res. 2008. V. 23(12). P. 3363–3369.
- Varanasi C.V., Burke J., Wang H., Lee J.H., Barnes P.N. Thick YBa₂Cu₃O_{7-x} + BaSnO₃ films with enhanced critical current density at high magnetic fields // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 93(9). P. 092501-1–092501-3.
- 9. Менушенков А.П., Неволин В.Н., Петровский В.Н. Физические основы лазерной технологии // М.: Министерство образования и науки Российской федерации. НИЯУ МИФИ, 2010. 212 с.
- Arpaia R., Golubev D., Baghdadi R., Ciancio R., Dražić G., Orgiani P., Montemurro D., Bauch T., Lombardi F. Transport properties of ultrathin YBa₂Cu₃O₇₋₈ nanowires: A route to single-photon detection // Phys. Rev. B 2017. V. 96. P. 064525-1-064525-11.
- Pechen E.V., Varlashkin A.V., Krasnosvobodtsev S.I., Brunner B., Renk K.F. Pulsed-laser deposition of smooth high T_c superconducting films using a synchronous velocity filter // Appl. Phys. Lett. 1998. V. 66. P. 2292–2294.
- Burlakov A.A., Chernykh A.V., Gurtovoi V.L., Ilin A.I., Mikhailov G.M., Nikulov A.V., Tulin V.A. Quantum periodicity in the critical current of superconducting rings with asymmetric link-up of current leads // Physics Letters A. 2017. V. 381. P. 2432–2438.
- Jiangdong Ji, Jie Yuan, Ge He, Biaobing Jin, Beiyi Zhu, Xiangdong Kong, Xiaoqing Jia, Lin Kang, Kui Jin, Peiheng Wu. Vortex ratchet effects in a superconducting asymmetric ring-shaped device // Appl. Phys. Lett. 2016. V. 109. P. 242601-1–242601-4.
- 14. Ильин А.И., Гликман Е.Е., Борисенко И.Ю., Захаров Н.Д., Старков В.В. Структура тонких металлических пленок в системе Al/SiO₂/Si в связи с их сопротивлением электродеградации // Поверхность. Физика, химия, механика. 1991. Т. 94. С. 77–85.
- Ильин А.И., Дубонос С.В., Черных А.В. Получение монокристаллических ориентированных субмикронных структур из пленок Ві и Ві–Sb на подложках SiO₂/Si // Известия ВУЗов. Материалы электронной техники. 2010. Т. 1. С. 63–71.