

УДК 621.315.592

Цепочки и решетки из бикристаллических джозефсоновских переходов на параллельных бикристаллических границах в пленках высокотемпературного сверхпроводника

© Авторы, 2019

© ООО «Издательство «Радиотехника», 2019

Е.А. Степанцов –

к.ф.-м.н., вед. науч. сотрудник, Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова, ФНИЦ Кристаллография и фотоника РАН (Москва)

E-mail: stepantsov@ns.crys.ras.ru

М.А. Тарасов –

д.ф.-м.н., гл. науч. сотрудник, Институт радиотехники и электроники им. А.В. Котельникова РАН (Москва)

E-mail: tarasov@hitech.cplire.ru

Аннотация

Постановка проблемы. Для синхронной и быстродействующей работы джозефсоновских переходов в цепочке для одиночной бикристаллической границы необходимо обеспечение соединения переходов в виде меандра, многократно пересекающего границу в бикристаллической подложке. Однако, такое соединение приводит к повышению индуктивности между элементами, увеличению времени задержки сигнала и их размеров. Это существенно ограничивает развитие цифровых быстрых одноквантовых схем логики на сверхвысокочастотных устройств на частотах выше 300 ГГц.

Цель – создание цепочек из последовательно соединенных бикристаллических джозефсоновских переходов, а также решеток из них, на пяти параллельных бикристаллических границах в пленках высокотемпературного сверхпроводника.

Результаты разработки. Предложена новая концепция построения последовательных цепочек бикристаллических джозефсоновских переходов на параллельных межзеренных границах в пленках высокотемпературного сверхпроводника. Из кристаллов Y-ZrO₂ получены подложки, содержащие пять плоских, параллельных друг другу и перпендикулярных поверхности бикристаллических границ, отстоящих друг от друга на несколько микрон. На них выращены сверхпроводящие пленки YBa₂Cu₃O₇ с наследованием этих границ. В пленках на этих границах получены и обмерены на электрофизические характеристики наноструктуры в виде цепочек из пяти бикристаллических джозефсоновских переходов, а также решетки из 25 (5x5) таких контактов.

Практическая значимость. Получена цепочка из последовательно соединенных бикристаллических джозефсоновских переходов в виде сверхпроводящего мостика в пленке высокотемпературного сверхпроводника YBa₂Cu₃O₇, что подтверждает возможность использования на практике таких структур в микроволновых детекторах.

Ключевые слова

Сверхпроводимость, лазерная абляция, тонкие пленки, межзеренные границы, джозефсоновские переходы.

DOI: 10.18127/j22250980-201904-01

Введение

В настоящее время лучшими джозефсоновскими переходами в области высокотемпературной сверхпроводимости являются переходы, основанные на бикристаллических границах [1]. Такие границы получаются в результате выращивания пленок высокотемпературных сверхпроводников на бикристаллических подложках. Первые устройства этого типа были созданы в фирме IBM в 1988 г. [2]. Переходы такого рода использовались для получения сравнительно простых активных электронных приборов, таких как SQUID с двумя джозефсоновскими контактами [1]. Для синхронной и быстродействующей работы джозефсоновских переходов в цепочке необходимо располагать их возможно ближе друг к другу. В случае одиночной бикристаллической границы это достигается соединением переходов в виде меандра, многократно пересекающего границу в бикристаллической подложке. Однако такое соединение неизбежно сопровождается наличием в цепях больших последовательных индуктивностей между элементами, ростом времен задержки, увеличением размеров. Это препятствует созданию сверхвысокочастотных устройств на частотах выше 300 ГГц, а также развитию цифровых быстрых одноквантовых схем логики на квантах магнитного потока, известных также под аббревиатурой RSFQ, с большим количеством переходов. Кроме того, создание приборов на базе RSFQ-схем [3] привело к значительному увеличению числа элементов на одной бикристаллической границе.

Потребность в дальнейшем развитии таких устройств за счет увеличения числа джозефсоновских переходов привело к необходимости создания подложек с двумя параллельными бикристаллическими границами, разнесенными на расстояние 10...20 мкм друг от друга. Это, в свою очередь, позволило существенно развить устройства, основанные на RSFQ-схемах [4]. В настоящее время возможности улучшения параметров таких структур практически исчерпаны. Для дальнейшего роста числа джозефсоновских переходов в одной электронной схеме требуется наличие значительно больше параллельных бикристаллических границ в подложке.

Ц е л ь р а б о т ы – провести попытку создания цепочек из последовательно соединенных бикристаллических джозефсоновских переходов, а также решеток из них, на пяти параллельных бикристаллических границах в пленках высокотемпературного сверхпроводника.

Материалы и методы

Методом твердофазного сращивания кристаллов [5] $Y-ZrO_2$ были созданы подложки кристаллографической ориентации (100), содержащие пять строго прямолинейных, параллельных искусственных бикристаллических границ. Каждая из них не отличается от бикристаллических границ в бикристаллических подложках, используемых для создания бикристаллических джозефсоновских переходов на основе пленок высокотемпературных сверхпроводников. Расстояние между периферийными межзеренными границами составляло 15 и 18 мкм между центральными. Их параллельность обеспечивалась с точностью $\pm 1,0$ мкм на 10 мм длины. Все границы были симметричного типа с разориентацией кристаллических решеток на каждой из них в 24° (т.е. $12^\circ/12^\circ$), с точностью в $0,1^\circ$.

Полученные подложки с пятью параллельными бикристаллическими границами были использованы для выращивания на них пленок высокотемпературного сверхпроводника $YBa_2Cu_3O_7$. Данный процесс проводился методом лазерной абляции [2]. С этой целью применялось ультрафиолетовое излучение с длиной волны 248 нм Krf-экцимерного лазера для облучения вращающейся мишени стехиометрического состава. У вершины образующегося при этом плазменного факела размещалась подложка, приклеенная серебряной пастой к резистивному нагревателю. Процесс проводился при температуре $710^\circ C$ в атмосфере кислорода при давлении 0,4 мБар. Охлаждение по окончании осаждения осуществлялось со скоростью $10^\circ C$ в минуту при атмосферном давлении кислорода. На всех образцах пленка высокотемпературного сверхпроводника $YBa_2Cu_3O_7$ выращивалась одной толщины, (200 нм). При таких условиях выращивания пленка $YBa_2Cu_3O_7$ ориентировалась по плоскости (001), и направление [100] в ней было параллельно направлению [110] в подложке $Y-ZrO_2$.

При кристаллографическом ориентировании кристаллов $Y-ZrO_2$ в процессе изготовления подложек, а также при характеристизации структуры выращенных пленок применялись рентгеновские методики с использованием четырехкружного рентгеновского дифрактометра (Philips X'Pert) [6, 7]. При этом использовалось рентгеновское излучение от трубки с медным анодом ($\lambda = 0,154$ нм), которое отфильтровывалось в монохроматоре $4xGe(220)$, выполненном по схеме Бартельса [8].

Полученные бикристаллические границы в пленках в дальнейшем использовались для формирования бикристаллических джозефсоновских переходов. На данных подложках в пленке методом фотолитографии и последующего ионного травления в потоке плазмы аргона формировались различные цепочки, состоящие из такого рода контактов.

Результаты и их обсуждение

Для решения поставленных в настоящей работе задач были разработаны две топологии схемы из бикристаллических джозефсоновских переходов. Одна из них представляла собой мостик, пересекающий пять параллельных бикристаллических границ и таким образом создающих цепочку из последовательно соединенных переходов. Вторая схема представляла собой двумерную решетку из 25 (5×5) переходов на таком же комплексе границ.

Т о п о л о г и я п е р в о й с х е м ы была разработана для исследования микроволнового отклика и синхронизации джозефсоновских колебаний в последовательных цепочках бикристаллических джозефсоновских переходов. Структура состояла из планарной логопериодической антенны и мостика из $YBa_2Cu_3O_7$ -пленки, нанесенного поверх пяти бикристаллических границ в подложке (рис. 1). Длина мо-



Рис. 1. Фрагмент структуры на основе пленки высокотемпературного сверхпроводника $YBa_2Cu_3O_7$, включающей цепь из пяти последовательно соединенных джозефсоновских бикристаллических переходов на пяти параллельных бикристаллических границах, интегрированную с логопериодической антенной

Fig.1. Fragment of a structure on the base of a film of high temperature superconductor $YBa_2Cu_3O_7$, including an array from five connected in series bi-crystal Josephson junctions on five parallel bi-crystal grain boundaries, integrated with logo-periodical antenna

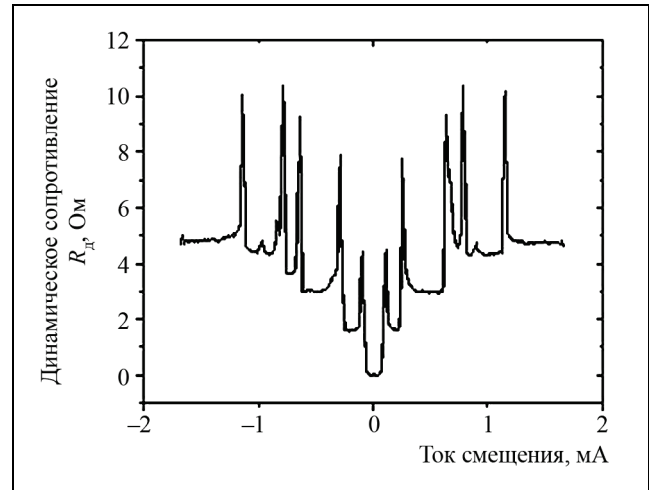


Рис. 2. График зависимости динамического сопротивления R_d цепи из пяти последовательно соединенных джозефсоновских бикристаллических переходов на пяти параллельных бикристаллических границах от тока смещения I_{cm} без СВЧ-облучения

Fig.2. Dependence of value of dynamical resistance R_d of an array from five connected in series bi-crystal Josephson junctions on five parallel bi-crystal grain boundaries vs value of bias current I_{cm} without micro-wave radiation

стика в этом случае составляла 90 мкм, ширина – 4 мкм. Полный размер антенны составлял 1,2 мм. Подложка, размером 5×5 мм, с такой интегральной структурой прижималась к плоской поверхности удлиненной полусферической кремниевой линзы и помещалась в гелиевый криостат с оптическим окном.

На рис. 2 представлена вольт-амперная характеристика такой цепочки из последовательно соединенных джозефсоновских переходов в виде зависимости динамического сопротивления R_d от величины тока смещения I_{cm} . Измерения проводились при температуре жидкого гелия 4,2 К.

Под воздействием СВЧ-излучения на частоте 9 ГГц, которое подавалось на структуру со стороны подложки, на вольт-амперных характеристиках возникали множественные ступени Шапиро. Это отражено на рис. 3 в виде зависимости динамического сопротивления R_d от приложенного напряжения U . На ней видно 29 кратных ступенек Шапиро при напряжении смещения до 2,3 мВ. Несмотря на разброс по критическому току на вольт-амперных характеристиках ступени Шапиро наблюдались при напряжениях кратных $5hf/(2e)$ и равных 90 мкВ, где h – постоянная Планка, f – частота излучения, равная 9 ГГц, а e – заряд электрона. Наличие ступенек Шапиро при напряжениях до 2,5 мВ примерно в 3,5 раза превышает этот показатель, соответствующий одиночному бикристаллическому джозефсоновскому переходу [9]. Наблюдение кратных ступеней Шапиро объясняется синхронизацией джозефсоновской генерации отдельных джозефсоновских переходов, возникающей под действием внешнего монохроматического излучения, и его взаимодействием с собственным джозефсоновским излучением в резонансной электродинамической системе такой, как детекторная камера криостата, с помещенной в нее цепочкой последовательно соединенных бикристаллических джозефсоновских переходов.

Топология второй схемы соответствовала двумерной решетке из 25 (5×5) джозефсоновских переходов, построенной на пяти параллельных бикристаллических границах (БГ), отстоящих друг от друга на 15 и 18 мкм. Изображение образца, созданного по такой схеме, представлено на рис. 4. Эту схему можно рассматривать как совокупность параллельных джозефсоновских линий передачи, которые являются основным элементом устройств RSFQ, основанных на цифровых быстрых одноквантовых схемах логики на квантах магнитного потока. Такая линия состоит из серии SQUID, образованных вертикальными проводниками 1, 2, 3, 4, 5, соединенных последовательно по магнитному потоку и параллельно по постоянному току смещения. Магнитный поток в линию SQUID задавался подачей тока в один из сверхпроводящих проводников (горизонтальные проводники 1, 2, 3, 4) или во внешнюю катушку. Ширина мостиков составляла 4 мкм, а размер ячеек петель SQUID – 12×12 мкм.

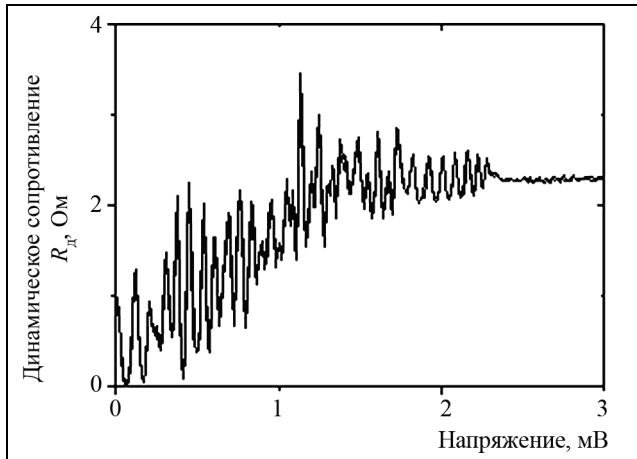


Рис. 3. Графики зависимости динамического сопротивления R_d цепи из пяти последовательно соединенных джозефсоновских бикристаллических переходов на пяти параллельных межзеренных границах от напряжения U под действием микроволнового излучения частотой 9 ГГц

Fig. 3. Dependence of value of dynamical resistance R_d of an array from five connected in series bi-crystal Josephson junctions on five parallel bi-crystal grain boundaries vs value of voltage U under micro-wave radiation of 9 GHz frequency

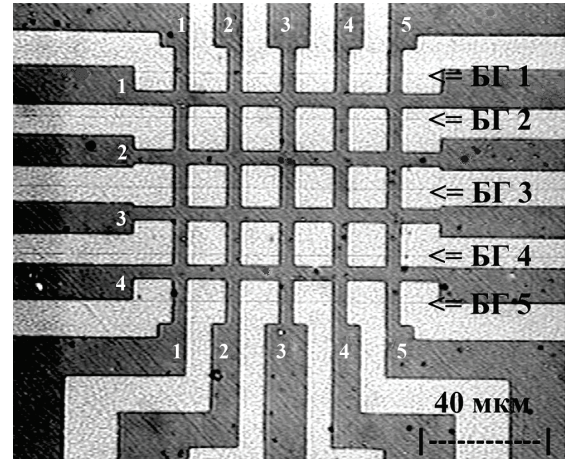


Рис. 4. Двумерная решетка из 25 бикристаллических джозефсоновских переходов на пяти параллельных бикристаллических границах

Fig. 4. Two-dimensional lattice from 25 bi-crystal Josephson junctions on five parallel bi-crystal grain boundaries

На рис. 5 представлена зависимость критического тока $I_{кр}$ параллельной цепочки SQUID (вертикальные линии 1 и 2) от величины тока I_y , протекающего в одной из сверхпроводящих управляющих линий 3 (горизонтальный сверхпроводящий проводник 3). Период осцилляций соответствует индуктивности SQUID, составляющего единичную ячейку.

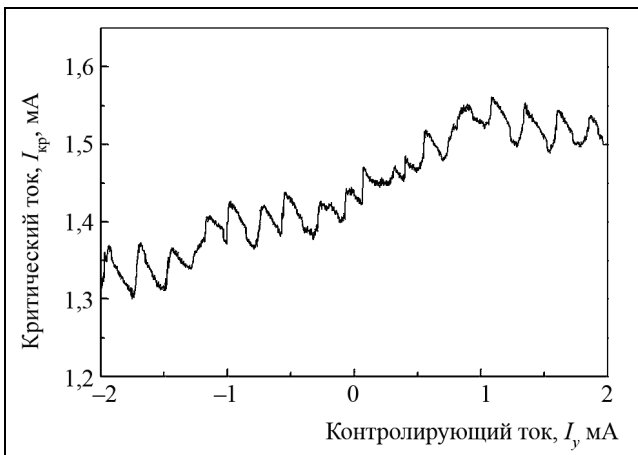


Рис. 5. График зависимости критического тока $I_{кр}$ параллельной цепочки SQUID (вертикальные линии 1 и 2) от управляющего тока I_y в сверхпроводящей контрольной линии 3

Fig. 5. Dependence of critical current $I_{кр}$ of a parallel array of SQUIDs (vertical lines 1 and 2) vs control current I_y in superconducting control line 3

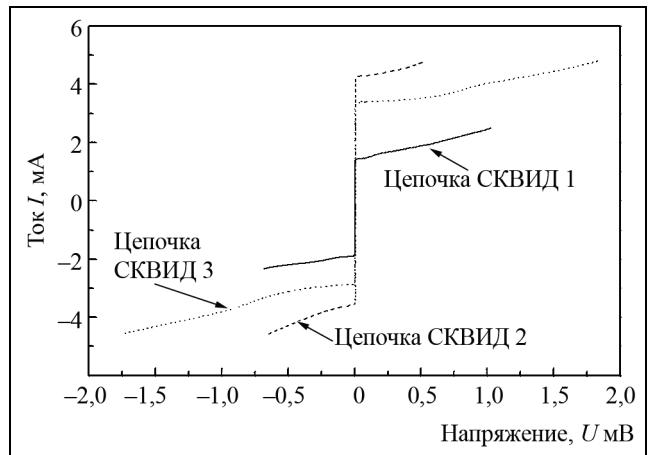


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики трех разных джозефсоновских линий управления на различных бикристаллических границах в двумерной решетке

Fig. 6. Current-voltage characteristics of three different Josephson control lines on different bi-crystal grain boundaries in two-dimensional lattice

На рис. 6 представлены вольт-амперные характеристики трех джозефсоновских линий управления на различных бикристаллических границах в пределах одной и той же двумерной решетки из 25 бикристаллических джозефсоновских переходов на пяти параллельных межзеренных границах

Разброс критических токов в разных линиях параллельной цепочки SQUID достигал 50%. Аналогичные зависимости для одиночных переходов, расположенных вдоль одной границы, соответствовали разбросу критического тока в 10 %. Полученный результат по указанному разбросу не является предельно достижимым. Представленная работа является лишь первой попыткой в данном направлении.

Очевидно, что за счет улучшения качества пленки вполне можно уменьшить разброс критических токов между линиями до 15 %. Согласно теоретическим оценкам, величина разброса в 15 % достаточна для большинства приборов, основанных на цифровых быстрых одноквантовых схемах логики на квантах магнитного потока.

Заключение

Предложена новая концепция построения последовательных цепочек бикристаллических джозефсоновских переходов на параллельных межзеренных границах в пленках высокотемпературного сверхпроводника. Ключевым компонентом такого устройства являлась подложка из кристаллов $Y-ZrO_2$, полученная методом твердофазного сращивания кристаллов, с пятью параллельными бикристаллическими границами симметричного типа, отстоящими друг от друга на несколько микрон. На каждой границе был реализован разворот кристаллических решеток в 24° ($12^\circ/12^\circ$). Цепочка из последовательно соединенных бикристаллических джозефсоновских переходов в виде сверхпроводящего мостика, пересекающего группу из пяти таких параллельных границ в пленке высокотемпературного сверхпроводника $YBa_2Cu_3O_7$, имела вольт-амперные характеристики, близкие к резистивной модели джозефсоновского перехода. На них наблюдались ступени Шапиро, что подтверждает принципиальную возможность использования таких структур в микроволновых детекторах.

Литература

1. Chaudhari P., Mannhart J., Dimos D. Direct Measurement of the Superconducting Properties of Single Grain Boundaries in $YBa_2Cu_3O_7$ // Phys. Rev. Lett. 1988. V. 60. P. 1653.
2. Ivanov Z.G., Nilsson P.A., Winkler D. Weak Links and dc-SQUIDS on Artificial Non-Symmetric Grain Boundaries in $YBa_2Cu_3O_{7-d}$ // Appl. Phys. Lett. 1991. V. 59. P. 3030–3032.
3. Ivanov Z.G., Kaplunenko V.K., Stepantsov E.A. An Experimental Implementation of a High-Tc Based RSFQ Set-Reset Trigger at 4.2K // Superconductor Science and Technology. 1994. V. 7. P. 239–241.
4. Kaplunenko V.K., Ivanov Z.G., Stepantsov E.A. Voltage divider based on submicron slits in a high-Tc superconducting film and two bicrystal grain boundaries. // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 67. № 2. P. 282–284.
5. Nilsson P.A., Ivanov Z.G., Winkler D. Properties of YBCO Junctions and SQUIDS on YSZ Bicrystals // Physica C. 1991. V. 185–189. P. 2597–2598.
6. Kyutt R.N., Banshchikov A.G., Kaveev A.K. Structure and surface morphology of MnF_2 epitaxial layers grown on grooved and ridged CaF_2 (110) surface // J. Phys D: Appl. Phys. 2007. V. 40. P. 4896–4901.
7. Ломов А.А., Чувев М.А., Ганин Г.В. Параметры многослойной гетероструктуры по результатам совместного анализа кривых дифракционного отражения от разных кристаллографических плоскостей // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. Вып. 10. С. 89–95.
8. Lomov A., Shcherbachev K., Chesnokov Y. The microstructure of Si surface layers after plasma-immersion He^+ ion implantation and subsequent thermal annealing // J. Appl. Cryst. 2017. V. 50. P. 539–546.
9. Веревкин А.А., Ильин В.А., Лунатов А.П. Характеристики последовательных цепочек $YBaCuO$ джозефсоновских переходов на бикристаллической подложке // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. № 24. С. 83–87.

Поступила 16 июня 2019 г.

UDC 621.315.592

Arrays and lattices from bi-crystal Josephson junctions on parallel bi-crystal boundaries in high-T_c superconducting films

© Authors, 2019

© Radiotekhnika, 2019

E.A. Stepanov –

Ph.D. (Phys.-Math.), Senior Research Scientist, FSIC Crystallography and Photonics RAS (Moscow)

E-mail: stepantsov@ns.crys.ras.ru

M.A. Tarasov –

Dr.Sc. (Phys.-Math.), Leader Research Scientist, Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS (Moscow)

E-mail: tarasov@hitech.cplire.ru

Abstract

Crystalline composites, containing five flat and parallel to each other bi-crystal grain boundaries, have been created by solid phase intergrowth method of Y-ZrO₂ crystals at temperature 1800 °C in ultra-high and oil free vacuum. All the bi-crystal grain boundaries were of symmetrical type with mis-orientation angle of crystalline lattices 24° (12°/12°) on each of them. The bi-crystal grain boundaries were separated from each other by distance 15 μ and 18 μ. The composites have been cut for thin plates perpendicular to all bi-crystal grain boundaries and parallel to crystallographic plane (100), which was common for all single crystalline parts of them. The received plates have been epi-polished by chemical-mechanical method. By this way the substrates, suitable for epitaxial thin film growth, have been produced. The films of high-T_c superconductor YBa₂Cu₃O₇ have been grown on such substrates with inheriting of very closely spaced bi-crystal grain boundaries from them by pulse laser deposition method in low pressure oxygen atmosphere. Two types of structures have been patterned in the films by deep ultraviolet lithography and dry plasma etching through masks by argon beam milling. The topology of one of them included an array from five bi-crystal Josephson junctions, connected in series. It was fulfilled in form of straight-line micro-bridge, crossing all five very closely spaced parallel bi-crystal grain boundaries. The array was integrated with planar log-periodical antenna for absorbing micro-wave radiation. The topology of second type structures was realized, as a lattice from twenty five (5 x 5) bi-crystal Josephson junctions also based on the complex of five very closely spaced parallel bi-crystal grain boundaries. The measurement of electrical characteristics of the all specimens have demonstrated that the structures, created in accordance with the first topology, have revealed parameters, which were very close to current-voltage characteristics, corresponding to individual bi-crystal Josephson junction, and divisible Shapiro steps under micro-wave radiation. It was also measured that arrays of SQUIDs of two dimensional lattice of the second type structures, have demonstrated oscillated dependence of critical current from value of the current in superconducting control line.

Keywords

Superconductivity, X-ray diffraction, laser ablation, thin films, grain boundaries, Josephson junctions.

DOI: 10.18127/j22250980-201904-01

References

1. Chaudhari P., Mannhart J., Dimos D. Direct Measurement of the Superconducting Properties of Single Grain Boundaries in YBa₂Cu₃O₇ // Phys. Rev. Lett. 1988. V. 60. P. 1653.
2. Ivanov Z.G., Nilsson P.A., Winkler D. Weak Links and dc-SQUIDs on Artificial Non-Symmetric Grain Boundaries in YBa₂Cu₃O_{7-d} // Appl. Phys. Lett. 1991. V. 59. P. 3030–3032.
3. Ivanov Z.G., Kaplunenko V.K., Stepanov E.A. An Experimental Implementation of a High-T_c Based RSFQ Set-Reset Trigger at 4.2K // Superconductor Science and Technology. 1994. V. 7. P. 239–241.
4. Kaplunenko V.K., Ivanov Z.G., Stepanov E.A. Voltage divider based on submicron slits in a high-T_c superconducting film and two bicrystal grain boundaries. // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 67. № 2. R. 282–284.
5. Nilsson P.A., Ivanov Z.G., Winkler D. Properties of YBCO Junctions and SQUIDs on YSZ Bicrystals // Physica C. 1991. V. 185–189. P. 2597–2598.
6. Kyutt R.N., Banshchikov A.G., Kaveev A.K. Structure and surface morphology of MnF₂ epitaxial layers grown on grooved and ridged CaF₂ (110) surface // J. Phys D: Appl. Phys. 2007. V. 40. R. 4896–4901.
7. Lomov A.A., Chuev M.A., Ganin G.V. Parametry mnogoslojnoj geterostrukturnykh po rezul'tatam sovmestnogo analiza krivykh difrakcionnogo otrazheniya ot raznykh kristallograficheskikh ploskostej // Pis'ma v ZHTF. 2004. T. 30. Vyp. 10. S. 89–95.
8. Lomov A., Shcherbachev K., Chesnokov Y. The microstructure of Si surface layers after plasma-immersion He⁺ ion implantation and subsequent thermal annealing // J. Appl. Cryst. 2017. V. 50. P. 539–546.
9. Verevkin A.A., Il'in V.A., Lipatov A.P. Harakteristiki posledovatel'nykh cepochek YBaCuO dzhozefsonovskih perekhodov na bikristallicheskoj podlozhke // Pis'ma v ZHTF. 1998. T. 24. № 24. S. 83–87.