

**Краткая аннотация**  
**цикла работ за период 2017-2022,**  
**выдвигаемого на премию ОИЯИ.**

**Название:** Аномальный эффект Джозефсона

**Исполнители:** Ю. М. Шукринов, внс, д.ф-м.н., И. Р. Рахмонов, снс, к.ф-м.н., К. В. Куликов, нс, к.ф-м.н., М. Нашаат, нс, PhD, А.А. Мазаник, аспирант

**Организация:** ЛТФ, ОИЯИ

Эффект Джозефсона, заключающийся в туннелировании спаренных электронов через барьер, находит колоссальные применения в различных областях науки, техники, медицины. В частности, приборы на его основе применяются в сверхпроводниковой электронике для измерения сверхслабых магнитных полей, в квантовой метрологии в качестве современных стандартов вольта, в медицине для снятия магнитоэнцефалограмм головного мозга. Эффект Джозефсона является основой для генерирования и детектирования когерентного электромагнитного излучения в терагерцовой области.

До последнего времени не удавалось совместить сверхпроводимость и магнетизм, поскольку эти явления являются антагонистическими: магнитное поле уничтожает сверхпроводимость, а сверхпроводимость выталкивает магнитное поле. Однако, в гибридных джозефсоновских структурах их удалось сблизить, что позволяет сверхпроводимости управлять магнетизмом, а магнетизму влиять на сверхпроводимость [1]. Образно говоря, удалось их «поженить», и этот «брак» стал основой новой области науки: сверхпроводниковой спинтроники. Для реализации этого взаимодействия потребовалось нарушить в гибридной джозефсоновской структуре две симметрии: симметрию инверсии и симметрию относительно обращения времени. Это приводит к изменению джозефсоновского ток-фазового соотношения, где возникает добавка к разности фаз волновых функций сверхпроводников, пропорциональная намагниченности ферромагнетика. Одновременно с изменением ток-фазового соотношения возникает обратное влияние сверхпроводимости на магнетизм.

Одним из основных направлений наших исследований является решение фундаментальных задач сверхпроводниковой спинтроники – разработка принципиально новых способов контроля намагниченности магнетиков, а также радикальное снижения энергозатрат при функционировании спинтронных устройств.

Решение второй проблемы было получено в одной из первых наших работ [20], где была разработана методика и продемонстрирован переворот магнитного момента импульсом сверхпроводящего тока. Возможность бездиссипативного контроля намагниченности позволяет многократно снизить энергозатраты. На следующем шаге были найдены аналитические критерии переворота в структурах различных типов [7,8],

обнаружена периодичность в возникновении интервалов переворота при изменении параметров спин-орбитальной связи и гильбертовского затухания, а также отношения джозефсоновской энергии к магнитной [15]. Известные специалисты в области сверхпроводниковой спинтроники С. Guarcello and F.S. Bergeret использовали наш метод переворота и предложили криогенный элемент памяти, основанный на аномальном эффекте Джозефсона (С. Guarcello and F.S. Bergeret, A cryogenic memory element based on an anomalous Josephson junction, Phys.Rev.Appl, 13, 034012, 2020).

Дальнейшие наши исследования были посвящены разработке принципиально новых методов контроля намагниченности. Одни из таких методов был найден при детальном исследовании фазовой динамики и вольт-амперных характеристик в структурах с аномальным эффектом Джозефсона. Нами был открыт новый эффект – проявление свойств маятника Капицы (появление динамически стабильных устойчивых положений намагниченности) в аномальном джозефсоновском переходе (АДП) [19, 20], а также в системе «джозефсоновский переход -наноманит» (ДП-НМ) [4,14], открывающий возможность переориентации легкой оси ферромагнетика. Уникальность этого метода заключается в том, что он позволяет изменять ориентацию намагниченности и положение точек стабильности за счет приложенного высокочастотного периодического воздействия и открывает новый способ управления намагниченностью с помощью сверхпроводящего тока.

Нами был также найден новый метод контроля динамики магнитной прецессии. Возможность управления динамикой магнитной прецессии сверхпроводящим током открывает широкий простор для применений в сверхпроводниковой электронике и спинтроники. В нашей работе [2] впервые продемонстрирован не прямой захват магнитной прецессии в SFS переходе джозефсоновскими осцилляциями под действием внешнего периодического сигнала, что отражается возникновением ступенек синхронизации на зависимости намагниченности от тока через переход. Положение ступеньки определяется частотой излучения и формой резонансной кривой.

Другим интересным эффектом является проявление состояния с отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОДС) на вольт-амперной характеристике АДП. Такие состояния могут быть использованы в коммутационных схемах и мультивибраторных электронных устройствах. Нами показано, что в области с ОДС на вольт-амперной характеристике возникает дополнительная ступенька. Детальные исследования [2] показали, что соответствующие этой ступеньке осцилляции имеют ту же частоту, что и осцилляции на первой ступеньке, но они имеют другую амплитуду. Это позволяет управлять не только частотой, но и амплитудой магнитной прецессии в области захвата. Возникают уникальные перспективы для контроля и управления динамикой магнитного момента в таких гибридных системах.

Нами был получен ряд других интересных эффектов, возникающих в гибридных наноструктурах. В частности, было продемонстрировано, что новые динамически стабильные положения намагниченности могут приводить к расщеплению легкой оси ферромагнетика в SFS джозефсоновских переходах на поверхности трехмерного топологического изолятора [13]. Было показано, что такое расщепление приводит к стабилизации нетрадиционного четырехкратно вырожденного ферромагнитного состояния. Также было показано, что напряжение на переходе связано с изменением

компоненты намагниченности, что позволило нам предложить механизм электрического контроля намагниченности в SFS переходе на поверхности 3D топологического изолятора.

Наиболее важной характеристикой джозефсоновской структуры, измеряемой экспериментально, является ее вольт-амперная характеристика. В связи с этим она исследовалась достаточно подробно. Нами впервые обнаружены субгармонические лестничные структуры на вольт-амперных характеристиках, обусловленные влиянием динамики намагниченности на разность фаз в джозефсоновском переходе [10,16-18]. Такие структуры могут быть использованы в различных областях сверхпроводниковой спинтроники. Они чувствительны к изменению периодичности в динамике системы и могут служить индикатором различных экзотических состояний. В частности, они могут быть использованы для регистрации майорановских связанных состояний в джозефсоновских наноструктурах.

Одной из важнейших задач в области кодирования данных и повышения безопасности связи является разработка методов контроля и управление хаосом. Нами было продемонстрировано богатое разнообразие периодического и хаотического поведения в динамике магнитного момента в системе ДП-НМ [3]. Было также показано, что хаотическим поведением системы можно управлять, подавая внешний периодический сигнал нужной частоты и амплитуды. Предполагается, что такую систему можно использовать в качестве хаотических логических гейтов в компьютерах на основе хаотических систем.

Важные результаты были получены при исследовании резонансных свойств гибридных наноструктур. В SFS структурах [11,12] и системе ДП-НМ [15] нами был продемонстрирован сдвиг резонансной частоты, вызванный взаимодействием магнитной подсистемы с джозефсоновским переходом. Полученные результаты обладают большой практической значимостью. Как известно, одним из методов определения характеристик магнитных систем является ферромагнитный резонанс (ФМР). Стандартная теория ФМР, основанная на микроволновом поглощении в магнитных материалах, показывает, что резонансная частота является функцией эффективного поля, параметров материалов и системы. Эта зависимость может быть использована для определения параметров материала. С другой стороны, эти параметры можно варьировать, чтобы контролировать свойства материала по поглощению микроволн. Эта двусторонняя связь между характеристиками ФМР и физическими параметрами системы обычно основана на аналитических выражениях, которые дают резонансную частоту как функцию параметров материала (константы анизотропии, обменные и дипольные связи). В случае же гибридных структур такие аналитические выражения не могут быть получены и приходится прибегать к численному моделированию или некоторому приближенному решению. Полученные нами результаты предоставляют необходимую информацию для оценки физических параметров в гибридных структурах типа SFS и ДП-НМ.

Интересные результаты были получены при исследовании ФМР в гибридных структурах сверхпроводников с ферромагнетиком [1,9]. Было продемонстрировано многообразие регулярных динамических состояний намагниченности вдоль вольт-амперной характеристики аномального джозефсоновского перехода, характеризующихся специфическими фазовыми траекториями [12]. Нами было показано, что ими можно управлять, в частности, было продемонстрировано, что внешнее электромагнитное

излучение позволяет фиксировать специфическую траекторию в пределах ступеньки Шапиро.

Нелинейные свойства гибридных структур ярко проявились в открытом нами эффекте аномальной зависимости резонансной частоты от параметра гильбертовского затухания [6]. Эта зависимость была названа  $\alpha$ -эффектом и объяснена в работах [5,6]. Было продемонстрировано, что связанная система уравнений Ландау-Лифшица-Гильберта-Джозефсона может быть сведена к скалярному нелинейному уравнению Даффинга. Мы показали, что имеется критическая величина затухания, при которой в игру вступает кубическая нелинейность, изменяющая зависимость частоты резонанса от затухания приводящему к данной зависимости. Демонстрация  $\alpha$ -эффекта при различных значениях спин-орбитального взаимодействия и отношения джозефсоновской энергии к магнитной приведена в нашей работе [5]. Нами была найдена формула, предсказывающая критическую величину затухания в зависимости от величины спин-орбитальной связи и отношения джозефсоновской энергии к магнитной.

#### Список основных публикаций

- 1- Шукринов Ю. М. Аномальный эффект Джозефсона, **УФН** **192** 345–385 (2022).
- 2- S. A. Abdelmoneim, Yu. M. Shukrinov, K. V. Kulikov, H. ElSamman, and M. Nashaat. Locking of magnetization and Josephson oscillations at ferromagnetic resonance in a  $\varphi_0$  junction under external radiation, **Phys. Rev. B** **106**, 014505 (2022).
- 3- M. Nashaat, M. Sameh, A. E. Botha, K. V. Kulikov, Yu. M. Shukrinov. Bifurcation structure and chaos in nanomagnet coupled to Josephson junction, **Chaos** **32**, 093142 (2022).
- 4- K. V. Kulikov, D. V. Anghel, A. T. Preda, M. Nashaat, M. Sameh, Yu. M. Shukrinov. Kapitza pendulum effects in a Josephson junction coupled to a nanomagnet under external periodic drive, **Phys. Rev. B** **105**, 094421 (2022).
- 5- A. Janalizadeh, I. R. Rahmonov, S. A. Abdelmoneim, Yu. M. Shukrinov and M. R. Kolahchi. Nonlinear features of the superconductor–ferromagnet–superconductor  $\varphi_0$  Josephson junction in the ferromagnetic resonance region, **Beilstein J. Nanotechnology** **13**, 1155–1166 (2022)
- 6- Yu. M. Shukrinov, I. R. Rahmonov, A. Janalizadeh, and M. R. Kolahchi. Anomalous Gilbert damping and Duffing features of the superconductor-ferromagnet-superconductor  $\varphi_0$  Josephson junction, **Phys. Rev. B** **104**, 224511 (2021).
- 7- I. V. Bobkova, A. M. Bobkov, I. R. Rahmonov, A. A. Mazanik, K. Sengupta, and Yu. M. Shukrinov. Magnetization reversal in superconductor/insulating ferromagnet/ superconductor Josephson junctions on a three-dimensional topological insulator, **Phys. Rev. B** **102**, 134505 (2020).
- 8- A. A. Mazanik, I.R. Rahmonov, A.E. Botha, and Yu. M. Shukrinov, Analytical criteria for magnetization reversal in a  $\varphi_0$  Josephson junction, **Phys. Rev. Applied** **14**, 014003 (2020).
- 9- Yu. M. Shukrinov, I. R. Rahmonov, and A. E. Botha. Peculiarities of IV characteristics and magnetization dynamics in the  $\varphi_0$  Josephson junction, **Low Temp. Phys.** **46**, 932 (2020).
- 10- M. Nashaat and Yu. M. Shukrinov, Ferromagnetic resonance and effect of supercurrent on the magnetization dynamics in S/F/S junctions under circularly polarized magnetic field, **Phys. Part. Nuclei** **17** (1), 7984 (2020).

- 11- Y.M. Shukrinov, and I.R. Rahmonov, Resonance Properties of the Josephson Junctions with Ferromagnets, **Phys. Part. Nuclei**. **51**, 816822 (2020).
- 12- Yu. M. Shukrinov, I. R. Rahmonov, and K. Sengupta, Ferromagnetic resonance and magnetic precessions in  $\Phi_0$  junctions, **Phys. Rev. B** **99**, 224513 (2019).
- 13- M. Nashaat, I. V. Bobkova, A. M. Bobkov, Yu. M. Shukrinov, I. R. Rahmonov, and K. Sengupta. Electrical control of magnetization in superconductor/ ferromagnet/ superconductor junctions on a three-dimensional topological insulator, **Phys. Rev. B** **100**, 054506 (2019).
- 14- Yu. M. Shukrinov, M. Nashaat, I. R. Rahmonov, and K. V. Kulikov, Ferromagnetic resonance and the dynamics of the magnetic moment in a Josephson junction– nanomagnet system, **JETP Letters** **110** (3), 160–165 (2019).
- 15- П. Х. Атанасова, С. А. Панайотова, И. Р. Рахмонов, Ю. М. Шукринов, Е. В. Земляная, М. В. Башашин. Periodicity in the Appearance of Intervals of the Reversal of the Magnetic Moment of a  $\Phi_0$  Josephson Junction, **Письма в ЖЭТФ**, **110**, 736 (2019).
- 16- M. Nashaat, Yu. M. Shukrinov, A. Irie, A. Y. Ellithi, and Th. M. El Sherbini, 16- Microwave induced tunable subharmonic steps in superconductor ferromagnet–superconductor Josephson junction, **Low Temp. Phys.** **45**, 1246 (2019).
- 17- Yu. M. Shukrinov , I. R. Rahmonov, and A. E. Botha. Superconducting Spintronics in the presence of spin-orbital coupling, **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, **28** (7), 1800505 (2018).
- 18- M. Nashaat, A. E. Botha, and Yu. M. Shukrinov. Devil's staircases in the IV characteristics of SFS Josephson junctions, **Phys. Rev. B** **97**, 224514 (2018).
- 19- Yu. M. Shukrinov, A. Mazanik, I. R. Rahmonov, A. E. Botha and A. Buzdin. Re-orientation of easy axis in  $\phi_0$  junction, **EPL**. **122**, 370012 (2018).
- 20- Yu. M. Shukrinov, I. R. Rahmonov, K. Sengupta, and A. Buzdin, Magnetization reversal by superconducting current in Josephson junctions, **Appl. Phys. Lett.** **110**, 182407 (2017).