

«Микроволновая спинтроника и спиновые токи»

К.А. Звездин, П.Н. Скирдков

Работы К.А. Звездина и П.Н. Скирдкова посвящены теоретическим исследованиям в области микроволновой спинтроники. Последние фундаментально важные результаты, относящиеся к исследованию микроволновой спинтроники показали большую перспективность этого направления, как с точки зрения фундаментальной физики сильно нелинейных систем, так и для использования таких устройств в практических приложениях. Помимо того, что спинтроника как таковая обладает дополнительной степенью свободы, связанной с учетом спина в дополнение к заряду, применение СВЧ дополнительно расширяет возможные применения. В рамках данного исследования были решены нижеприведенные задачи:

- Была рассмотрена динамика доменной границы (ДГ) в нанополоске, возбуждаемая локальной инжекцией тока. Было показано, что даже в случае пропускания тока только через небольшой контакт возможно осуществлять управляемое смещение ДГ. Данный результат важен для разработки мемристоров и нейросетей, реализованных «в железе», а также спинтронных логических устройств. Для упрощения последующего моделирования таких систем была построена аналитическая модель.

- Была рассмотрена динамика магнитных вихрей в наностолбиках. В частности, была модифицирована и расширена на общий случай ранее предложенная авторами теоретическая модель синхронизации двух спин-трансферных наноосцилляторов. Основные ее результаты позднее были подтверждены экспериментально совместно с французскими коллегами. На основе данных результатов возможно создания портативных телекоммуникационных генераторов.

- Были рассмотрены альтернативные варианты возбуждения намагниченности с применением спин-орбитальных эффектов. В частности, на основе экспериментальных результатов была построена эффективная теория для расчета вращающих моментов на интерфейсе платина – графен и оценена возможность перемагничивания ферромагнитных столбиков, нанесенных на данный интерфейс. Также была рассмотрена возможность возбуждения намагниченности за счет врезающих моментов, появляющихся на интерфейсе топологический изолятор – ферромагнетик при пропускании по нему тока. Детально была проанализирована возможность возбуждения динамики магнитного вихря в данном случае. Приведенные результаты важны с точки зрения создания энергоэффективных способов управления намагниченностью и хранения/записи информации.

- В контакте с экспериментаторами из СПбГУ были проанализированы новые материалы спинтроники такие как BiTeI и топологические изоляторы, легированные магнитными примесями. Теоретически было предсказано появление поверхностной намагниченности в подобных системах при низких температурах и в случае внешнего излучения. Соответствующее данной намагниченности открытие щели в энергетическом спектре было обнаружено экспериментально. Данное исследование важно с точки зрения поиска новых материалов, которые могли бы в себе сочетать наличие намагниченности и большое спин-орбитальное взаимодействие, необходимое для управления намагниченностью.

- Совместно с коллегами из Тайваня был изучен процесс спиновой накачки в структурах топологический изолятор – ферромагнетик. Была построена теоретическая модель описывающая процесс генерации постоянного напряжения за счет обратного спинового эффекта Холла. За счет данной модели удалось полностью объяснить экспериментальные результаты, в том числе и сложный многомодовый характер резонансов. Рассмотрено влияние температуры и изменения параметров на исследуемый процесс. Данное исследование важно с точки зрения возможности генерации чистых спиновых токов и альтернативных путей генерации напряжения в микроэлектронике.

- Теоретически изучен спиновый диодный эффект, заключающийся в выпрямлении внешнего переменного сигнала магнитным туннельным переходом. Предложены два новых дизайна спиновых диодов, позволяющие работать с более высокими и более низкими частотами соответственно. Детально проанализированы их характеристики. Данное исследование важно, так как относительно высокая чувствительность в случае сверхнизких входных мощностей и без внешних магнитных полей позволяет говорить о потенциальной полезности спинового диода для телекоммуникационных приложений, высокочувствительных СВЧ детекторов и высокоскоростных магнитных сенсоров.

Решенные авторским коллективом задачи обладают несомненной актуальностью и большой научной значимостью и были неоднократно подтверждены экспериментами.

Список публикаций:

1. **P.N. Skirdkov**, A.F. Popkov, **K.A. Zvezdin** “Vortex spin-torque diode: the impact of DC bias” // Appl. Phys. Lett. 113, 242403 (2018).
2. M.D. Davydova, A.S. Pakhomov, A.N. Kuz'michev, P.M. Vetoshko, **P.N. Skirdkov**, H.C. Han, Y.S. Chen, J.G. Lin, J.C. Wu, J.C.A. Huang, **K.A. Zvezdin** “Spin Pumping and Temperature-Resolved

Ferromagnetic Resonance in Permalloy-Topological Insulator Nanostructured Bilayers" // Journal of Electronic Materials, 1-5 (2018).

3. A.M. Shikin, A.A. Rybkina, D.A. Estyunin, D.M. Sostina, V.Yu. Voroshnin, I.I. Klimovskikh, A.G. Rybkin, Yu.A. Surnin, K.A. Kokh, O.E. Tereshchenko, L. Petaccia, G. Di Santo, **P.N. Skirdkov, K.A. Zvezdin**, A.K. Zvezdin, A. Kimura, E.V. Chulkov and E.E. Krasovskii "Signatures of in-plane and out-of-plane magnetization generated by synchrotron radiation in magnetically doped and pristine topological insulators" // Physical Review B 97, 245407 (2018)
4. P.N. Petrov, M.D. Davydova, **P.N. Skirdkov, K.A. Zvezdin**, J.G. Lin and J.C.A. Huang "Inverse spin Hall effect in heterostructures "nanostructured ferromagnet/topological insulator"" // EPJ Web of Conferences 185, 01005 (2018)
5. A.M. Shikin, A.A. Rybkina, D.A. Estyunin, D.M. Sostina, I.I. Klimovskikh, V.Yu. Voroshnin, A.G. Rybkin, K.A. Kokh, O.E. Tereshchenko, L. Petaccia, G. Di Santo, A. Kimura, **P.N. Skirdkov, K.A. Zvezdin** and A.K. Zvezdin "Dirac cone intensity asymmetry and surface magnetic field in V-doped and pristine topological insulators generated by synchrotron and laser radiation" // Scientific reports 8, 6544 (2018)
6. A.A. Khudorozhkov, **P.N. Skirdkov, K.A. Zvezdin**, P.M. Vetoshko, A.F. Popkov "Spin-torque diode frequency tuning via soft exchange pinning of both magnetic layers" // Physical Review B 96, 214410 (2017)
7. H.C. Han, Y.S. Chen, M.D. Davydova, P.N. Petrov, **P.N. Skirdkov**, J.G. Lin, J.C. Wu, J.C.A. Huang, **K.A. Zvezdin** and A.K. Zvezdin "Spin pumping and probe in permalloy dots-topological insulator bilayers" // Applied Physics Letters 111, 182411 (2017)
8. N.E. Kulagin, **P.N. Skirdkov**, A.F. Popkov, **K.A. Zvezdin** and A.V. Lobachev "Nonlinear current resonance in a spin-torque diode with planar magnetization" // Low Temperature Physics 43, 708-714 (2017)
9. A.M. Shikin, A.A. Rybkina, I.I. Klimovskikh, O.E. Tereshchenko, A.S. Bogomyakov, K.A. Kokh, A. Kimura, **P.N. Skirdkov, K.A. Zvezdin** and A.K. Zvezdin "Anomalously large gap and induced out-of-plane spin polarization in magnetically doped 2D Rashba system: V-doped BiTeI" // 2D Materials 4, 025055 (2017)
10. A.M. Shikin, A.A. Rybkina, I.I. Klimovskikh, M.V. Filianina, K.A. Kokh, O.E. Tereshchenko, **P.N. Skirdkov, K.A. Zvezdin** and A.K. Zvezdin "Out-of-plane polarization induced in magnetically-doped topological insulator Bi_{1.37}V_{0.03}Sb_{0.6}Te₂Se by circularly polarized synchrotron radiation above a Curie temperature" // Applied Physics Letters 109, 222404 (2016)
11. I.M. Iskandarova, A.V. Ivanov, A.A. Knizhnik, A.F. Popkov, B.V. Potapkin, **P.N. Skirdkov, K.A. Zvezdin**, Q. Stainer, L. Lombard and K. Mackay "Simulation of switching maps for thermally assisted MRAM nanodevices" // Nanotechnologies in Russia 11, 208-214 (2016)
12. N. Locatelli, A. Hamadeh, F.A. Araujo, A.D. Belanovsky, **P.N. Skirdkov**, R. Lebrun, V.V. Naletov, **K.A. Zvezdin**, M. Muñoz, J. Grollier, O. Klein, V. Cros and G. de Loubens "Efficient Synchronization of dipolarly Coupled Vortex-Based Spin Transfer Nano-Oscillators" // Scientific Reports 5, 17039 (2015)
13. **P.N. Skirdkov, K.A. Zvezdin**, A.D. Belanovsky, J.M. George, J.C. Wu, V. Cros, and A.K. Zvezdin "Large amplitude vortex gyration in permalloy/Bi₂Se₃-like heterostructures" // Physical Review B 92, 094432 (2015)

14. F. Abreu Araujo, A.D. Belanovsky, **P.N. Skirdkov**, **K.A. Zvezdin**, A.K. Zvezdin, N. Locatelli, R. Lebrun, J. Grollier, V. Cros, G. de Loubens, and O. Klein "Optimizing magnetodipolar interactions for synchronizing vortex based spin-torque nano-oscillators" // Physical Review B 92, 045419 (2015)
15. A.M. Shikin, A.A. Rybkina, A.G. Rybkin, I.I. Klimovskikh, **P.N. Skirdkov**, **K.A. Zvezdin**, and A.K. Zvezdin "Spin current formation at the graphene/Pt interface for magnetization manipulation in magnetic nanodots" // Applied Physics Letters 105, 042407 (2014)
16. **P.N. Skirdkov**, **K.A. Zvezdin**, A.D. Belanovsky, J. Grollier, V. Cros, C.A. Ross, and A.K. Zvezdin "Domain wall displacement by remote spin-current injection" // Applied Physics Letters 104, 242401 (2014)