

## **ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ о Проекте**

**Номер:** 18-12-00459

**Название:** Синтез и исследование ультратонких магнитных гетероструктур, имеющих потенциал спинтронных и оптронных приложений

**Руководитель:** Тагиров Ленар Рафгатович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры Физики твердого тела

**Конкурс:** Конкурс 2018 года «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами»

**Область знания, основной код классификатора:** 02 – Физика и науки о космосе; 02-204 – Нано- и микроструктуры

**Ключевые слова:** ультратонкие магнитные пленки, магнитные гетероструктуры, магнитосопротивление, спин-зависимый транспорт, оптическое перемагничивание, магнитооптический эффект Керра, гетероструктуры сверхпроводник-ферромагнетик, сверхпроводящая спинтроника, поверхностные плазмоны, плазмоника

**Код ГРНТИ:** 29.19.22

### **Аннотация:**

Проблема управления свойствами и состояниями магнитных гетероструктур – «горячее» направление в физике наноструктур, чрезвычайно активно развивающееся последние 10 лет. Связано это, прежде всего, с очевидными перспективами применения таких гетероструктур для обработки и хранения информации в современной спинтронике. Идеи манипуляции сверхпроводимостью через посредство воздействия на магнитные составляющие гетероструктур сверхпроводник/ферромагнетик (S/F) открыли реальные перспективы сверхпроводящей спинтроники, которая обещает сделать революционное увеличение быстродействия микропроцессоров. Перспектива практических применений делает физику таких систем еще более привлекательной. В настоящем проекте развиваются технологии приготовления ультратонкопленочных микро- и наноструктур сверхпроводник-ферромагнетик, исследуются их сверхпроводящие, магнитных и магнитооптических свойств с прицелом выхода на функциональность, основанную на эффекте близости, магнитооптическом эффекте и возбуждении поверхностных плазмонов. Многослойные гетероструктуры оригинального дизайна приготавливаются с использованием современного сверхвысоковакуумного оборудования. Для характеристики полученных образцов и отработки технологии синтеза используются методы дифракции электронов (RHEED и LEED) для контроля механизмов роста, кристалличности; дифракция рентгеновских лучей и нанопрофилометрия для неинвазивного определения толщины пленок в гетероструктуре, толщины и шероховатости ее поверхности и интерфейсов;

сканирующая электронная микроскопия и зондовая микроскопия для прецизионного исследования морфологии поверхности гетероструктуры; высокочувствительная магнитометрия, ферромагнитный резонанс и магнитотранспортные измерения в широком диапазоне полей и температур; измерения резистивных сверхпроводящих переходов и вольт-амперных характеристик с высокой точностью. Измерения транспортных и магнитооптических характеристик направлены на демонстрацию новых эффектов кардинального изменения физических свойств функциональных гетероструктур под действием слабых импульсов магнитного поля, электрического тока или лазерного излучения. Эксперимент сопровождается моделированием сверхпроводящих и магнитных свойств таких гетероструктур с использованием современных физических теорий.

### **Результаты, полученные в 2018 году:**

1. Освоена технология синтеза и получены серии образцов тонких пленок и тонкопленочных гетероструктур: антиферромагнетика CoO, бислоев Co/CoO, гетероструктур Fe/Ag/Co/CoO, Pd/Fe/Pd, Fe/Ag/Fe, VN, VN/Pd, VN/PdFe, Ag и других преимущественно на подложках из оксида магния, а также на сапфире и кремнии. Большинство пленок и гетероструктур на оксиде магния удалось вырастить эпитаксиально.
2. В бислоях CoO(8 нм)/Co(5 нм)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(подложка) при охлаждении в поле 1000 Oe обнаружен обменный сдвиг петли магнитного гистерезиса при температуре ниже 250 K. Величина сдвига при 30 K составляет 960 Oe. В многослойках CoO(8 нм)/Co(4 нм)/Ag(4 нм)/Fe/MgO(подложка) железо растет в плоскости пленки под углом 45 градусов к основным кристаллографическим осям подложки (Fe[110]||MgO[100]). При 30 K у пленки кобальта появляется обменное смещение 1462, 308, 230 Oe для структур с толщиной слоя железа 1.5, 3.3 и 5.0 нм соответственно.
3. Выполненные исследования ферромагнитного резонанса (ФМР) многослойки CoO(8 нм)/Co(4 нм)/Ag(4 нм)/Fe на MgO показали, что слои железа и кобальта взаимодействуют между собой межслоевым обменом через слой серебра. Выше температуры Нееля CoO  $T_N = 291$  K наблюдается одна линия от двух слоев. При измерениях ФМР вдоль петли гистерезиса после охлаждения образца в поле 400 мТ до 180 K в спектрах можно идентифицировать две линии при углах отклонения поля от легкой оси на 38 градусов и больше. Это означает, что наблюдается синфазная («акустическая») и противофазная («оптическая») моды связанной прецессии магнитных моментов двух взаимодействующих слоев.

4. Освоена методика синтеза тонких пленок VN методом реакционного магнетронного распыления металлической мишени V в атмосфере из смеси аргона и азота. Определены оптимальные условия синтеза (давление газовой смеси в магнетронной камере, соотношение парциальных давлений аргона и азота, мощность магнетрона, температура подложки и т.д.), обеспечивающие максимальную близость состава пленок к стехиометрическому 1:1. Выращены и охарактеризованы тонкие пленки нитрида ванадия с толщиной от 15 до 50 нм, а также двуслойные гетероэпитаксиальные структуры VN/Pd<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub> с  $x = 0$  (нормальный металл) и  $x = 0.04$  (низкотемпературный мягкий ферромагнетик). Переход в сверхпроводящее состояние для изготовленной серии образцов происходит в диапазоне 7.5–8.5 К.
5. Выполнено моделирование сверхпроводящих свойств гетероструктур F2/N/F1/S и S1/F1/S2/F2. Изучена температура перехода в сверхпроводящее состояние  $T_c$  многослойной структуры F2/N/F1/S, в которой возникает триплетная сверхпроводящая компонента при неколлинеарных намагниченностях F слоев. Получены зависимости температуры сверхпроводящего перехода  $T_c$  от толщины разделительного слоя нормального металла. Воспроизведены все режимы переключения триплетного спинового клапана при реалистичных, взятых из эксперимента параметрах сверхпроводников, ферромагнетика и прозрачностей границ между ними.
6. Освоена технология синтеза тонких эпитаксиальных пленок соединения PdFe в L10 упорядоченной фазе с перпендикулярной магнитной анизотропией на подложке MgO. Тетрагональная симметрия пленки подтверждено данными рентгеноструктурного анализа. Перпендикулярная анизотропия проявляется в данных магнитометрии и в мессбауэровских спектрах.
7. Выполнен синтез тонких эпитаксиальных пленок серебра толщиной 50 нм на подложке MgO. Исследованы плазмонные резонансы в геометрии Кречмана – в эпитаксиальной пленке плазмонный резонанс проявляется в виде глубокого узкого минимума коэффициента отражения при углах, отвечающих резонансу с преобразованием до 90% энергии света в плазмоны.
8. Выполнены исследования динамики намагниченности в тонких эпитаксиальных пленках FePt с перпендикулярной магнитной анизотропией после их возбуждения фемтосекундными световыми импульсами. Исследования осуществлялись методом накачки-

зондирования с детектированием фотоиндуцированного изменения углов поворота Керра в полярной геометрии. Показано, что для исследованной пленки фотовозбуждение импульсами длительностью 40 фс на длине волны 400 нм позволяет достигать подавления величины намагниченности, превышающего 60%.

9. Разработана методика спектроскопического детектирования оптических свойств плазмонных материалов с пространственным разрешением менее 80 нм.

#### **Результаты, полученные в 2019 году:**

1. Разработана технология синтеза S/F1/F2 структур с ниобием в качестве сверхпроводника на монокристаллических (100)-ориентированных Si-подложках. Основные особенности технологии: 1) напыление подслоя кремния, толщиной 10 нм, необходимого для изоляции пленки ниобия от материала подложки (оксида кремния), крайне чувствительной к примесям; 2) магнетронное распыление ниобия в аргоне высокой чистоты (99.9999%) с мощностью магнетрона 50 Вт (скорость напыления при такой мощности 1.67 нм/мин) и температуре подложки 120 °С. Базовое давление в магнетронной камере должно быть не выше  $5 \cdot 10^{-9}$  мбар, парциальное давление реакционно-способных газов (кислород, азот, вода и др.) не выше  $5 \cdot 10^{-11}$  мбар.
2. Синтезированы и исследованы гетероструктуры Si/Nb(4–100 нм)/Si, Si/Ag(0–42 нм)/Nb(6–30 нм)/Si, Si/Fe(3 нм)/Ag(0–8 нм)/Nb(15 нм)/Si, Si/Co(2 нм)/Ag(10 нм)/Fe(1.5 нм)/Ag(4 нм)/Nb(15 нм)/Si, Si/Co(2 нм)/Nb(10 нм)/Fe(15 нм)/Ag(4 нм)/Nb(15 нм)/Si. Шероховатость полученных гетероструктур около  $R_q = 0.24$  нм. Синтезированные пленки ниобия имеют сверхпроводящие параметры на мировом уровне: например, для пленки Nb, толщиной 30 нм  $T_c = 8.9$  К,  $\Delta T_c = 20$  мК,  $RRR = 3.74$ . В структурах Co/Ag/Fe/Ag/Nb ( $T_c = 4.049$  К,  $\Delta T_c = 24$  мК,  $RRR = 1.54$ ), Co/Nb/Fe/Ag/Nb ( $T_c = 4.462$  К,  $\Delta T_c = 66$  мК,  $RRR = 2.28$ ). Повышение критической температуры гетероструктуры при замене серебра на ниобий происходит за счет увеличения эффективной толщины слоя ниобия и уменьшения подавления сверхпроводимости от ферромагнитного слоя кобальта.
3. Моделирование свойств тонкопленочных гетероструктур было проведено с использованием матричного метода [Кушнер В.Н.]. Для моделирования была написана программа на языке Фортран в среде Microsoft Visual Studio с использованием пакета Intel Visual Fortran. С использованием экспериментальных данных зависимостей  $T_c$ ,  $\xi_{GL}$  от толщин слоев для образцов Si/Nb(4–100 нм)/Si, Si/Ag(0–42 нм)/Nb(6–30 нм)/Si, Si/Fe(3

нм)/Ag(0–8 нм)/Nb(15 нм)/Si были получены подгоночные параметры: удельное сопротивление серебра  $\rho_{Ag} = 10.7 \text{ мкОм}\cdot\text{см}$ , длина когерентности в серебре  $\xi_{Ag} = 30 \text{ нм}$ , удельное сопротивление интерфейса Nb/Ag  $R\cdot A = 4.6\cdot 10^{-10} \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2$ , удельное сопротивление интерфейса Fe/Ag  $R\cdot A = 3.6\cdot 10^{-11} \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2$ , обменная энергия железа 4000 К. При моделировании структур S/F1/N/F2 и S1/F1/S2/F2 показано, что дополнительный S2 слой может увеличить эффективность режимов спинового клапана в сравнении с дополнительным N слоем при условии сохранения в нем сверхпроводящего состояния. Критическая температура перехода  $T_c$  для структур S1/F1/S2/F2 оказывается выше, чем для S1/F1/N/F2 структур. Максимум  $\Delta T_c(P\text{-}PP)$  наблюдается при тонком S2, N слое, где P – состояние с сонаправленными моментами, PP – ортогональными.

4. Разработана технология синтеза полностью эпитаксиальной структуры типа F1/S/F1 с нитридом ванадия в качестве сверхпроводника, на монокристаллических (100)-ориентированных MgO-подложках. Основные особенности технологии: 1) напыление эпитаксиальных ферромагнитных слоев  $\text{Pd}_{0.96}\text{Fe}_{0.04}$  и  $\text{Pd}_{0.92}\text{Fe}_{0.08}$  путем со-испарения палладия и железа из эффузионных ячеек отработанные нами ранее 3-х этапным методом [Esmaeili A. et al. Epitaxial growth of  $\text{Pd}_{1-x}\text{Fe}_x$  films on MgO single-crystal substrate //Thin Solid Films. – 2019. – Т. 669. – С. 338–344.]; 2) реактивное магнетронное распыление нитрида ванадия в смеси аргона и азота в соотношении  $\text{Ar}:\text{N}_2 = 3:2$ . Оптимальные параметры напыления: мощности магнетрона 50 Вт (скорость напыления при такой мощности 0.208 нм/мин), температура подложки 500 °С.
5. Синтезированы и выполнены структурные и магнитные исследования гетероструктур  $\text{Si}/\text{VN}/\text{MgO}$ ,  $\text{Si}/\text{Pd}_{0.92}\text{Fe}_{0.08}/\text{VN}/\text{MgO}$ ,  $\text{Si}/\text{Pd}_{0.92}\text{Fe}_{0.08}/\text{VN}/\text{Pd}_{0.96}\text{Fe}_{0.04}/\text{MgO}$  и  $\text{Si}/\text{VN}/\text{Pd}_{0.96}\text{Fe}_{0.04}/\text{MgO}$ . Шероховатость полученных пленок около  $R_q = 0.35 \text{ нм}$ . Измерение магнитных петель гистерезиса образца  $\text{Pd}_{0.92}\text{Fe}_{0.08}/\text{VN}/\text{Pd}_{0.96}\text{Fe}_{0.04}$  показало наличие двух отдельных коэрцитивных полей (15 Э и 40 Э). Меняя магнитное поле от -25 Э до 25 Э, мы получаем со-направленную (P) или противоположно направленную (AP) взаимную ориентацию магнитных моментов.
6. Выполнено моделирование сверхпроводящих свойств полученных выше образцов F1/S, S/F2 и F1/S/F2 гетероструктур. Ферромагнитные слои F1 и F2 описаны как однодоменные не взаимодействующие друг с другом структуры с кубической (в плоскости пленки) магнитокристаллической анизотропией. При приложении поля вдоль легкой оси (как в эксперименте) магнитная петля гистерезиса будет квадратной. Используя

полученные из эксперимента данные  $\xi$  и  $T_c$  уединенной пленки VN, была вычислена критическая температура для Si/Pd<sub>0.92</sub>Fe<sub>0.08</sub>/VN/MgO, Si/Pd<sub>0.92</sub>Fe<sub>0.08</sub>/VN/Pd<sub>0.96</sub>Fe<sub>0.04</sub>/MgO и Si/VN/Pd<sub>0.96</sub>Fe<sub>0.04</sub>/MgO гетероструктур. Подгоночными параметрами были величина обменного поля Pd<sub>0.92</sub>Fe<sub>0.08</sub> – 800 K,  $\gamma_{B\_F1S} = 0.034$  и  $\gamma_{B\_SF2} = 5.506$ . Достигнуто хорошее согласие с экспериментальными данными. Экспериментальная величина критической температуры составила: VN/Pd<sub>0.96</sub>Fe<sub>0.04</sub> – 7.20 K, Pd<sub>0.92</sub>Fe<sub>0.08</sub>/VN – 6.07 K, Pd<sub>0.92</sub>Fe<sub>0.08</sub>/VN/Pd<sub>0.96</sub>Fe<sub>0.04</sub> – 5.40 K. Расчетные критические температуры составили 7.20 K, 6.07 K и 5.00 K, соответственно.

7. Методами фемтосекундной оптической и магнитооптической спектроскопии проведены исследования тонкой эпитаксиальной пленки низкотемпературного магнитомягкого сплава Pd<sub>0.94</sub>Fe<sub>0.06</sub> на подложке (001)-MgO. Определены времена фотоиндуцированного размагничивания и восстановления намагниченности; последнее проявляет критическое замедление при приближении к температуре ферромагнитного упорядочения  $T_c = 190$  K снизу. Показано, что динамика изменения коэффициента отражения после импульса фотовозбуждения испытывает эволюцию от двухэкспоненциальной в парамагнитной фазе к четырехкомпонентной при  $80 \text{ K} < T < T_c$  с тенденцией к упрощению до трехкомпонентной при  $T < 50$  K. Согласно нашей интерпретации, подобная эволюция, наряду с проявлением дополнительной нарастающей компоненты в магнитном отклике при  $80 \text{ K} < T < T_c$ , свидетельствует о магнитной и электронной неоднородности пленки, связанной с разбросом локальных концентраций железа. Доля мелкомасштабных вкраплений парамагнитной фазы оценена в примерно 10% по объему.
8. Синтезирована и рекомендована к практической реализации F1/N/F2 гетероструктура на основе эпитаксиальных плёнок L10-упорядоченных соединений FePt и FePd для создания на их основе искусственного ферримагнетика, в котором два крайних слоя представлены соединениями FePt и FePd, а промежуточный слой субнанометровой толщины изготовлен из немагнитного металла и служит для установления антиферромагнитного характера связи между слоями F1 и F2. Такая система может продемонстрировать фотоиндуцированное размагничивание, сходное с наблюдаемым в тонких пленках аморфного ферримагнитного сплава GdFeCo. У пленок FePd и FePt, исследованных в настоящей работе, наблюдаются качественно сходные различия во временном поведении намагниченности. В таком случае, искусственный ферримагнетик характеризовался бы высокой перпендикулярной

магнитокристаллической анизотропией и способностью перемагничиваться под действием света. Первое обеспечит высокую плотность записи информации на магнитный носитель, второе – высокую скорость записи/чтения благодаря чисто оптической технологии с задействованием сверхкоротких лазерных импульсов.

9. Методом реактивного магнетронного напыления синтезированы ультратонкие пленки оксинитрида титана на подложках Si(100), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO. По данным эллипсометрии, вещественная часть диэлектрической проницаемости пленок принимает близкие к нулю значения в широкой спектральной области, приходящейся на видимый и инфракрасный диапазон длин волн. Такое поведение характерно для композитов и является важным для развития опто-плазмонных приложений, поскольку в таких пленках могут возбуждаться плазмонные резонансы на разных частотах прямым действием света, а не через призмы, решетки и т.д. FDTD моделирование композитных пленок TiN/TiO<sub>2</sub> показало, что 2ENZ (epsilon-near-zero) поведение возникает вблизи порога перколяции в плазмонном композите. Изучение структуры поверхности пленки с помощью атомно-силовой микроскопии подтвердило это теоретическое предсказание. Исследование дальне- и ближнеполевыми методами спектров комбинационного рассеяния света показало присутствие нитрида и оксида титана, как в кристаллическом (для TiO<sub>2</sub> в фазах рутила, атаназа и брукита), так и аморфном состоянии. Показано, что тонкая пленка TiON может быть представлена как смесь TiN/TiO<sub>2</sub>, поэтому можно вычислить эффективную диэлектрическую проницаемость композитной пленки для понимания образования широкой зоны, в которой вещественная часть диэлектрической проницаемости принимает близкие к нулю значения. В спектре гигантского комбинационного рассеяния света на пленке оксинитрида титана обнаружена полоса на 480 см<sup>-1</sup>, которая была интерпретирована как нелинейный стоксов обертон. На планарных антеннах квадратной формы размером 100x100 нм<sup>2</sup> методом конфокальной романовской микроскопии удалось экспериментально наблюдать появление кратных обертонов без ангармонизма. Важным результатом является наблюдение оптического сверхразрешения  $\lambda/8$  таких субволновых планарных антеннах. Преодоление дифракционного предела возможно благодаря специфической нелинейности вынужденного комбинационного рассеяния света в условиях близкого к нулю значения вещественной и малой величины мнимой частей диэлектрической проницаемости.

**Результаты, полученные в 2020 году:**

1. Синтезированы полностью эпитаксиальные гетероструктуры  $\text{Pd}_{0.92}\text{Fe}_{0.08}(12 \text{ нм})/\text{W}(0.7 \text{ нм})/\text{Pd}_{0.96}\text{Fe}_{0.04}(12 \text{ нм})/\text{MgO}(100)$  – пилотный образец, и  $\text{Si}(10 \text{ нм})/\text{VN}(12 \text{ нм})/\text{Pd}_{0.96}\text{Fe}_{0.04}(6 \text{ нм})/\text{W}(0.7 \text{ нм})/\text{Pd}_{0.92}\text{Fe}_{0.08}(3 \text{ нм})/\text{Cr}(2 \text{ нм})/\text{MgO}(100)$  – сверхпроводящий спиновый вентиль. Установлено, что при данной толщине вольфрама два слоя F1 и F2 взаимодействуют слабо антиферромагнитно (эффективное поле 22 Oe). Измерение анизотропного магнитосопротивления при температуре 5 K показало, что в исследованном спиновом вентиле легкие оси в плоскости были направлены вдоль  $\langle 100 \rangle$  осей, а тяжелые вдоль  $\langle 110 \rangle$ , что является аномальным для пленок  $\text{Pd}_{1-x}\text{Fe}_x$  с данной концентрацией железа. В исследованной структуре сверхпроводимость нитрида ванадия оказалась сильно подавлена, критическая температура была ниже 1.9 K.
2. Синтезирована полностью эпитаксиальная гетероструктура  $\text{Pd}_{0.92}\text{Fe}_{0.08}(12 \text{ нм})/\text{VN}(20 \text{ нм})/\text{Pd}_{0.96}\text{Fe}_{0.04}(20 \text{ нм})/\text{MgO}(100)$ . Температура сверхпроводящего перехода составила 3.89 K. Верхняя часть перехода оказывается достаточно сильно размыта, что указывает на недостаточную однородность гетероструктуры. При измерении магнитосопротивления (на температуре перехода 3.88 K) был установлен инверсный эффект в сверхпроводящем спиновом вентиле, т.е. критическая температура ( $T_c$ ) сверхпроводящего слоя была выше для сонаправленных моментов слоев F1 и F2, чем для противоположно направленных. Уменьшение толщины сверхпроводника привело к более выраженному проявлению эффекта по сравнению с предыдущим вариантом. Исследование анизотропного магнитосопротивления отдельной эпитаксиальной пленки  $\text{Pd}_{0.92}\text{Fe}_{0.08}(20 \text{ нм})$  показало, что разворот момента происходит путем распространения двух 90-градусных доменных стенок. Поэтому в полях разворота наибольшим образом проявляется влияние триплетной компоненты (проявляющейся максимально при ортогональной взаимной ориентации моментов) и наблюдается скачок сопротивления (падение  $T_c$ ).
3. Измерено магнитосопротивление  $RS_4(H)$  образца спинового клапана S4  $\text{Pd}_{0.92}\text{Fe}_{0.08}(12 \text{ нм})/\text{VN}(20 \text{ нм})/\text{Pd}_{0.96}\text{Fe}_{0.04}(20 \text{ нм})/\text{MgO}(100)$  в той же геометрии, что и магнитный гистерезис, то есть начиная с параллельной магнитной конфигурации P и поля, приложенного в плоскости вдоль оси легкого намагничивания. При уменьшении магнитного поля от +100 Э сопротивление сначала падает, достигает минимума при  $\sim 30$  Э, а затем возрастает. После прохождения нулевого поля сопротивление продолжает расти и примерно через 30 Э снова падает. Сканирование поля в противоположном направлении дает кривую, симметричную



относительно  $H = 0$  Ое. На зависимости  $RS_4(H)$  наблюдаются пикообразные аномалии, которые, очевидно, коррелируют с перемагничиванием ферромагнитных слоев  $Pd_{0.96}Fe_{0.04}$  и  $Pd_{0.92}Fe_{0.08}$ . Ямки провалов при значениях поля около  $\pm 80$  Э не коррелируют с какими-либо изменениями магнитных конфигураций в этих диапазонах полей. Измерения магнитосопротивления пилотного образца  $MgO/VN/Si$  ( $S_1$ ), полученного в том же процессе осаждения с образцами  $S_2$ - $S_4$ , показали, что провалы в магнитосопротивлении происходят от самой пленки  $VN$ . Выполнены измерения магнитосопротивления с разверткой поля внутри малой петли гистерезиса. Развертка магнитного поля вызывает переключение из состояния  $P$  ферромагнитных слоев  $Pd_{1-x}Fe_x$  в положительном направлении поля в состояние  $AP$ , возникающее при  $H \approx 24$  Э, и обратно при  $H \approx +28$  Э для завершения второстепенная петля. Независимо от истории, сопротивление структуры выше с конфигурацией магнитных моментов  $AP$ , чем с конфигурацией  $P$ . Таким образом, экспериментально наблюдался обратный (инвертированный) эффект спинового клапана.

4. Выполнено моделирование критической температуры перехода в сверхпроводящее состояние  $T_c$  как функции параметров  $S/F_1/F_2$  гетероструктур, которые в «грязном» пределе описываются с помощью уравнений Узаделя, использовался матричный метод [Кушнир В.Н.: *Докторская диссертация, Минск 2014*]. Для поиска оптимальной конфигурации в широком диапазоне толщин слоев гетероструктуры была написана программа на языке Фортран в среде Microsoft Visual Studio с использованием пакета Intel Visual Fortran. Параметры материалов и границы  $S/F$  использовались из работы [Ya. V. Fominov et al. *Nonmonotonic critical temperature in superconductor/ferromagnet bilayers // Physical Review B. – 2002. – Т. 66. – №. 1. – С. 014507.*]), граница  $F_1/F_2$  рассматривалась в приближении идеальной границы. В моделированиях прямой режим демонстрировал наибольшую величину  $\Delta T_c$  разницы между критической температурой при антипараллельной и параллельной ориентациях намагниченностей ферромагнитных слоев из всех режимов спин-клапанного эффекта 3,9 К. Характерной толщиной ферромагнитного слоя  $F_1$  для прямого режима была толщина до достижения минимальной  $T_c$  в зависимости  $T_c(dF)$  двухслойной структуры  $S/F$ . Для ферромагнитного слоя  $F_2$  характерной толщиной  $d_{F_2}$  с наибольшей  $T_c$  при антипараллельной конфигурации была толщина 50% от  $d_{F_1}$ . Для триплетного режима получена наибольшая величина  $\Delta T_c$  разницы между критической температурой при параллельной и перпендикулярной ориентациях при данных параметрах структуры в 0,7 К.

5. Показано, что в двухслойной гетероэпитаксиальной структуре W/Pd<sub>0.94</sub>Fe<sub>0.06</sub> типа N/F (нормальный тяжелый металл/ферромагнетик) наблюдается прямой спиновый эффект Холла, проявляющийся в возможности детектирования сигнала ФМР от F-слоя при пропускании через гетероструктуру переменного тока и в отсутствие модуляции магнитного поля. Дана оценка эффективного модулирующего поля, составившая 0.04 Гс при амплитуде тока 2.5 мА.
6. Успешно синтезирована трехслойная гетероэпитаксиальная тонкопленочная структура FePd/W/FePd с перпендикулярной магнитной анизотропией и антиферромагнитной связью между слоями FePd. Оценка величины константы связи по величине поля (приложенного в плоскости), отвечающей насыщению кривой намагничивания, составила  $J = -3.6$  эрг/см<sup>2</sup>. Показано, что частота фотоиндуцированной прецессии намагниченности трехслойной гетероструктуры отличается от частоты прецессии для одиночной пленки. Полученные результаты свидетельствуют о возможности синтеза искусственного ферромагнетика на базе слоев FePd и FePt, перспективного в отношении сверхбыстрого индуцированного фемтосекундным световым импульсом обращения намагниченности.
7. Серия эпитаксиальных пленок сплава Pd<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub> ( $x = 0, 0,03, 0,06$  и  $0,08$ ), перспективных для сверхпроводящей спинтроники, исследована методами фемтосекундной оптической и магнитооптической лазерной спектроскопии в широком диапазоне температур от 4 до 300 К. Показано, что переход в ферромагнитное состояние проявляется как в изменении характера временных зависимостей коэффициента отражения, так и переходных процессов магнитооптического эффекта Керра. Магнитная неоднородность типа ферромагнетик / парамагнетик, присущая сплавам Pd<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub> с высоким содержанием палладия, проявляется в возникновении второй стадии фотоиндуцированного размагничивания длительностью 10–25 пс, которая исчезает при низких температурах только в образце  $x = 0,08$ . Количество остаточной парамагнитной фазы можно определить по величине компонента медленной релаксации отражательной способности, и оно оценивается как  $\sim 30\%$  для  $x = 0,03$  и  $\sim 15\%$  для  $x = 0,06$  пленок. Минимальное содержание железа, обеспечивающее магнитную однородность ферромагнитного состояния в сплаве Pd<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub> при низких температурах, составляет около 7–8 ат. %.
8. Исследованы времяразрешенные отклики коэффициента отражения пленки серебра на подложке MgO на длине волны 800 нм в геометрии Кречмана после фотовозбуждения пленки фемтосекундными световыми

импульсами. Различие более чем на порядок в амплитудах откликов коэффициента отражения при свете зондирования вне условий и в условиях плазмонного резонанса может быть связано только со сверхбыстрой модификацией условий плазмонного резонанса вследствие фотовозбуждения образца. Моделирование изменения плазмонного резонанса вследствие модификации вещественной  $\epsilon_1$  и мнимой  $\epsilon_2$  компонент диэлектрической восприимчивости дает основания связывать различающиеся по знаку компоненты откликов, измеренные при углах падения, отвечающих спадающему и нарастающему участкам плазмонного резонанса, с фотоиндуцированным возмущением  $\epsilon_1$ , а аналогичные компоненты одного знака – с возмущением  $\epsilon_2$ . В условиях возбуждения высокой интенсивности (9 мДж/см<sup>2</sup> на длине волны 400 нм) и динамика электронной подсистемы, и приход волны деформации к свободной поверхности пленки приводят к модификации  $\epsilon_1$ . В условиях возбуждения средней интенсивности (1.5 мДж/см<sup>2</sup>) динамика электронной подсистемы обуславливает изменение  $\epsilon_2$ , а приход волны деформации к свободной поверхности пленки приводит к модификации  $\epsilon_1$ .

#### Статьи в реферируемых научных журналах

1. *Синтез и исследование тонкой плёнки сплава PdFe с упорядоченной L10-структурой* / М.В. Пасынков, Р.В. Юсупов, И.В. Янилкин, И.Р. Вахитов, А.И. Гумаров, А.Г. Киямов, А.Л. Зиннатуллин, Л.Р. Тагиров // Известия Высших Учебных Заведений. Физика. – 2018. – Т.61, №7. – С. 62–67. (<https://elibrary.ru/item.asp?id=35292112>). [*Synthesis and studies of palladium-iron alloy thin film with L10 ordered structure* / M.V. Pasyнков, R.V. Yusupov, I.V. Yanilkin, I.R. Vakhitov, A.I. Gumarov, A.G. Kiamov, A.L. Zinnatullin, and L.R. Tagirov // Russian Physics Journal. – 2018. – V. 61, N. 7. – P.1252–1257 [DOI 10.1007/s11182-018-1526-z, <https://link.springer.com/article/10.1007/s11182-018-1526-z>] (1064-8887/18/6107-1252, Springer Science+Business Media, LLC) ((WoS Q4 / SCIMAGO Q3)).
2. *Near-field depolarization of tip-enhanced Raman scattering by single azochromophores* / S.S. Kharintsev, A.R. Gazizov, M.Kh. Salakhov, S.G. Kazarian // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2018. – V. 20. – P. 24088–24098. [DOI: 10.1039/c8cp04887h] (<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2018/cp/c8cp04887h#!divAbstract>). (WoS Q1 / SCIMAGO Q1)
3. *Magnetic and magneto resonant properties of thin-film Fe/Ag/Co/CoO heterostructure synthesized by combined molecular beam epitaxy and reactive magnetron sputtering* / I.V. Yanilkin, I.R. Vakhitov, A.I. Gumarov, M.V. Pasyнков, E.T. Mukhametova, M.N. Aliyev, R.V. Yusupov, L.R. Tagirov // Magnetic Resonance

- in Solids. – 2018. – V. 20, N. 2. – P.N. 18204 (5 pp.). DOI 10.26907/mrsej-18204 [http://mrsej.kpfu.ru/contents/2018/MRSej\\_18204.pdf](http://mrsej.kpfu.ru/contents/2018/MRSej_18204.pdf) (SCIMAGO Q4)
4. *Superconducting spin-valves in spintronics* / R.R. Gaifullin, R.G. Deminov, M.N. Aliyev, L.R. Tagirov // *Magnetic Resonance in Solids. Electronic Journal*. – 2019. – V. 21, N. 3. – P.N. 19304 (11 pp.). DOI 10.26907/mrsej-19304 [http://mrsej.kpfu.ru/contents/2019/MRSej\\_19304.pdf](http://mrsej.kpfu.ru/contents/2019/MRSej_19304.pdf) (SCIMAGO Q4)
  5. *Эффект близости в сверхпроводящем триплетном спиновом клапане S1/F1/S2/F2* / Р. Р. Гайфуллин, В. Н. Кушнир, Р. Г. Деминов, Л. Р. Тагиров, М. Ю. Куприянов, А. А. Голубов // *Физика Твёрдого Тела*. – 2019. – Т. 61, № 9. – С. 1585–1588 [*Proximity Effect in a Superconducting Triplet Spin Valve S1/F1/S2/F2* / R. R. Gaifullin, V. N. Kushnir, R. G. Deminov, L. R. Tagirov, M. Yu. Kupriyanov, A. A. Golubov // *Physics of the Solid State (St. Petersburg)*. – 2019. – V. 61, N 9. – P. 1535–1538. DOI 10.1134/S1063783419090063 (WoS Q3 / SCIMAGO Q3) <https://link.springer.com/content/pdf/10.1134/S1063783419090063.pdf>]
  6. *Ferromagnetic resonance study of the epitaxial VN/Pd0:96Fe0:04 thin film heterostructure on MgO substrate* / A. Esmaili, W. M. Mohammed, I. V. Yanilkin, A. I. Gumarov, I. R. Vakhitov, B. F. Gabbasov, A. G. Kiiamov, M. N. Aliyev, R. V. Yusupov, L. R. Tagirov // *Magnetic Resonance in Solids. Electronic Journal*. – 2019. – V. 21, N. 4. – P.N. 19407 (9 pp.). DOI 10.26907/mrsej-19407 [http://mrsej.kpfu.ru/contents/2019/MRSej\\_19407.pdf](http://mrsej.kpfu.ru/contents/2019/MRSej_19407.pdf) (SCIMAGO Q4)
  7. *Magnetic properties of thin epitaxial Pd<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub> alloy films* / A. Esmaili, I.V. Yanilkin, A.I. Gumarov, I.R. Vakhitov, B.F. Gabbasov, D.A. Tatarsky, R.V. Yusupov, L.R. Tagirov // *ArXiv [cond-mat.mtrl-sci]*. – 2019. – 1912.04852 (20 pp.) <https://arxiv.org/pdf/1912.04852>
  8. *Ultrafast magnetization dynamics in thin films of L10-ordered FePt and FePd compounds: Promising differences* / A.V. Petrov, M.V. Pasyukov, R.V. Yusupov, S.I. Nikitin, A.I. Gumarov, I.V. Yanilkin, A.G. Kiiamov, L.R. Tagirov // *Magnetic Resonance in Solids. Electronic Journal*. – 2019. – V. 21, N. 5. – P.N. 19503 (8 pp.). DOI 10.26907/mrsej-19503 [http://mrsej.kpfu.ru/contents/2019/MRSej\\_19503.pdf](http://mrsej.kpfu.ru/contents/2019/MRSej_19503.pdf) (SCIMAGO Q4)
  9. *Исследование магнитных и электронных неоднородностей в тонкой пленке состава Pd<sub>0.94</sub>Fe<sub>0.06</sub> методами фемтосекундной оптической и магнитооптической спектроскопии* / А.В. Петров, Р.В. Юсупов, С.И. Никитин, А.И. Гумаров, И.В. Янилкин, А.Г. Киямов, Л.Р. Тагиров // *Письма в ЖЭТФ*. – 2019. – Т. 110, № 3. – С. 197–203 [*Femtosecond Optical and Magneto-Optical Spectroscopy Study of Magnetic and Electronic Inhomogeneities in a Pd<sub>0.94</sub>Fe<sub>0.06</sub> Thin Film* / A.V. Petrov, R.V. Yusupov, S.I. Nikitin, A.I. Gumarov, I.V. Yanilkin, A.G. Kiiamov, L.R. Tagirov // *JETP Letters*. – 2019. – V. 110, N 3. – P. 217–222] DOI 10.1134/S0021364019150104 [http://www.jetpletters.ac.ru/ps/2241/article\\_33575.pdf](http://www.jetpletters.ac.ru/ps/2241/article_33575.pdf) (WoS Q3 / SCIMAGO Q3)
  10. *Superresolution stimulated Raman scattering microscopy using 2-ENZ nano-composites* / S.S. Kharintsev, A.V. Kharitonov, A.M. Alekseev, S.G. Kazarian // *Nanoscale*. – 2019. – V. 11. – P. 7710–7719. DOI 10.1039/c8nr09890e

<https://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2019/nr/c8nr09890e?page=search>  
(WoS Q1 / SCIMAGO Q1)

11. *Epitaxial growth and superconducting properties of thin-film PdFe/VN and VN/PdFe bilayers on MgO substrate* / W.M. Mohammed, I.V. Yanilkin, A.I. Gumarov, A.G. Kiiamov, R.V. Yusupov, L.R. Tagirov // *Beilstein Journal of Nanotechnol.* – 2020. – V. 11. – P. 807–813. doi:10.3762/bjnano.11.65 <https://www.beilstein-journals.org/bjnano/content/pdf/2190-4286-11-65.pdf> (WoS Q2 / SCIMAGO Q1)
12. *Epitaxial thin-film Pd<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub> alloy – a tunable ferromagnet for superconducting spintronics* / Esmaeili A., Yanilkin I.V., Gumarov A.I., Vakhitov I.R., Gabbasov B.F., Yusupov R.V., Dmitriy A. Tatarsky, Tagirov L.R. // *Science China Materials* (Springer). – 2020. <https://doi.org/10.1007/s40843-020-1479-0>; WoS, IF= 6.098 (WoS Q1 / SCIMAGO Q1)
13. *Synthesis, characterization, and magnetoresistive properties of the epitaxial Pd<sub>0.96</sub>Fe<sub>0.04</sub>/VN/Pd<sub>0.92</sub>Fe<sub>0.08</sub> superconducting spin-valve heterostructure* / I. Yanilkin, W. Mohammed, A.I. Gumarov, A.G. Kiiamov, R.V. Yusupov, L.R. Tagirov // *Nanomaterials.* – 2020. – (на рецензировании с 30.11.2020); <https://www.mdpi.com/journal/nanomaterials>; WoS IF= 4.175 (WoS Q1 / SCIMAGO Q1)

#### **Труды и тезисы конференций:**

1. *Ultra-thin PdFe alloys and heterostructures for cryo-spintronics* / L.R. Tagirov, I.V. Yanilkin, I.R. Vakhitov, A.I. Gumarov, A. Esmaeili, R.V. Kadiroğlu, M.N. Aliyev, R.I. Khaibullin // Международная конференция «Modern trends in condensed matter physics», МТСМР-2018, Baku 24–26 September 2018. – Abstracts. – P. 138 (устное выступление).
2. *Магнитные свойства тонких пленок оксида кобальта, синтезированных методом реактивного магнетронного распыления (Magnetic properties of cobalt oxide thin films synthesized by reactive magnetron sputtering)* / И.В. Янилкин, И.Р. Вахитов, А.И. Гумаров, М.В. Пасынков, Э.Т. Мухаметова, Р.В. Юсупов, Л.Р. Тагиров // X Юбилейная международная научно-техническая конференция «Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий», Казань, 5–8 ноября 2018 г. – Программа конференции (<https://kpfu.ru/ltp-20186>, выдержки приложены в дополнительных материалах) (стендовый доклад).
3. *Плазмонные резонансы в эпитаксиальных пленках серебра, приготовленных методом магнетронного распыления (Plasmonic resonances in epitaxial silver films deposited by magnetron sputtering)* / А.А. Лопатина, П. Сушкова, И.В. Янилкин, А.М. Рогов, С.И. Никитин, Р.В. Юсупов, Л.Р. Тагиров // X Юбилейная международная научно-техническая конференция «Низкотемпературная

плазма в процессах нанесения функциональных покрытий», Казань, 5–8 ноября 2018 г. – Программа конференции (<https://kpfu.ru/ltp-2018>, выдержки приложены в дополнительных материалах) (стендовый доклад)

4. *Synthesis and study of a thin film of PdFe alloy with an ordered L10 structure* / M.V. Pasynkov, I.V. Yanilkin, I.R. Vakhitov, A.I. Gumarov, A.G. Kiiamov, A.L. Zinnatullin, R.V. Yusupov, L.R. Tagirov // VII Euro-Asian Symposium "Trends in MAGnetism" (EASTMAG-2019): Abstracts. – Ekaterinburg, M.N. Miheev Institute of Metal Physics UB RAS, BOOK OF ABSTRACTS V.I. – 2019. – P. 132–133. (стендовый доклад)
5. *Interlayer coupling in ultrathin epitaxial CoO/Co/Ag/Fe/MgO heterostructures* / I.V. Yanilkin, E.T. Mukhametova, A.A. Rodionov, B.F. Gabbasov, R.V. Yusupov, M. Aliyev, L.R. Tagirov // VII Euro-Asian Symposium "Trends in MAGnetism" (EASTMAG-2019): Abstracts. – Ekaterinburg, M.N. Miheev Institute of Metal Physics UB RAS, BOOK OF ABSTRACTS V.I. – 2019. – P. 141–142. (устное выступление)
6. *Magnetic properties of Pd<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub> films and heterostructures with them* / I.V. Yanilkin, A.I. Gumarov, I.R. Vakhitov, A.A. Rodionov, B. F. Gabbasov, A.G. Kiiamov, A.M. Rogov, R.V. Yusupov, L.R. Tagirov // VII Euro-Asian Symposium "Trends in MAGnetism" (EASTMAG-2019): Abstracts. – Ekaterinburg, M.N. Miheev Institute of Metal Physics UB RAS, BOOK OF ABSTRACTS V.I. – 2019. – P. 282. (стендовый доклад).
7. *Probing magnetic inhomogeneity in thin epitaxial Pd<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub> films with ultrafast optical and magneto-optical spectroscopy* / A.V. Petrov, R.V. Yusupov, I.V. Yanilkin, A.I. Gumarov, A.G. Kiiamov, S.I. Nikitin, L.R. Tagirov // VII Euro-Asian Symposium "Trends in MAGnetism" (EASTMAG-2019): Abstracts. – Ekaterinburg, M.N. Miheev Institute of Metal Physics UB RAS, BOOK OF ABSTRACTS V.I. – 2019. – P. 458–459. (устное выступление).
8. *The role of additional layer N or S2 in superconducting triplet spin-valve S1/F1/N(S2)/F2* / R.R. Gaifullin, V.N. Kushnir, R.G. Deminov, L.R. Tagirov, M.Yu. Kupriyanov, A.A. Golubov // VII Euro-Asian Symposium "Trends in MAGnetism" (EASTMAG-2019): Abstracts. – Ekaterinburg, M.N. Miheev Institute of Metal Physics UB RAS, BOOK OF ABSTRACTS V.II. – 2019. – P. 155–156. (стендовый доклад).
9. *FMR Studies of Thin Epitaxial Pd<sub>0.92</sub>Fe<sub>0.08</sub>/Pd<sub>0.96</sub>Fe<sub>0.04</sub> and Pd<sub>0.92</sub>Fe<sub>0.08</sub>/Ag/Pd<sub>0.96</sub>Fe<sub>0.04</sub> Heterostructures* / A.I. Gumarov, I.V. Yanilkin, A.A. Rodionov, A.G. Kiiamov, A.M. Rogov, R.V. Yusupov, L.R. Tagirov // International Conference "Magnetic Resonance – Current State and Future Perspectives". – September 23–27, 2019 Kazan, Russia. – Book of ABSTRACTS. – P. 26. (стендовый доклад).
10. *Comparative Study of S/F/S/F and S/F/N/F superconducting Spin-Valves* / R. R. Gaifullin, V. N. Kushnir, R. G. Deminov, L. R. Tagirov, M. Yu. Kupriyanov, A. A. Golubov // International Conference "Magnetic Resonance – Current State and Future Perspectives". – September 23–27, 2019 Kazan, Russia. – Book of ABSTRACTS. – P. 73. (стендовый доклад).



11. *Synthesis and Ferromagnetic Resonance Studies of Epitaxial VN/Pd<sub>0.96</sub>Fe<sub>0.04</sub> Heterostructure Grown on Single-Crystalline MgO Substrate* / W. Mohammed, R.V. Yusupov, I.V. Yanilkin, I.R. Vakhitov, A.I. Gumarov, A.M. Esmaeili, M.N. Aliyev, L.R. Tagirov // International Conference "Magnetic Resonance – Current State and Future Perspectives". – September 23–27, 2019 Kazan, Russia. – Book of ABSTRACTS. – P. 81. (стендовый доклад).
12. Tagirov, L.R. *Ferromagnetic Resonance – a Powerful Tool to Characterize Magnetic Heterostructures* / L.R. Tagirov // International Conference "Magnetic Resonance – Current State and Future Perspectives". – September 23–27, 2019 Kazan, Russia. – Book of ABSTRACTS. – P. 94. (устное выступление).
13. *Probing Magnetic Inhomogeneity of Pd<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub> Thin Films with Ultrafast Optical and Magneto-optical Spectroscopy* / R. V. Yusupov, A. V. Petrov, S. I. Nikitin, I. V. Yanilkin, A. I. Gumarov, A. G. Kiiamov, L. R. Tagirov // International Conference "Magnetic Resonance – Current State and Future Perspectives". – September 23–27, 2019 Kazan, Russia. – Book of ABSTRACTS. – P. 101. (устное выступление).
14. *Ferromagnetic Resonance in Exchange Coupled Ultrathin Epitaxial CoO<sub>x</sub>/Co/Ag/Fe/MgO Heterostructures* / I.V. Yanilkin, R.V. Yusupov, A.A. Rodionov, B.F. Gabbasov, M.N. Aliyev, L.R. Tagirov // International Conference "Magnetic Resonance – Current State and Future Perspectives". – September 23–27, 2019 Kazan, Russia. – Book of ABSTRACTS. – P. 200. (устное выступление).
15. *Epitaxial palladium-iron alloy – a promising magnetic material for supertronics* / L.R. Tagirov, I.V. Yanilkin, I.R. Vakhitov, A.I. Gumarov, R.V. Yusupov // NANO-2Q19: Limits of Nanoscience and Nanotechnologies. – 27–30 September 2019, Kishinev, Moldova. – Book of Abstracts. – P. 98. (стендовый доклад).
16. Tagirov L. *Superconducting spin-valves* / L. Tagirov // NANO-2Q19: Limits of Nanoscience and Nanotechnologies. SPINTECH Summer school "S/F Hybrid Structures for Spintronics". – 27–30 September 2019, Kishinev, Moldova. – Book of Abstracts. – P. 110. (приглашенный доклад).
17. *Сверхпроводящий спиновый клапан S1/F1/S2/F2 с неидеальными интерфейсами* / Р.Р. Гайфуллин, В.Н. Кушнир, Р.Г. Деминов, М.Ю. Куприянов, А.А. Голубов, Л.Р. Тагиров // «Нанофизика и нанoeлектроника». – XXIV Международный симпозиум, Нижний Новгород, 10–13 марта 2020. – Труды, Том 1. – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского государственного университета, 2020. – С. 46–47 (стендовый доклад).
18. *Synthesis and studies of structural, magnetic and ferromagnetic resonance properties of epitaxial Pd<sub>0.96</sub>Fe<sub>0.04</sub>/VN/Pd<sub>0.92</sub>Fe<sub>0.08</sub> superconducting spin-valve heterostructure* / W.M. Mohammed, I.V. Yanilkin, A.I. Gumarov, A.G. Kiiamov, A.A. Rodionov, R.V. Yusupov, L.R. Tagirov // Modern development of magnetic resonance, International Conference MDMR-2020, Kazan, September 28–October 2, 2020; Book of abstracts, eds: A.A. Kalachev and K.M. Salikhov. – Kazan: Published by Zavoisky Physical-Technical Institute, FRC Kazan Scientific Center of RAS, P. 35–37 (устное выступление).

19. *Ferromagnetic resonance versus spin-hall effect in heteroepitaxial W/Pd<sub>0.92</sub>Fe<sub>0.08</sub> Thin film structure* / R.V. Yusupov, A.I. Gumarov, A.A. Rodionov, I.V. Yanilkin, G.A. Zhivov, L.R. Tagirov // Modern development of magnetic resonance, International Conference MDMR-2020, Kazan, September 28–October 2, 2020; Book of abstracts, eds: A.A. Kalachev and K.M. Salikhov. – Kazan: Published by Zavoisky Physical-Technical Institute, FRC Kazan Scientific Center of RAS, P. 38. (устное выступление).
20. *Epitaxial growth and ferromagnetic resonance study of magnetic anisotropies in thin Pd<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub> films on the single-crystal MgO(110) substrate* / B.F. Gabbasov, A.I. Gumarov, A.A. Rodionov, I.V. Yanilkin, R.R. Khabibullin, R.V. Yusupov, L.R. Tagirov // Modern development of magnetic resonance, International Conference MDMR-2020, Kazan, September 28–October 2, 2020; Book of abstracts, eds: A.A. Kalachev and K.M. Salikhov. – Kazan: Published by Zavoisky Physical-Technical Institute, FRC Kazan Scientific Center of RAS, P. 161. (стендовый доклад)
21. *Ultrafast magnetization dynamics in thin films of L10-ordered FePt and FePd compounds* / A.V. Petrov, M.V. Pasyukov, R.V. Yusupov, S.I. Nikitin, A.I. Gumarov, I.V. Yanilkin, A.G. Kiiamov, L.R. Tagirov // Modern development of magnetic resonance, International Conference MDMR-2020, Kazan, September 28–October 2, 2020; Book of abstracts, eds: A.A. Kalachev and K.M. Salikhov. – Kazan: Published by Zavoisky Physical-Technical Institute, FRC Kazan Scientific Center of RAS, P.162. (стендовый доклад)
22. *Femtosecond Optical and Magneto-Optical Studies of Magnetic and Electronic Inhomogeneities in Pd<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub> Thin Films* / A.V. Petrov, R.V. Yusupov, I.V. Yanilkin, A.I. Gumarov, A.G. Kiiamov, S.I. Nikitin, L.R. Tagirov // Modern development of magnetic resonance, International Conference MDMR-2020, Kazan, September 28–October 2, 2020; Book of abstracts, eds: A.A. Kalachev and K.M. Salikhov. – Kazan: Published by Zavoisky Physical-Technical Institute, FRC Kazan Scientific Center of RAS, P. 163–164. (стендовый доклад).
23. *Combined reactive magnetron sputtering and molecular beam epitaxy synthesis, and further studies of structural, magnetic, and ferromagnetic resonance properties of thin-film epitaxial Pd<sub>0.96</sub>Fe<sub>0.04</sub>/VN/Pd<sub>0.92</sub>Fe<sub>0.08</sub> superconducting spin-valve heterostructure* / И.В. Янилкин, А.И. Гумаров, А.Г. Киямов, А.А. Родионов, Р.В. Юсупов, М.Н. Алиев, Л.Р. Тагиров // 1st All-Russian Conference with International Participation «Gas discharge plasma and synthesis of nanostructures». – Kazan, 2–5 December, 2020. – Book of Abstracts, P. 19–21. (устное выступление).
24. *Time-resolved magneto-optical study of the magnetic inhomogeneity in epitaxial palladium-iron alloy films* / R. Yusupov, A. Petrov, I. Yanilkin, A. Gumarov, S. Nikitin, L. Tagirov // The Joint European Magnetic Symposia JEMS-2020, 7–11 December 2020. – Lisbon, Portugal. – Book of Abstracts. – Abs. 4296. (стендовый доклад).
25. *Synthesis and studies of magnetic and magneto-resonance properties of epitaxial Pd<sub>0.96</sub>Fe<sub>0.04</sub>/VN/Pd<sub>0.92</sub>Fe<sub>0.08</sub> superconducting spin-valve heterostructure* / W.M. Mohammed, I.V. Yanilkin, A.I. Gumarov, A.G. Kiiamov, A.A. Rodionov, R.V.



Yusupov, L.R. Tagirov // The Joint European Magnetic Symposia JEMS-2020, 7–11 December 2020. – Lisbon, Portugal. – Book of Abstracts, Abs. 4301 (устное выступление).

26. *Epitaxial growth, structural and magnetic properties of exchange coupled Pd<sub>0.95</sub>Fe<sub>0.05</sub>/Pd<sub>0.92</sub>Fe<sub>0.08</sub> bilayers and Pd<sub>0.95</sub>Fe<sub>0.05</sub>/Ag/Pd<sub>0.92</sub>Fe<sub>0.08</sub> trilayers* / A.I. Gumarov, I.V. Yanilkin, R.V. Yusupov, R.I. Khaibullin, M.N. Aliyev, L.R. Tagirov // The Joint European Magnetic Symposia JEMS-2020, 7–11 December 2020. – Lisbon, Portugal. – Book of Abstracts, Abs. 4311. (стендовый доклад).

### Публикации в массовой печати и интернете

1. *Физики КФУ совместно с коллегами из Казахстана и Великобритании предложили новый способ оптической визуализации нанообъектов* Сайт РНФ/НОВОСТИ/СМИ о Фонде, 27 марта 2019 г. метки: Физика и космос. Источник: Пресс-служба КФУ <http://rscf.ru/ru/node/fiziki-kfu-sovmestno-s-kollegami-iz-kazakhstan-i-velikobritanii-predlozhili-novyy-sposob-opticheskoy-vizualizatsii-nanoobektyev>
2. Сайт КФУ, Институт физики <https://kpfu.ru/physics/nauka/proekty-i-granty/proekty-rnf>