

Исследование свойств магнитооптических пленок и пленочных наноструктур для интегрально-оптических невзаимных устройств межсоединений верхнего уровня УБИС*

Е.А. Вилков, С.С. Сафонов, А.Г. Темирязов, А.С. Федоров, А.А. Федорова, М.В. Логунов

Приведен обзор основных результатов выполнения проекта РФФИ в области синтеза, исследования и моделирования магнитооптических пленок и пленочных наноструктур для интегрально-оптических невзаимных устройств межсоединений верхнего уровня ультрабольших интегральных схем (УБИС). На основании результатов исследований нано- и пикосекундных процессов в магнитных пленках – динамики спинов в монодоменной пленке и динамики доменных границ в многодоменной пленке – рассмотрены возможности разработки быстродействующих устройств оптики-на-кристалле, включая устройства терагерцевого диапазона частот.

Ключевые слова: ультрабольшие интегральные схемы, магнитооптика, невзаимные устройства, спин-фотоника, оптика-на-кристалле.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №18-29-27020).

Введение

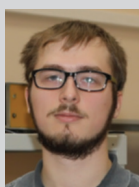
В ультрабольших интегральных схемах (УБИС) сетка соединений становится чрезвычайно сложной и многоуровневой [1] (десятки уровней), что ограничивает рост производительности многоядерных процессоров и надежность интегральных схем. При этом общая длина проводников в микросхеме процессора приближается к 100 км и становится существенным или даже основным источником энергопотерь и нагрева УБИС. В качестве перспективного способа решения проблемы металлизации активно исследуется возможность перехода от металлических к оптическим межсоединениям верхнего уровня УБИС [2–4], что позволит многократно по-

высить скорость передачи данных и исключить перекрестные помехи, неизбежно возрастающие при снижении топологических размеров микросхем и сокращении расстояния между металлическими проводниками.

Основные элементы оптики-на-кристалле те же, что и в волоконно-оптических линиях связи: излучатель, модулятор, оптический канал, фотоприемник, демодулятор. При этом разнообразие возникающих технических задач весьма велико, так как, в отличие от известных волоконно-оптических систем, при разработке элементов оптики-на-кристалле необходимо создавать миниатюрные устройства, совместимые с технологиями УБИС. Решение ряда задач требует фундаментальных подходов по поиску новых принципов функционирования таких приборов и разработке новых материалов для их реализации. В качестве основных материалов для магнитооптических элементов оптики-на-кристалле в последнее время рассматриваются ферриты-гранаты [4–6]. Это обусловлено рекордными величинами



ВИЛКОВ
Евгений Александрович
профессор,
Фрязинский филиал Института
радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН



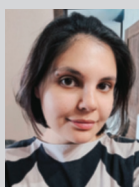
САФОНОВ
Сергей Станиславович
Институт радиотехники
и электроники
им. В.А. Котельникова РАН



ТЕМИРЯЗЕВ
Алексей Григорьевич
Фрязинский филиал Института
радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН



ФЕДОРОВ
Андрей Сергеевич
Институт радиотехники
и электроники
им. В.А. Котельникова РАН



ФЕДОРОВА
Анна Антоновна
Институт радиотехники
и электроники
им. В.А. Котельникова РАН



ЛОГУНОВ
Михаил Владимирович
профессор,
Институт радиотехники
и электроники
им. В.А. Котельникова РАН

вращения плоскости поляризации света (эффекта Фарадея) в ферритах-гранатах, легированных висмутом или церием. Другой интересный момент – возможности вариации свойств ферритов-гранатов благодаря большой кристаллической ячейке (160 атомов), что привлекает внимание к ним и как к одному из материалов спин-фотоники и молекулярной электроники.

Задача получения магнитооптического материала, соответствующего требованиям микроэлектроники к элементам оптики-на-кристалле (нанометровые толщины пленок, совместимость с кремниевыми технологиями, термостабильность и др.), сложна и является предметом активного поиска во многих исследовательских центрах. Проводятся поисковые исследования методов синтеза и оптимизации параметров пленок [7, 8] и магнитооптических невзаимных устройств [4–8], идет поиск новых принципов функционирования устройств оптики-на-кристалле [9] и путей согласования магнитооптических элементов с технологиями кремниевой микроэлектроники [10–13]. Наиболее привлекательны магнитооптические пленки для разработки невзаимных устройств оптики-на-кристалле – оптических изоляторов, циркуляторов, интерферометров Маха – Цандера [4–8, 14]. В оптике такие невзаимные устройства, как изоляторы, являются аналогами диода: они пропускают световой сигнал только в одном направлении. Это необходимо, например, для защиты источников сигнала от обратного отражения и выполнения других функций в оптических цепях.

Ряд полученных при выполнении проекта результатов относится к вопросам управления невзаимными устройствами и поиску оптимального диапазона длин волн для функционирования устройств оптики-на-кристалле. В отличие от волоконно-оптических линий связи, где диапазон длин волн (~1.55 мкм) определяется минимальными оптическими потерями для обеспечения распространения света на многие километры, в оптике-на-кристалле расстояния измеряются миллиметрами и на первый план выступают требования миниатюрности, термостабильности и быстродействия. В связи с работами по поиску новых условий и диапазонов работы устройств оптики-на-кристалле [14–16] в проекте исследованы возможности работы таких устройств в терагерцевом диапазоне частот [14, 17–19]. Он может быть перспективным для оптики-на-кристалле, так как в масштабах микросхемы распространение терагерцевых сигналов вполне возможно. Управляемая генерация терагерцевых колебаний в магнитных наноструктурах открывает перспективы повышения быстродействия устройств на несколько порядков, вплоть до рабочих частот в десятки терагерц. Таким образом, тематика проекта соответствует наиболее актуальным направлениям развития оптики-на-кристалле для поиска решения проблемы многоуровневых систем метал-

лизации ультрабольших интегральных схем.

Методы исследований

При практической реализации оптических межсоединений верхнего уровня УБИС важно учитывать многофакторные зависимости параметров материалов и создаваемых на их базе интегрально-оптических невзаимных устройств. Спектральные свойства пленок исследовали с использованием спектрометра циркулярного дихроизма JASCO J-1500, дополненного приставкой для регистрации дисперсии оптического вращения, криостатом и нагревателем (93–500 К). Нами разработана магнитная система к спектрометру, что позволило без замены образца исследовать не только оптические, но и магнитооптические параметры: магнитный циркулярный и линейный дихроизм, эффект Фарадея и петли гистерезиса в ультрафиолетовом, видимом и ближнем инфракрасном диапазонах (170–950 нм). Благодаря накоплению сигналов и их последующей обработке зарегистрированы спектры предельно тонких магнитооптических пленок, толщина которых сравнима с периодом кристаллической решетки граната, ~1 нм.

Процессы формирования и управления движением доменных границ в магнитных пленках исследовали разработанным ранее магнитооптическим методом [20, 21]. В нем совместно применены методы пространственной фильтрации выходного оптического потока и импульсной переходной реакции в режиме реального времени с использованием Фурье-образа доменной структуры и дифракционных максимумов высоких порядков при регистрации сигналов перемагничивания (рис. 1). Это позволило повысить чувствительность к динамическому смещению доменных границ до рекордной при оптических измерениях величины 5 нм и зарегистрировать их эволюцию с временным разрешением 1 нс.

Для исследования поверхности и доменной структуры пленок исполь-

зовали оптические поляризационные и атомно-силовые сканирующие микроскопы NT-MDT Solver P47H и SmartSPM (AIST-NT), для регистрации петель гистерезиса – вибрационный магнитометр BM-2K и магнитооптическую установку на базе эффекта Керра, для контроля СВЧ-свойств – векторный анализатор цепей до 18 ГГц, для управления аппаратурой и моделирования – специализированное программное обеспечение COMSOL Multiphysics, LabVIEW, MATLAB.

На заключительном этапе выполнения проекта использовалась установка накачки/зондирования, работающая в диапазоне температур 6–400 К с временным разрешением до 20 фс. Установка собрана в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН при выполнении мегагранта, ведущий ученый – профессор Университета Радбауда (Нидерланды) А.И. Кирилук.

Основные результаты

Квазистатические свойства магнитооптических пленок и наноструктур

Отработаны методики синтеза и обработки магнитооптических висмутсодержащих пленок ферритов-гранатов и пленочных структур микронных и нанометровых толщин для невзаимных устройств оптики-на-кристалле как варианта решения проблемы многоуровневых систем металлизации ультрабольших интегральных схем. Основное внимание уделено развитию метода ионного распыления и поиску путей синтеза висмутсодержащих пленок нанометровых толщин с высокими магнитооптическими параметрами (рис. 2), вопросам обеспечения совместимости с технологиями полупроводниковой микроэлектроники. Отработаны методики коррекции параметров пленок в результате послойного травления пленок методом ионно-лучевого распыления пучком ионов кислорода. Показано, что коэрцитивная сила пленок в области магнитных полей, соответствующих движению доменных границ, в результате глубокого послой-

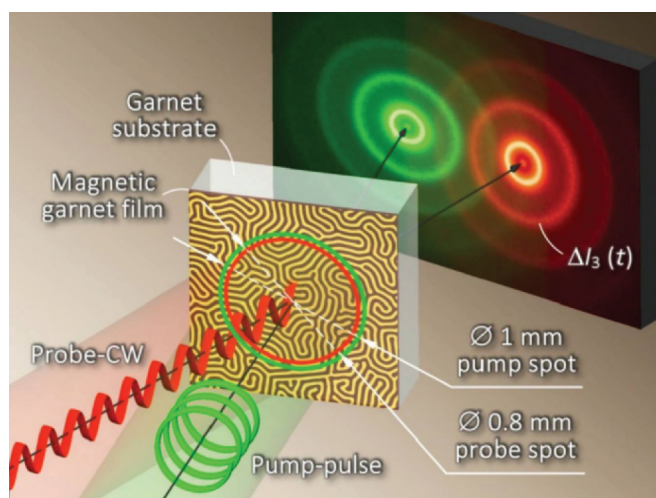


Рис. 1. Схема эксперимента. Исследуемый образец – магнитная пленка с доменной структурой на прозрачной подложке. Возбуждающий импульс лазера с циркулярной поляризацией (Pump-pulse, $\lambda=527$ нм) направлен перпендикулярно поверхности образца, вдоль оси магнитной анизотропии пленки. Линейно поляризованный зондирующий луч лазера (Probe CW, $\lambda=632$ нм) использован для регистрации изменения состояния доменных границ дифракционным методом.

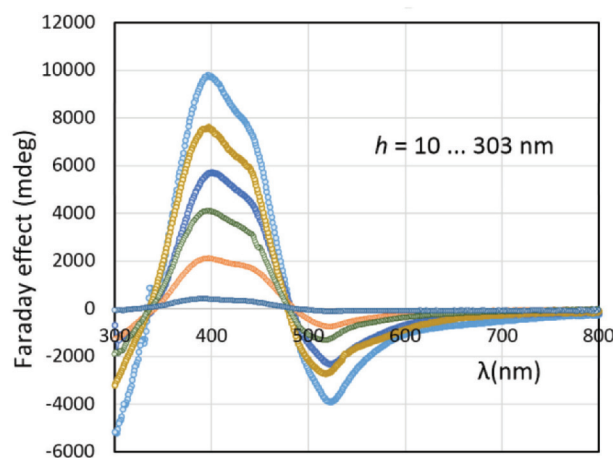


Рис. 2. Спектры эффекта Фарадея в пленках феррита-граната номинального состава $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$. Толщина пленок h варьируется от 10 до 303 нм. Удельное вращение плоскости поляризации света достигает 37 град/мкм на длине волны 400 нм.

ного травления до 90% толщины пленок не превышает 0.6 Э, что важно при использовании пленок в устройствах на базе доменных границ и других наноразмерных спиновых текстур [22].

Проведены экспериментальные исследования и моделирование спектральных свойств магнитооптических пленок (эффекта Фарадея, магнитного циркулярного дихроизма, рис. 3) в ультрафиолетовом, видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Оба упомянутых физических эффекта – магнитный циркулярный дихроизм и эффект Фарадея – могут быть использованы для управления состоянием намагниченности пленок оптическими методами, с помощью лазерных импульсов и, что важно, без приложения внешнего магнитного

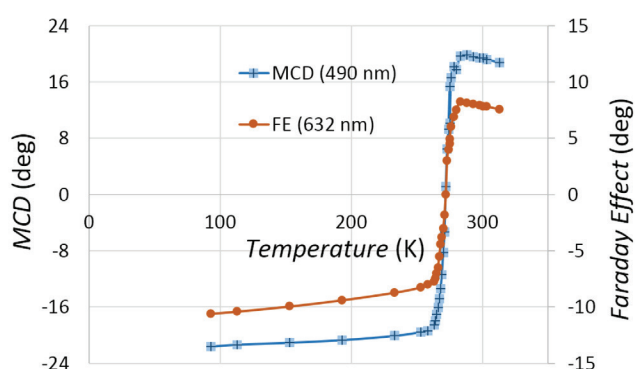


Рис. 3. Температурные зависимости магнитного циркулярного дихроизма (MCD) и эффекта Фарадея (FE) в окрестности температуры компенсации магнитного момента ферримагнетика $T_M = 272$ К.

поля. При этом знание спектральных зависимостей магнитооптических эффектов позволяет выбрать оптимальную длину волны света для управления устройствами. Полученные результаты использованы для построения и оптимизации модели оптического изолятора на базе пленок ферритов-гранатов нанометровых толщин, термостабилизации пленок и пленочных наноструктур, а также при исследовании нано- и пикосекундных процессов, индуцированных лазерными импульсами в магнитных пленках – динамики спинов в монодоменной пленке и динамики доменных границ в многодоменной пленке.

Для материалов, предназначенных к использованию в качестве основы элементов оптических межсоединений верхнего уровня ультрабольших интегральных схем, важно обеспечить термостабильность их работы в связи со значительным нагревом УБИС в рабочем режиме. Например, работоспособность оптических изоляторов для оптики-на-кристалле нужно обеспечить при значительном изменении температуры и одновременно без использования внешних источников магнитных полей, что диктует необходимость применения магнитоэлектрических пленок для таких элементов. Термостабильность и устойчивость работы невзаимных магнитооптических элементов во многом определяется коэрцитивной силой материала. Зависимости коэрцитивной силы пленок ферритов-гранатов от температуры можно

в значительной степени варьировать, вводя в додекаэдрическую подрешетку редкоземельные ионы с заметным магнитным моментом и изменяя тем самым температуру компенсации магнитного момента подрешеток граната.

Состояние намагниченности в пленках и наноструктурах на основе таких пленок могут значительно отличаться, например, из-за полей рассеяния на границах наноструктур. Исследованы равновесное распределение намагниченности и процессы перемагничивания наноструктур в виде полосок (рис. 4). Показано, что нарушение симметрии устойчивых состояний намагниченности в нанополоске переменной ширины может быть реализовано с помощью статического магнитного поля, приложенного перпендикулярно легкой оси ферромагнетика [23].

В последнее время антиферромагнетики привлекают большое внимание как перспективные материалы спинтроники для энергоэффективных и высокопроизводительных устройств обработки информации. Однако их преимущества приводят и к технологическим трудностям в контроле и обнаружении антиферромагнитных состояний из-за отсутствия чистой намагниченности. Ферримагнетики в точке магнитной компенсации демонстрируют отсутствие общего магнитного момента и, соответственно, становятся аналогами антиферромагнетиков (рис. 5). Но имеют важное отличие: свойства подрешеток в ферримагнетиках не полностью эквивалентны даже в компенсированном состоянии. Следовательно, для детектирования состояния компенса-

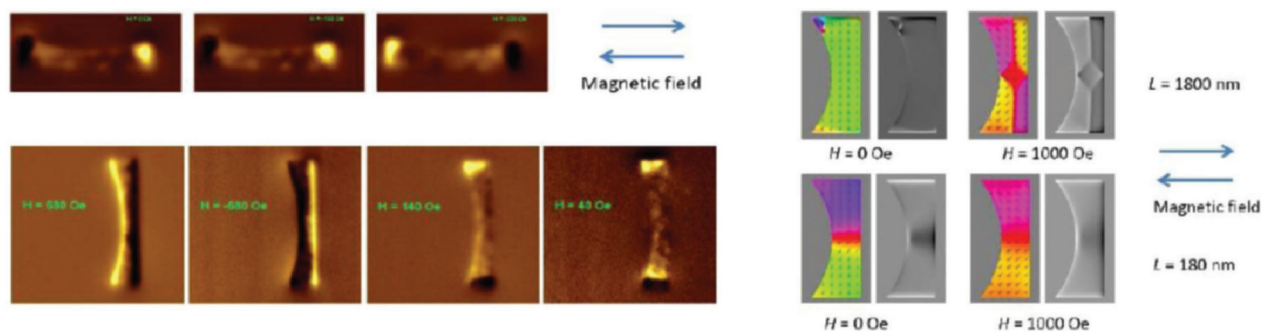


Рис. 4. Домены в магнитных наноструктурах: эксперимент (слева, магнитно-силовая микроскопия) и моделирование (справа).

рованного ферримагнетика можно использовать хорошо известные методы, такие как магнитооптические эффекты Фарадея и Керра, аномальный эффект Холла и другие.

С помощью эффекта Фарадея исследован переход от коллинеарной к наклонной магнитной фазе в двухподрешеточном ферримагнетике (пленке феррита-граната на подложке гадолиний-галлиевого граната) в магнитном поле с индукцией до 50 Тл, ориентированном вдоль направления оси легкого намагничивания [24]. При переходе к наклонной фазе перестройка магнитной структуры контролируется слабыми взаимодействиями и появляется возможность реализации множества магнитных фазовых диаграмм. В непосредственной близости от температуры компенсации наблюдался предшественник перехода сложной ступенчатой формы (рис. 6). С помощью изготовленного методом прецизионного ионного распыления образца с переменной толщиной продемонстрировано интерфейсное происхождение предшественника. Диффузия гадолиния из подложки в пленку образует тонкий смешанный слой с повышенной намагниченностью. Эффективная толщина этого слоя увеличивается до 700 нм при $T \sim T_M$. Это огромная величина по сравнению с ожидаемым магнитным слоем нанометровой толщины на границе раздела пленка/подложка. Данный эффект может повлиять на работу квазиантиферромагнитных элементов спинтроники и оптики-на-кристалле. С другой стороны, эффект гигантского расширения индуцированного интерфейсного слоя может быть использован для управления параметрами устройств спинтроники.

Динамические свойства магнитных пленок и магнитных текстур

Ферриты-гранаты, легированные висмутом или церием, отличаются рекордными магнитооптическими эффектами. Этот факт – главный приятельный момент для разработки

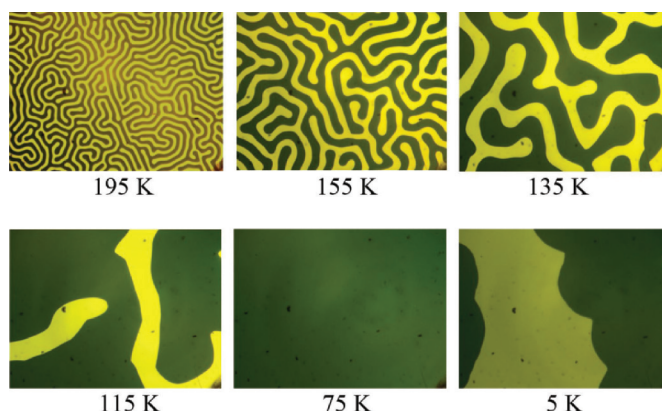


Рис. 5. Изменения в доменной структуре ферримагнетика при переходе через точку компенсации магнитного момента. При температуре 75 К пленка находится в монокристаллическом состоянии, что указывает на приближение температуры компенсации: намагниченность пленки уменьшается и разделение на домены становится энергетически невыгодным.

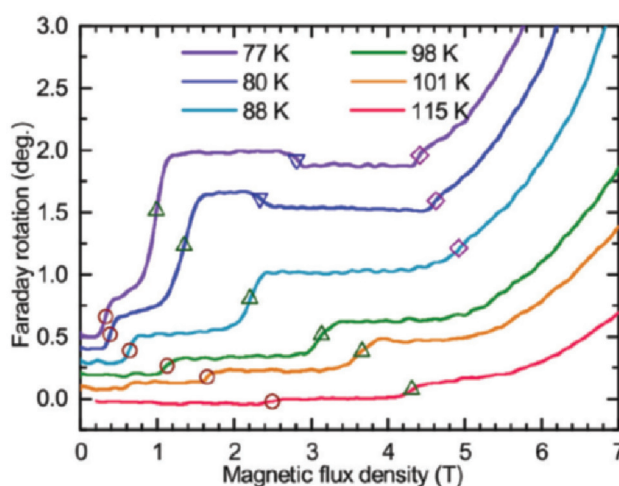


Рис. 6. Эволюция восходящей ветви кривой намагничивания ферримагнетика с изменением температуры. Для наглядности кривые смещены по вертикали. Маркерами отображена температурная динамика формирования особенностей ступенчатой формы.

на их основе устройств оптики-на-кристалле. Быстродействие таких устройств определяется динамикой спиновой системы магнетика. В этом отношении ферримагнитные материалы, к которым принадлежат ферриты со структурой граната, представляют собой уникальные системы. В них простота управления спинами с помощью разнообразных воздействий (магнитных полей, акустических волн, лазерных импульсов) сочетается с ускорением внутренней спиновой динамики за счет сильного обменного взаимодействия.

Для точного описания динамики решетки, приводящей к движению доменных границ и перемагничиванию пленок ферримагнетиков и антиферромагнетиков, в том числе с помощью оптического излучения, теоретически исследована динамика электронов проводимости в магнитных переходах из-за процессов переноса [25]. Получено уравнение динамики движения магнитного момента, усредненного по ансамблю

неравновесных спин-инжектированных электронов в ферромагнитном переходе, при наличии обменного взаимодействия, взаимодействия с внешним электромагнитным полем и термостатом, с учетом пространственной неоднородности распределения носителей заряда. Показано, что в процессах поглощения и излучения электромагнитного излучения анизотропия магнитной среды играет существенную роль. На основе результатов решения уравнений динамики движения магнитного момента проведена оценка вероятности переходов электронов с переворотом спина при спиновой инжекции, а из решения уравнения для неравновесной спиновой поляризации в магнитных переходах рассчитаны частоты излучения или поглощения фотонов с энергией, соответствующей энергии эффективного обменного расщепления спиновых подзон.

Доменная граница разделяет однородно намагниченные области материала – домены, и от скорости доменных границ зависит быстродействие устройств на базе магнитных пленок. Механизмы управления доменными границами и в целом динамикой намагниченности могут быть реализованы с помощью акустической волны [26], импульсов магнитного поля [27], фемтосекундных лазерных импульсов [28]. В первом случае показано, что при достаточно больших амплитудах акустической сдвиговой волны скорость вынужденного движения доменной границы может достигать значительной доли скорости звука. Это происходит из-за определенных условий резонанса, зависящих от частоты акустической волны, угла ее падения и амплитуд сдвигового смещения, что приводит к полному отражению волны и максимизации воздействия. Найдены условия возникновения сильной нелинейности при взаимодействии упругой и магнитной подсистем, что проявляется отрицательным наклоном пика резонансного отражения и s-образной зависимостью скорости доменной грани-

цы от амплитуды сдвигового смещения.

При управлении доменными границами с помощью импульсов магнитного поля особый интерес представляет диапазон температур вокруг точек магнитной и спиновой компенсации, точно уравнивающий как магнитный, так и угловой моменты системы и приводящий к интересным физическим эффектам, которые могут быть использованы в практических устройствах. В точке магнитной компенсации общая намагниченность становится равной нулю (см. рис. 3 и 5), а в точке спиновой компенсации гиромагнитное отношение стремится к бесконечности. Поскольку динамические свойства магнетика пропорциональны гиромагнитному отношению, то в точке спиновой компенсации процессы изменения намагниченности резко ускоряются. Нами исследована динамика доменной границы в пленке феррита-граната и в окрестности точки компенсации намагниченности, и в окрестности точки спиновой компенсации [27]. Экспериментально продемонстрирована разница на два порядка в подвижности и скорости доменной границы в окрестностях этих двух точек компенсации (рис. 7). Эффект увеличения скорости доменной границы до скорости, сравнимой со скоростью звука в пленке феррита-граната, может быть использован для многократного повышения быстродействия элементов оптики-на-кристалле.

Условия работы оптики-на-кристалле значительно отличаются от условий работы элементов волоконно-оптических линий связи. Традиционный для волоконной оптики диапазон длин волн не является ограничивающим фактором, ведется поиск возможностей работы оптики-на-кристалле в других диапазонах частот. Проведены поисковые исследования возможностей работы материалов для оптики-на-кристалле в терагерцевом диапазоне частот [29, 30]. Для наногетероструктуры «скошенный антиферромагнетик/платина» теоретически показана возможность нелинейных

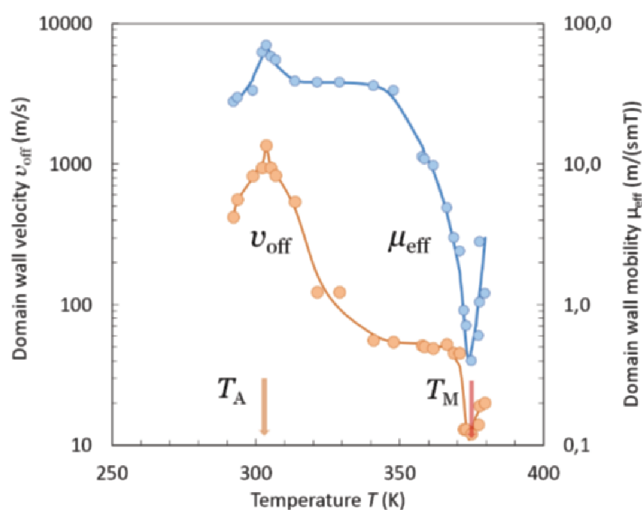


Рис. 7. Зависимости скорости v_{off} и подвижности μ_{eff} доменных границ в окрестности точек спиновой T_A и магнитной T_M компенсации.

квазиантиферромагнитных колебаний спиновой системы в терагерцевом диапазоне под действием импульсов электромагнитного поля. Экспериментально с помощью магнитооптического эффекта Фарадея исследована генерация когерентных колебаний спинов с частотой до 350 ГГц в ферритах-гранатах. Для возбуждения антиферромагнитно связанных спинов использовался пикосекундный импульс магнитного поля. Динамика спинов соответствует обменной моде, возбуждаемой зеemannовским взаимодействием терагерцевого магнитного поля со спинами.

Заключение

Полученные в результате выполнения проекта результаты способствуют глубокому пониманию физики магнитооптических явлений и динамических процессов в пленках и гетероструктурах с ферри- и антиферромагнитным упорядочением, что важно как для оптимизации магнитооптических устройств и поиска способов управления ими, так и для развития физиче-

ских основ технологии создания невзаимных элементов фотоники для оптических межсоединений верхнего уровня, совместимых с технологиями ультрабольших интегральных схем.

В соответствии с правилами РФФИ подготовлены интернет-ресурсы по тематике проекта: «Магнитооптические микро- и наноструктуры для оптики-на-кристалле» (<http://www.cplire.ru/rus/lab191/magnetofotonics.html>), научно-популярная публикация на сайте РАН «Спинтроника может снизить энергопотребление компьютеров в тысячи раз» (<http://www.ras.ru/news/shownews.aspx?id=a8ff54fb-7d25-442e-a118-0b0795418012#content>), приглашенная лекция на Школе-семинаре «Волны-2022» «Спиновые тексты в спин-волновой электронике и наноматематике» (https://www.youtube.com/watch?v=vYWGnaK1G-zY&list=PLSvOjFhJkKxlBfsjTLbLX1CAm_rdeQRnT&index=13).

Авторы благодарны коллегам из ИПТМ РАН, ИОФ им. А.М. Прохорова РАН, МФТИ, Саровского ФТИ НИЯУ МИФИ, МИРЭА, МЭИ, СГУ им. Н.Г. Чернышевского, МГУ им. Н.П. Огарева, НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, Университета Радбауда (Нидерланды), Университета Лилля (Франция), Шанхайского института керамики (КНР), Королевского института технологий (Швеция), совместно с которыми проведены исследования по тематике проекта.

Литература

1. Д.Г. Громов, А.И. Мочалов, А.Д. Сулимин, В.И. Шевяков, *Металлизация ультрабольших интегральных схем*, РФ, Москва, 2012, 277 с.
2. K. Ohashi, K. Nishi, T. Shimizu, M. Nakada, J. Fujikata, J. Ushida, S. Torii, K. Nose, M. Mizuno, H. Yukawa, M. Kinoshita, N. Suzuki, A. Gomyo, T. Ishi, D. Okamoto, K. Furue, T. Ueno, T. Tsuchizawa, T. Watanabe, K. Yamada, S.-i. Itabashi, J. Akedo *B Proc. IEEE*, 2009, 97(7), 1186. DOI: 10.1109/JPROC.2009.2020331.
3. C. García-Meca, S. Lechago, A. Brimont, A. Griol, S. Mas, L. Sánchez, L. Bellieres, N.S. Losilla, J. Martí *Light-Sci. Appl.*, 2017, 6, e17053. DOI: 10.1038/lsa.2017.53.
4. J. Hu, X.Y. Sun, Q. Du, M. Onbasli, C.A. Ross *B Proc. SPIE*, 2016, 9750, 97500W. DOI: 10.1117/12.2209658.
5. Q. Du, T. Fakhrul, Y. Zhang, J. Hu, C.A. Ross *MRS Bulletin*, 2018, 43, 413. DOI: 10.1557/mrs.2018.127.
6. M. Nur-E-Alam, M. Nur-E-Alam, M. Vasiliev, K. Alameh *Opt. Mater.*, 2019, 98, 109309. DOI: 10.1016/j.optmat.2019.109309.
7. K. Kasahara, S. Wang, T. Ishibashi, T. Manago *Japanese J. Appl. Phys.*, 2019, 58, 060906. DOI: 10.7567/1347-4065/ab1fc7.
8. H. Otmani, M. Lahoubi, S. Pu, M. Bouchemat, T. Bouchemat, Y. Zhao, R. Deghdak *J. Nanophotonics*, 2019, 13, 026002. DOI: 10.1117/1.JNP.13.
9. S. Sharma, B. Zare Rameshti, Y.M. Blanter, G.E.W. Bauer *Phys. Rev. B*, 2019, 99, 214423. DOI: 10.1103/PhysRevB.99.214423.
10. B. Dieny, I.L. Prejbeanu, K. Garello, P. Gambardella, P. Freitas, R. Lehnendorff, W. Raberg, U. Ebels, S.O. Demokritov, J. Akerman, A. Deac, P. Pirro, C. Adelmann, A. Anane, A.V. Chumak, A. Hiroata, S. Mangin, M. Cengiz Onbasli, M. D'Aquino, G. Prenat, G. Finocchio, L. Lopez Diaz, R. Chantrell, O. Chubykalo-Fesenko, P. Bortolotti *Nat. Electron.*, 2020, 3, 446. DOI: 10.1038/s41928-020-0461-5.
11. L. Carettaet, S.-H. Oh, T. Fakhrul, D.-K. Lee, B.H. Lee, S.K. Kim, C.A. Ross, K.-J. Lee, G.S.D. Beach *Science*, 2020, 370, 1438. DOI: 10.1126/science.aba5555.
12. H.S. Kum, H. Lee, S. Kim, S. Lindemann, W. Kong, K. Qiao, P. Chen, J. Irwin, J.H. Lee, S. Xie, S. Subramanian, J. Shim, S.-H. Bae, C. Choi, L. Ranno, S. Seo, S. Lee, J. Bauer, H. Li, K. Lee, J.A. Robinson, C.A. Ross, D.G. Schlom, M.S. Rzchowski, C.B. Eom, J. Kim *Nature*, 2020, 578, 75. DOI: 10.1038/s41586-020-1939-z.
13. P. Barla, V. Kumar Joshi, S. Bhat *J. Comput. Electron.*, 2021, 20, 805. DOI: 10.1007/s10825-020-01648-6.
14. Z. Tan, F. Fan, X. Dong, J. Cheng, S. Chang *Sci. Rep.*, 2019, 9, 20210. DOI: 10.1038/s41598-019-56789-x.
15. N. Margalit, C. Xiang, S.M. Bowers, A. Bjorlin, R. Blum, J.E. Bowers *Appl. Phys. Lett.*, 2021, 118, 220501. DOI: 10.1063/5.0050117.
16. H. Yang, Z. Xie, H. He, Q. Zhang, X. Yuan *APL Photonics*, 2021, 6, 110901. DOI: 10.1063/5.0060736.

17. С.А. Никитов, А.Р. Сафин, Д.В. Калябин, А.В. Садовников, Е.Н. Бегинин, М.В. Логунов, М.А. Морозова, С.А. Одинцов, С.А. Осокин, А.Ю. Шараевская, Ю.П. Шараевский, А.И. Кирилюк
УФН, 2020, **190**, 1009. DOI: 10.3367/UFNr.2019.07.038609.
18. А.Р. Сафин, С.А. Никитов, А.И. Кирилюк, Д.В. Калябин, А.В. Садовников, П.А. Стрёмухов, М.В. Логунов, П.А. Попов
ЖЭТФ, 2020, **158**, 85. DOI: 10.31857/S0044451020070081.
19. A. Stupakiewicz, C.S. Davies, K. Szerenos, D. Afanasiev, K.S. Rabinovich, A.V. Boris, A. Caviglia, A.V. Kimel, A. Kirilyuk
Nat. Phys., 2021, **17**, 489. DOI: 10.1038/s41567-020-01124-9.
20. M.V. Gerasimov, M.V. Logunov, A.V. Spirin, Yu.N. Nozdrin, I.D. Tokman
Phys. Rev. B, 2016, **94**, 014434. DOI: 10.1103/PhysRevB.94.014434.
21. М.В. Герасимов, С.В. Ильин, М.В. Логунов, С.А. Никитов, А.В. Спири, А.Н. Чалдышкин
Приборы и техника эксперимента, 2017, №5, 106.
DOI: 10.7868/S0032816217050202.
22. М.В. Логунов, С.А. Никитов, А.И. Стогний, С.С. Сафонов, А.Г. Темиряев
Известия РАН. Сер. физическая, 2019, **83**, 950.
DOI: 10.1134/S0367676519070251
23. М.В. Логунов, С.А. Никитов, А.Г. Темиряев, М.П. Темиряева, С. Джордано, Т. Матурин, Я. Дуич, Н. Тиерцелин, Ф. Перно
Известия РАН. Сер. физическая, 2020, **84**, 251.
DOI: 10.31857/S0367676520020209.
24. Yu.B. Kudasov, M.V. Logunov, R.V. Kozabaranov, I.V. Makarov, V.V. Platonov, O.M. Surdin, D.A. Maslov, A.S. Korshunov, I.S. Strelkov, A.I. Stognij, V.D. Selemir, S.A. Nikitov
Appl. Phys. Lett., 2022, **120**, 122403.
DOI: 10.1063/5.0086067.
25. Е.А. Вилков, Г.М. Михайлов, С.А. Никитов, А.Р. Сафин, М.В. Логунов, В.Н. Коренивский, С.Г. Чугарев, Л.А. Фомин
ФТТ, 2019, **61**, 1021.
DOI: 10.21883/FTT.2019.06.47674.279.
26. E. Vilkov, O. Byshevski-Konopko, P. Stremoukhov, A. Safin, M. Logunov, D. Kalyabin, S. Nikitov, A. Kirilyuk
Ultrasonics, 2022, **119**, 106588.
DOI: 10.1016/j.ultras.2021.106588.
27. M.V. Logunov, S.S. Safonov, A.S. Fedorov, A.A. Danilova, N.V. Moiseev, A.R. Safin, S.A. Nikitov, A. Kirilyuk
Phys. Rev. Applied, 2021, **15**, 064024.
DOI: 10.1103/PhysRevApplied.15.064024.
28. I.A. Dolgikh, F. Formisano, K.H. Prabhakara, M.V. Logunov, A.K. Zvezdin, P.C.M. Christianen, A.V. Kimel
Appl. Phys. Lett., 2022, **120**, 012401. DOI: 10.1063/5.0076442.
29. P. Stremoukhov, A. Safin, M. Logunov, S. Nikitov, A. Kirilyuk
J. Appl. Phys., 2019, **125**, 223903. DOI: 10.1063/1.5090455.
30. T.G.H. Blank, K.A. Grishunin, E.A. Mashkovich, M.V. Logunov, A.K. Zvezdin, A.V. Kimel
Phys. Rev. Lett., 2021, **127**, 037203.
DOI: 10.1103/PhysRevLett.127.037203.

English

Investigation of Magneto-Optical Films and Film Nanostructures for On-Chip Monolithic Integration of Non-Reciprocal Photonic Devices

Evgeniy A. Vilkov

Professor,
Fryazino Branch of Kotelnikov IRE, RAS,
1 Vvedensky Sq., Fryazino,
Moscow reg., 141120, Russia
e-vilkov@yandex.ru

Sergey S. Safonov

Kotelnikov IRE, RAS
11-7 Mokhovaya Str.,
Moscow, 125009, Russia
sergej-safonov-81@bk.ru

Alexei G. Temiryazev

Fryazino Branch of Kotelnikov IRE, RAS,
1 Vvedensky Sq., Fryazino,
Moscow region, 141120, Russia
temiryazev@gmail.com

Andrei S. Fedorov

Kotelnikov IRE, RAS
11-7 Mokhovaya Str.,
Moscow, 125009, Russia
fedorov_a_s@inbox.ru

Anna A. Fedorova

Kotelnikov IRE, RAS
11-7 Mokhovaya Str.,
Moscow, 125009, Russia
annadanilova99@gmail.com

Mikhail V. Logunov

Professor,
Kotelnikov IRE, RAS
11-7 Mokhovaya Str.,
Moscow, 125009, Russia
logunov@cplire.ru

Abstract

The review of the RFBR project results in the field of synthesis, research and modeling of magneto-optical films and film nanostructures for on-chip monolithic integration of non-reciprocal photonic devices is given. Based on the results of studies of nano- and picosecond processes in magnetic films – the dynamics of spins in a monodomain film and the dynamics of domain walls in a multi-domain film, the possibilities of developing high-speed optics-on-chip devices, including devices of the terahertz frequency range, are considered.

Keywords: on-chip monolithic integration of photonic devices, magneto-optics, spin-photonics, non-reciprocal devices.

*The work was financially supported by RFBR (project 18-29-27020).

Images & Tables

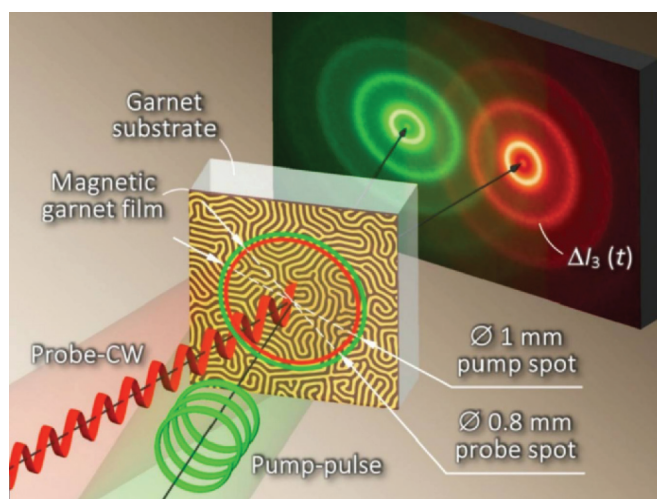


Fig. 1. The sketch of the experiment. The test sample is a magnetic film with a domain structure on a transparent substrate. The circularly polarized laser pump-pulse ($\lambda=527$ nm) is directed perpendicular to the sample surface, along the light axis of the film. A linearly polarized probe laser beam ($\lambda=632$ nm) was used to register changes in the state of domain walls by the diffraction method.

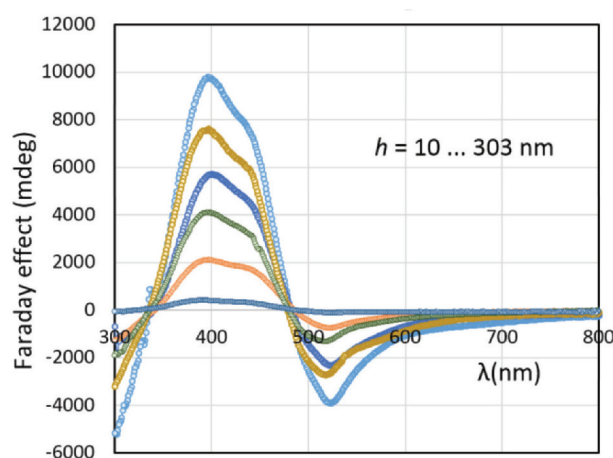


Fig. 2. Faraday effect spectra of the ferrite-garnet films with nominal composition of $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$. The film thickness h varies from 10 to 303 nm. The rotation of the light plane polarization reaches 37 degrees/ μm at a wavelength of 400 nm.

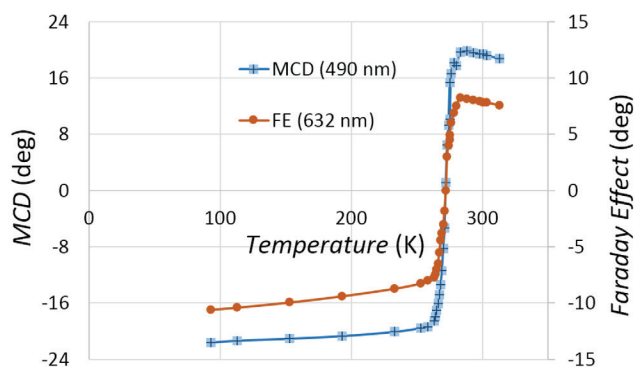


Fig. 3. Temperature dependences of magnetic circular dichroism (MCD) and the Faraday effect (FE) in the vicinity of the magnetic compensation temperature of the ferrimagnet $T_M=272$ K.

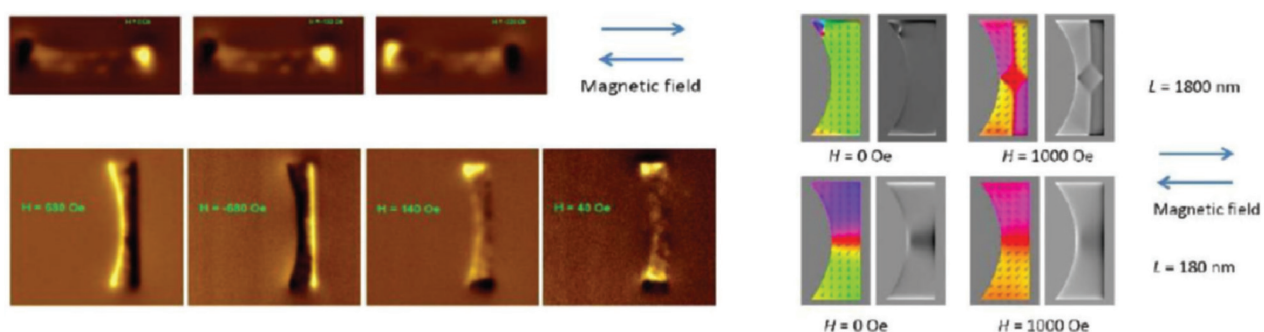


Fig. 4. Domains in magnetic nanostructures: experiment (left, magnetic force microscopy) and simulation (right).

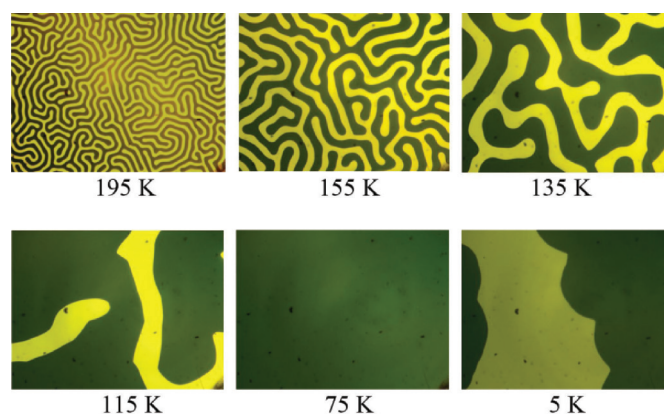


Fig. 5. Changes in the ferrimagnet domain structure during the transition through the magnetic-moment compensation point. At a temperature of 75 K, the film is in a monodomain state, which indicates an approaching of the compensation temperature: the magnetization of the film decreases, and the separation into domains becomes energetically disadvantageous.

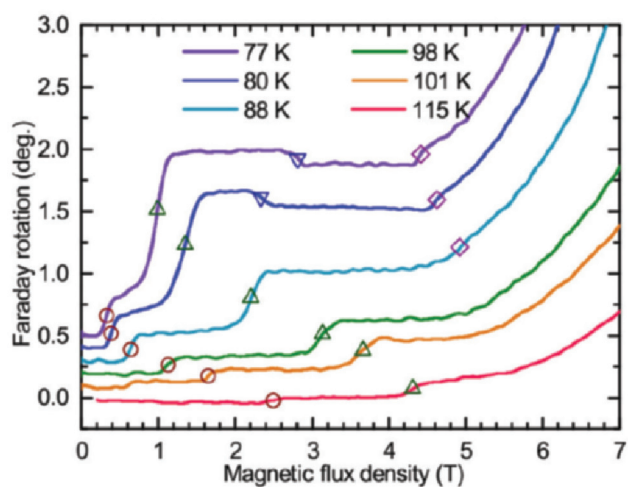


Fig. 6. The evolution of the rising branch of the ferrimagnet magnetization curve with temperature. For clarity, the curves are shifted vertically. The markers show the temperature dynamics of the stepped-shape features formation.

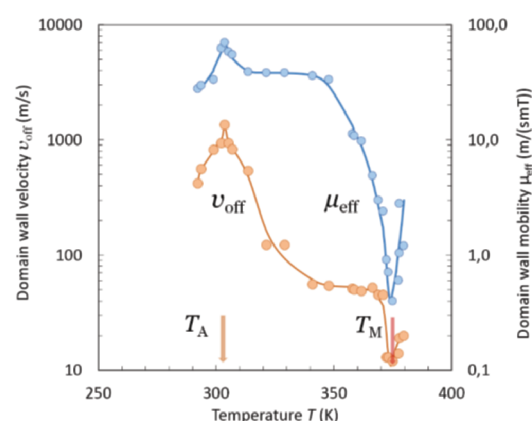


Fig. 7. Dependences of the v_{off} velocity and the μ_{eff} domain-wall mobility in the vicinity of the spin T_A and magnetic T_M compensation points.

References

References

1. D.G. Gromov, A.I. Mochalov, A.D. Sulimin, V.I. Shevyakov *Metallization of Ultra-Large Integrated Circuits* [Metallizatsia ultrabolshih integralnykh khem], RF, Moscow, 2012, 277 pp. (in Russian).
2. K. Ohashi, K. Nishi, T. Shimizu, M. Nakada, J. Fujikata, J. Ushida, S. Torii, K. Nose, M. Mizuno, H. Yukawa, M. Kinoshita, N. Suzuki, A. Gomyo, T. Ishi, D. Okamoto, K. Furue, T. Ueno, T. Tsuchizawa, T. Watanabe, K. Yamada, S.-i. Itabashi, J. Akedo *In Proc. IEEE*, 2009, 97(7), 1186. DOI: 10.1109/JPROC.2009.2020331.
3. C. García-Meca, S. Lechago, A. Brimont, A. Griol, S. Mas, L. Sánchez, L. Bellieres, N.S. Losilla, J. Martí *Light-Sci. Appl.*, 2017, 6, e17053. DOI: 10.1038/lsa.2017.53.
4. J. Hu, X.Y. Sun, Q. Du, M. Onbasli, C.A. Ross *In Proc. SPIE*, 2016, 9750, 97500W. DOI: 10.1117/12.2209658.
5. Q. Du, T. Fakhrul, Y. Zhang, J. Hu, C.A. Ross *MRS Bulletin*, 2018, 43, 413. DOI: 10.1557/mrs.2018.127.
6. M. Nur-E-Alam, M. Nur-E-Alam, M. Vasiliev, K. Alameh *Opt. Mater.*, 2019, 98, 109309. DOI: 10.1016/j.optmat.2019.109309.
7. K. Kasahara, S. Wang, T. Ishibashi, T. Manago *Japanese J. Appl. Phys.*, 2019, 58, 060906. DOI: 10.7567/1347-4065/ab1fc7.
8. H. Otmani, M. Lahoubi, S. Pu, M. Bouchemat, T. Bouchemat, Y. Zhao, R. Deghdak *J. Nanophotonics*, 2019, 13, 026002. DOI: 10.1117/1.JNP.13.
9. S. Sharma, B. Zare Rameshti, Y.M. Blanter, G.E.W. Bauer *Phys. Rev. B*, 2019, 99, 214423. DOI: 10.1103/PhysRevB.99.214423.
10. B. Dieny, I.L. Prejbeanu, K. Garelo, P. Gambardella, P. Freitas, R. Lehnndorff, W. Raberg, U. Ebels, S.O. Demokritov, J. Akerman, A. Deac, P. Pirro, C. Adelmann, A. Anane, A.V. Chumak, A. Hiroata, S. Mangin, M. Cengiz Onbasli, M. D'Aquino, G. Prenat, G. Finocchio, L. Lopez Diaz, R. Chantrell, O. Chubykalo-Fesenko, P. Bortolotti *Nat. Electron.*, 2020, 3, 446. DOI: 10.1038/s41928-020-0461-5.
11. L. Carettaet, S.-H. Oh, T. Fakhrul, D.-K. Lee, B.H. Lee, S.K. Kim C.A. Ross, K.-J. Lee, G.S.D. Beach *Science*, 2020, 370, 1438. DOI: 10.1126/science.aba5555.
12. H.S. Kum, H. Lee, S. Kim, S. Lindemann, W. Kong, K. Qiao, P. Chen, J. Irwin, J.H. Lee, S. Xie, S. Subramanian, J. Shim, S.-H. Bae, C. Choi, L. Ranno, S. Seo, S. Lee, J. Bauer, H. Li, K. Lee, J.A. Robinson, C.A. Ross, D.G. Schlom, M.S. Rzechowski, C.B. Eom, J. Kim *Nature*, 2020, 578, 75. DOI: 10.1038/s41586-020-1939-z.
13. P. Barla, V. Kumar Joshi, S. Bhat *J. Comput. Electron.*, 2021, 20, 805. DOI: 10.1007/s10825-020-01648-6.
14. Z. Tan, F. Fan, X. Dong, J. Cheng, S. Chang *Sci. Rep.*, 2019, 9, 20210. DOI: 10.1038/s41598-019-56789-x.
15. N. Margalit, C. Xiang, S.M. Bowers, A. Bjorlin, R. Blum, J.E. Bowers *Appl. Phys. Lett.*, 2021, 118, 220501. DOI: 10.1063/5.0050117.
16. H. Yang, Z. Xie, H. He, Q. Zhang, X. Yuan *APL Photonics*, 2021, 6, 110901. DOI: 10.1063/5.0060736.
17. S.A. Nikitov, A.R. Safin, D.V. Kalyabin, A.V. Sadovnikov, E.N. Beginin, M.V. Logunov, M.A. Morozova, S.A. Odintsov, S.A. Osokin, A.Yu. Sharaevskaya, Yu.P. Sharaevsky, A.I. Kirilyuk *Phys. Usp.*, 2020, 190, 945. DOI: 10.3367/UFNe.2019.07.038609.
18. A.R. Safin, S.A. Nikitov, A.I. Kirilyuk, D.V. Kalyabin, A.V. Sadovnikov, P.A. Stremoukhov, M.V. Logunov, P.A. Popov *J. Exp. Theor. Phys.*, 2020, 131, 71. DOI: 10.1134/S1063776120070110.
19. A. Stupakiewicz, C.S. Davies, K. Szerenos, D. Afanasiev, K.S. Rabinovich, A.V. Boris, A. Caviglia, A.V. Kimel, A. Kirilyuk *Nat. Phys.*, 2021, 17, 489. DOI: 10.1038/s41567-020-01124-9.
20. M.V. Gerasimov, M.V. Logunov, A.V. Spirin, Yu.N. Nozdrin, I.D. Tokman *Phys. Rev. B*, 2016, 94, 014434. DOI: 10.1103/PhysRevB.94.014434.
21. M.V. Gerasimov, S.V. Ilin, M.V. Logunov, S.A. Nikitov, A.V. Spirin, A.N. Chaldyshkin *Instrum. Exp. Tech.*, 2017, 60, 716. DOI: 10.1134/S0020441217050189.
22. M.V. Logunov, S.A. Nikitov, A.I. Stognii, S.S. Safonov, A.G. Temiryazev *B. Russ. Acad. Sci.: Physics*, 2019, 83, 866. DOI: 10.3103/S1062873819070256.
23. M.V. Logunov, S.A. Nikitov, A.G. Temiryazev, M.P. Temiryazeva, S. Giordano, T. Mathurin, Y. Dusch, N. Tiercelin, P. Pernod *B. Russ. Acad. Sci.: Physics*, 2020, 84, 196. DOI: 10.3103/S1062873820020185.
24. Yu.B. Kudasov, M.V. Logunov, R.V. Kozabaranov, I.V. Makarov, V.V. Platonov, O.M. Surdin, D.A. Maslov, A.S. Korshunov, I.S. Strelkov, A.I. Stognij, V.D. Selemir, S.A. Nikitov *Appl. Phys. Lett.*, 2022, 120, 122403. DOI: 10.1063/5.0086067.
25. E.A. Vilkov, G.M. Mikhailov, S.A. Nikitov, A.R. Safin, M.V. Logunov, V.N. Korenivskii, S.G. Chigarev, L.A. Fomin *Phys. Solid State*, 2019, 61, 941. DOI: 10.1134/S1063783419060283.
26. E. Vilkov, O. Byshevski-Konopko, P. Stremoukhov, A. Safin, M. Logunov, D. Kalyabin, S. Nikitov, A. Kirilyuk *Ultrasonics*, 2022, 119, 106588. DOI: 10.1016/j.ultras.2021.106588.
27. M.V. Logunov, S.S. Safonov, A.S. Fedorov, A.A. Danilova, N.V. Moiseev, A.R. Safin, S.A. Nikitov, A. Kirilyuk *Phys. Rev. Applied*, 2021, 15, 064024. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.15.064024.
28. I.A. Dolgikh, F. Formisano, K.H. Prabhakara, M.V. Logunov, A.K. Zvezdin, P.C.M. Christianen, A.V. Kimel *Appl. Phys. Lett.*, 2022, 120, 012401. DOI: 10.1063/5.0076442.
29. P. Stremoukhov, A. Safin, M. Logunov, S. Nikitov, A. Kirilyuk *J. Appl. Phys.*, 2019, 125, 223903. DOI: 10.1063/1.5090455.
30. T.G.H. Blank, K.A. Grishunin, E.A. Mashkovich, M.V. Logunov, A.K. Zvezdin, A.V. Kimel *Phys. Rev. Lett.*, 2021, 127, 037203. DOI: 10.1103/PhysRevLett.127.037203.