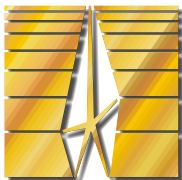


На правах рукописи



Шелухин Леонид Андреевич

**Сверхбыстрое лазерно-индуцированное
подавление магнитной анизотропии
в тонких плёнках металлов и диэлектриков**

Специальность 1.3.8 —
«Физика конденсированного состояния»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург — 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Научный руководитель: **Калашникова Александра Михайловна**
PhD (приравниваемая в РФ к степени к.ф.-м.н.)

Официальные оппоненты: **Белотелов Владимир Игоревич**,
д.ф.-м.н., профессор РАН, МГУ им. М. В. Ломоносова, доцент; Российский квантовый центр, руководитель группы "Магнитоплазмоника и сверхбыстрый магнетизм",

Садовников Александр Владимирович,
к.ф.-м.н., доцент, СГУ им. Н. Г. Чернышевского, доцент кафедры физики открытых систем СГУ, зам. директора НИИМФ СГУ

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет"

Защита состоится " " сентября 202 г. в на заседании диссертационного совета ФТИ 34.01.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН и на сайте <http://www.ioffe.ru>.

Отзывы на автореферат в одном экземпляре, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26, ученому секретарю диссертационного совета ФТИ 34.01.01.

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
ФТИ 34.01.01,
PhD



А. М. Калашникова

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Управление намагниченностью в магнитных наноструктурах и плёнках на субпикосекундных временных масштабах — это важная задача в рамках фундаментального направления фемтомагнетизма [1–6], а также в области создания устройств передачи, обработки и хранения информации. Ранее были показаны такие эффекты, возникающие при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов на магнитоупорядоченные материалы, как сверхбыстрое размагничивание [7], изменение обменного взаимодействия [8], полностью оптическое переключение намагниченности [9–11], обратные магнитооптические эффекты [12; 13], однако, все они ограничены требованиями к электронной структуре магнитных сред либо к поляризации и длине волны лазерного импульса.

В качестве универсального воздействия, позволяющего воздействовать на магнитное состояние материала, можно использовать сверхбыстрый лазерно-индуцированный нагрев, который в частности приводит к изменению магнитной анизотропии. Поскольку равновесное положение намагниченности в простейшем случае ферромагнетика определяется эффективным полем, которое состоит из внешнего магнитного поля и эффективного поля магнитной анизотропии [14], то меняя последнюю можно воздействовать на ориентацию намагниченности. Таким образом, в этой работе подробно будет рассмотрено *воздействие сверхбыстрого лазерно-индуцированного нагрева на магнитную анизотропию разных типов, характерную для металлических и диэлектрических структур.*

Часто результатом изменения магнитной анизотропии в магнитоупорядоченных средах на субпикосекундных временах становится прецессия намагниченности [15; 16]. По зависимости её параметров от условий возбуждения можно выявить, как именно поменялась магнитная анизотропия, и даже разделить различные вклады в такой процесс. Однако на момент написания настоящей работы ряд вопросов, связанных со изменением магнитной анизотропии под действием фемтосекундных лазерных импульсов, всё ещё остаётся открытым. В частности, не было рассмотрено влияние сверхбыстрого нагрева на магнитную ростовую анизотропию в тонких плёнках диэлектриков, а также на магнитоупругую и интерфейсную анизотропию в магнитных металлических наноструктурах, при том, что именно эти типы анизотропии играют определяющую роль в формировании магнитного состояния таких структур.

Целью настоящей работы является определение влияния сверхбыстрого лазерно-индуцированного нагрева на магнитную анизотропию различной природы в тонких ферро- и ферримагнитных пленках.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Создание экспериментальных установок для исследования сверхбыстрого лазерно-индуцированного изменения магнитной

анизотропии по методике фемтосекундной магнитооптической накачки-зондирования

2. Выявление влияния сверхбыстрого лазерно-индуцированного нагрева на
 - а) магнитоупругую анизотропию в гетероструктуре композитного мультиферроика $\text{CoFeB}/\text{BaTiO}_3$
 - б) интерфейсную анизотропию в структуре с туннельным магнитным переходом $\text{CoFeB}/\text{MgO}/\text{CoFeB}$
 - в) ростовую анизотропию в плёнке диэлектрика феррита-граната $(\text{YBiPrLu})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$
3. Определение величины изменения параметров магнитной анизотропии в этих структурах под воздействием фемтосекундных лазерных импульсов на основе наблюдаемой магнитной динамики.

Научная новизна. Все результаты, представленные в работе, являются новыми. Впервые экспериментально показано сверхбыстрое лазерно-индуцированное изменение параметра магнитоупругой анизотропии B_1 на примере ферромагнитного слоя структуры синтетического мультиферроика $\text{CoFeB}/\text{BaTiO}_3$. В результате этого происходит возбуждение прецессии и переключение намагниченности в единичном магнитоупругом домене структуры.

Впервые экспериментально продемонстрировано усиление подавления интерфейсной анизотропии в результате лазерно-индуцированного нагрева в структуре туннельного магнитного перехода $\text{CoFeB}/\text{MgO}/\text{CoFeB}$, наблюдаемого при значениях сверхбыстрого размагничивания более 20 %. Показано, что это приводит к спин-переориентационному переходу в такой структуре при умеренной плотности лазерной накачки $J = 1.8$ мДж/см² в результате полного подавления перпендикулярной магнитной анизотропии. Продemonстрировано управление частотой магнитной прецессии в структуре туннельного магнитного перехода в диапазоне 100 %.

Впервые экспериментально показано воздействие сверхбыстрого лазерно-индуцированного нагрева на параметры магнитной анизотропии в диэлектрике на примере висмут-замещенного феррита-граната. Предложен и апробирован подход к разделению вкладов в возбуждение прецессии намагниченности от лазерно-индуцированного изменения параметров одноосной и ромбической ростовой анизотропии ΔK_i и ΔK_{yz} .

Практическая значимость. Все результаты получены при комнатной температуре, а наблюдаемые процессы могут быть оптимизированы в конкретных структурах, что является ключевым условием использования в прикладных областях, таких как магноника и магнитная запись. Помимо этого, наблюдаемые эффекты важны для понимания процессов в рамках фундаментального направления сверхбыстрого магнетизма.

В работе речь идёт о процессах, в основе которых лежит *сверхбыстрый лазерно-индуцированный нагрев* магнитных сред, таким образом,

рассмотренные эффекты могут быть реализованы в широком классе материалов. Важно также отметить, что изменение параметров анизотропии любой природы приводит к изменению динамических свойств структур, что необходимо учитывать при сверхбыстром лазерном воздействии.

Сверхбыстрый лазерно-индуцированный спин-переориентационный переход в структуре CoFeB/MgO/CoFeB может быть использован при создании устройств магнитной памяти, в том числе и со случайным доступом. Лазерно-индуцированное возбуждение магнитной динамики в единичном магнитном домене в структуре BaTiO_3 является заделом для создания устройств реконфигурируемой магноники. Это связано со свойством отражения спиновых волн от доменных границ в зависимости от их типа, которым можно управлять ориентацией внешнего магнитного поля. Кроме того, в той же структуре показано переключение намагниченности из одного энергетического минимума в другой под воздействием лазерных импульсов, что также может быть использовано в приложениях.

Плёнки ферритов-гранатов — это также перспективный материал для реконфигурируемой магноники. Причина этого заключается как в больших длинах распространения спиновых волн, так и в возможности создания управляемых магнетонных кристаллов путём периодического изменения свойств среды лазерными импульсами, в том числе магнитной анизотропии.

Методология и методы исследования. Основной экспериментальный метод, использованный в работе, это магнитооптическая накачка-зондирование, известная также под англоязычным названием all-optical pump-probe (лаб. физики ферроиков, ФТИ им. А. Ф. Иоффе). Ряд измерений проводился в диапазоне температур 100–300 К. Дополнительно проводилась характеристика исследуемых структур путем измерения в них статических магнитооптических эффектов.

Результаты по сверхбыстрой магнитной динамике интерпретировались в рамках решения уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта. Общее описание методов исследования приведено в Главе 2. Детали экспериментов приведены в соответствующих главах.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Сверхбыстрый лазерно-индуцированный нагрев диэлектрика-ферромагнетика феррита-граната приводит к уменьшению параметров ростовой анизотропии материала, происходящему на пикосекундной временной шкале и релаксирующему на наносекундных временах. Траектория возбуждаемой вследствие нагрева прецессии намагниченности позволяет определить относительное лазерно-индуцированное изменение различных вкладов в ростовую анизотропию

2. Сверхбыстрый лазерно-индуцированный нагрев ферромагнитного аморфного металлического сплава CoFeB приводит к уменьшению параметра магнитоупругой анизотропии B_1 , происходящему на пикосекундной временной шкале и релаксирующему на наносекундных временах. В отдельных магнитоупругих доменах композитного мультиферроика CoFeB/BaTiO₃ лазерно-индуцированное уменьшение магнитоупругого параметра B_1 приводит к возбуждению прецессии и прецессионному переключению намагниченности.
3. Сверхбыстрый лазерно-индуцированный нагрев сверхтонкой пленки аморфного ферромагнитного сплава CoFeB, имеющего интерфейс с MgO, приводит к полному подавлению перпендикулярной магнитной анизотропии. Это возможно при умеренной плотности энергии в лазерном импульсе, благодаря усилению подавления интерфейсной анизотропии с увеличением сверхбыстрого размагничивания.

Достоверность представленных в диссертационной работе результатов обусловлена применением современных экспериментальных методик, воспроизводимостью результатов измерений, подкреплением экспериментальных результатов анализом на основе феноменологического подхода Смита-Сула и решения уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта, согласно результатов с современными представлениями физики конденсированного состояния, последующим использованием полученных результатов в работах других научных групп.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались соискателем лично на 18 российских и международных научных конференциях и симпозиумах: “Moscow International Symposium on Magnetism 2014”, “Novel Trends in Physics of Ferroics 2014”, “Физика СПб 2014”, “Spin physics, spin chemistry and spin technology 2015”, “Spin Waves 2015/2018”, “Международная зимняя школа по физике полупроводников 2015/2016”, “International Colloquium on Magnetic Films and Interfaces 2015”, “Ultrafast magnetism conference 2015/2019”, “Нанофизика и нанoeлектроника 2016”, “Euro-Asian Symposium Trends in MAGnetism 2016/2019”, “The 26th Conference of the Condensed Matter Division of the EPS 2016”, “9th Joint European Magnetic Symposia 2018”, “Заседание секции Магнетизм Научного Совета РАН по физике конденсированных сред 2018”, “COST action MAGNETOFON 2019”. Результаты были представлены соискателем на семинаре лаборатории физики ферроиков и Низкоразмерном семинаре в ФТИ им. А. Ф. Иоффе и Лаборатории оптики спина СПбГУ.

Личный вклад автора. Все представленные в диссертации результаты получены автором лично или при его определяющем участии, а именно соискателем выполнены настройка и отладка экспериментальных

установок оптической накачки зондирования, измерение сверхбыстрой лазерно-индуцированной динамики, обработка и анализ экспериментальных данных, расчеты в рамках феноменологической теории ферромагнитного резонанса. Постановка задач и интерпретация экспериментальных результатов осуществлялись совместно с научным руководителем. Автор также принимал ключевое участие в написании статей, подготовке докладов и выступлениях на научных конференциях и семинарах.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в трёх оригинальных статьях и одной обзорной статье, опубликованных в журналах, индексируемых базами данных Web of Science, Scopus и Russian Science Citation Index.

Публикации автора по теме диссертации

- A1. Ultrafast laser-induced changes of the magnetic anisotropy in a low-symmetry iron garnet film / L. A. Shelukhin, V. V. Pavlov, P. A. Usachev, P. Y. Shamray, R. V. Pisarev, A. M. Kalashnikova // Phys. Rev. B. — 2018. — Т. 97, вып. 1. — С. 014422.
- A2. Laser-Induced Magnetization Precession in Individual Magnetoelastic Domains of a Multiferroic $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}/\text{BaTiO}_3$ Composite / L. A. Shelukhin, N. A. Pertsev, A. V. Scherbakov, D. L. Kazenwadel, D. A. Kirilenko, S. J. Hämmäläinen, S. van Dijken, A. M. Kalashnikova // Phys. Rev. Applied. — 2020. — Т. 14, вып. 3. — С. 034061.
- A3. Сверхбыстрое лазерно-индуцированное управление магнитной анизотропией наноструктур / А. М. Калашникова, Н. Е. Хохлов, Л. А. Шелухин, А. В. Щербаков // Журнал технической физики. — 2021. — Т. 91, № 12. — С. 1848—1878.
- A4. Spin reorientation transition in $\text{CoFeB}/\text{MgO}/\text{CoFeB}$ tunnel junction enabled by ultrafast laser-induced suppression of perpendicular magnetic anisotropy / L. A. Shelukhin, R. R. Gareev, V. Zbarsky, J. Walowski, M. Münzenberg, N. A. Pertsev, A. M. Kalashnikova // Nanoscale. — 2022. — Т. 14, вып. 22. — С. 8153—8162.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 126 страниц, включая 29 рисунков и 2 таблицы. Список литературы содержит 194 наименования.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках диссертации, формулируются цель и задачи, излагаются научная новизна и значимость работы, описывается личный вклад автора, приводится апробация результатов и положения выносимые на защиту.

В **Первой главе** приведён краткий обзор литературы по сверхбыстрому лазерно-индуцированному воздействию на магнитную анизотропию и связанной с ним динамике намагниченности. Рассмотрены основные механизмы такого воздействия, схематично показанные на Рис. 1:

- изменение величины намагниченности (δM механизм)
- изменение параметров анизотропии (δK механизм)
- появление дополнительных членов в энергии анизотропии вследствие лазерно-индуцированного механического напряжения ($\delta\epsilon$ механизм)
- появление дополнительных осей анизотропии из-за лазерно-индуцированной перестройки электронной структуры (H_L механизм)

Представлен обзор, того, какие типы магнитной анизотропии являются определяющими для разных типов материалов и структур, а также сформулированы открытые вопросы по воздействию фемтосекундных лазерных импульсов на магнитную анизотропию.

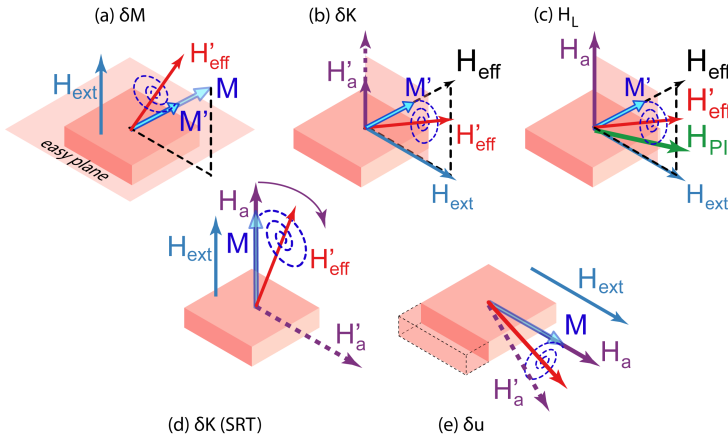


Рис. 1 — Схематичное изображение траектории намагниченности в результате различных эффектов модификации магнитной анизотропии. M , H_a и H_{eff} — это намагниченность, поле анизотропии и эффективное поле до возбуждения лазерным импульсом, M' , H'_a и H'_{eff} — после.

Во **Второй главе** описаны принципы экспериментальной методики и теоретических подходов, использованных в работе. Описан экспериментальный метод фемтосекундной магнитооптической накачки-зондирования. Описаны процедуры расчёта частоты и амплитуды прецессии намагниченности в результате сверхбыстрого изменения параметров анизотропии в рамках подхода теории ферромагнитного резонанса. Рассмотрен метод численного моделирования сверхбыстрой лазерно-индуцированной динамики намагниченности методом решения уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта.

Третья глава посвящена влиянию сверхбыстрого лазерно-индуцированного нагрева на магнитоупругую анизотропию в структуре $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}/\text{BaTiO}_3$ (см. Рис. 2 (а)). Особенностью такой структуры является возникновение 90° -градусных магнитоупругих доменов двух типов с характерным размером 12 и 3 мкм в слое CoFeB вследствие переноса деформации из подложки BaTiO_3 и явления обратной магнитострикции. Используя метод магнитооптической накачки-зондирования с микронным пространственным разрешением, было установлено, что лазерные импульсы возбуждают прецессию намагниченности в отдельных магнитоупругих доменах $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$, закреплённых за счёт связи с сегнетоупругими доменами в подложке BaTiO_3 (см. Рис. 2 (б)). Продемонстрировано, что в результате воздействия фемтосекундных лазерных импульсов прецессия намагниченности возбуждается только в доменах, где лёгкая ось намагничивания не параллельна внешнему магнитному полю. Зависимость параметров прецессии от величины и ориентации внешнего магнитного поля показывает, что такое лазерное воздействие с плотностью энергии $J = 10$ мДж/см² приводит к сверхбыстрому размагничиванию $\Delta M = -10\%$ и уменьшению параметра магнитоупругой связи B_1 в CoFeB на 27%. Показано, что лазерно-индуцированное уменьшение магнитоупругой связи и сверхбыстрое размагничивание связаны степенным законом $\gamma = n(n+1)/2$ с $n \approx 2$ [17].

$$B_1(T)/B_1(T=0) = [M_s(T)/M_s(T=0)]^\gamma \quad (1)$$

Установлено, что уменьшение анизотропии происходит в результате сверхбыстрого лазерно-индуцированного нагрева. Рассмотрено три механизма возбуждения прецессии намагниченности в результате сверхбыстрого лазерно-индуцированного нагрева: (i) с учётом только сверхбыстрого размагничивания ΔM_s , (ii) только уменьшения параметра магнитоупругой анизотропии ΔB_1 , (iii) только изменения деформаций $\Delta u_{xx,yy}$, а также комбинация всех вышеперечисленных эффектов (см. Рис. 2 (д)).

Анализ параметров прецессии намагниченности и её моделирование показал также наличие лазерно-индуцированного прецессионного переключения, которое происходит, когда внешнее магнитное поле направлено вдоль трудной оси намагничивания и его значение близко к эффективному

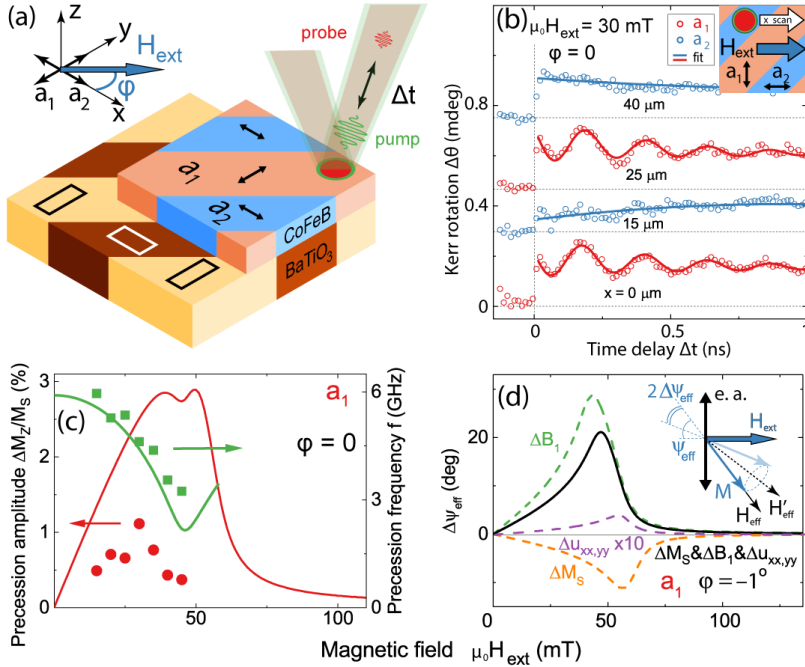


Рис. 2 — (a) Схематичное изображение структуры CoFeB/BaTiO₃ и эксперимента по накачке-зондированию. Прямоугольники и двойные стрелки показывают деформацию решётки в СЭ доменах BaTiO₃ и лёгкие оси индуцированной деформацией магнитоупругой анизотропии в a_1 и a_2 доменах плёнки CoFeB, соответственно. (b) Лазерно-индуцированное керровское вращение плоскости поляризации импульса зондирования $\Delta\theta$ как функция времени задержки Δt , измеренное при различных положениях областей накачки-зондирования для a_1 (красные символы) и a_2 (синие символы) доменов. Внешнее магнитное поле H_{ext} приложено под углом $\varphi=0$. Линиями показана аппроксимация затухающей синусоидой. (c) Экспериментальные зависимости частоты f (зелёные символы) и нормализованной амплитуды $\Delta M_z^0/M_S$ (красные символы) прецессии намагниченности от внешнего магнитного поля в доменах a_1 измеренные при угле $\varphi = -1^\circ$. (d) Вычисленные полевые зависимости изменения равновесной ориентации эффективного поля $\Delta\psi_{eff}$ в доменах a_1 вследствие лазерно-индуцированного размагничивания ΔM_S (оранжевые пунктирные линии), изменения магнитоупругого параметра ΔB_1 (зелёные пунктирные линии), изменения деформаций $\Delta u_{xx,yy}$ (фиолетовые пунктирные линии), а также в результате комбинации ΔM_S , ΔB_1 и $\Delta u_{xx,yy}$ (сплошные чёрные линии).

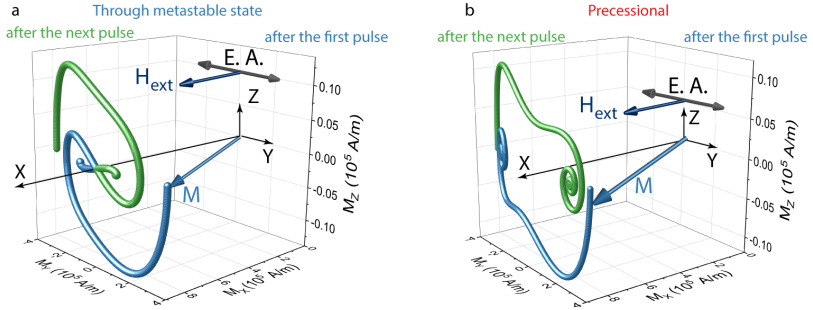


Рис. 3 — Рассчитанная траектория намагниченности в течение 4 нс после возбуждения при переключении через метастабильное состояние (а) и прецессионном переключении (б) после воздействия первого импульса (синяя траектория) и после воздействия следующего (зеленая траектория)

полю магнитоупругой анизотропии. Признаком такого переключения является уменьшение амплитуды сигнала в стробоскопических измерениях по методике накачки-зондирования, когда частота прецессии минимальна (см. Рис. 2 (с)). В зависимости от времени релаксации величины намагниченности и магнитоупругого параметра к равновесным значениям рассмотрено два сценария лазерно-индуцированного переключения намагниченности: (i) через метастабильное состояние, в котором намагниченность направлена вдоль внешнего магнитного поля (см. Рис. 3 (а)), и (ii) прецессионное переключение (см. Рис. 3 (б)).

Кроме того, установлено, что процесс возбуждения прецессии в отдельном магнитоупругом домене не испытывает влияния соседних доменов. Сделан вывод о том, что лазерно-индуцированное изменение магнитоупругой анизотропии является перспективным инструментом для управления динамикой намагниченности и переключения в композитных мультиферроиках и магнитоэлектриках с пространственной селективностью.

Четвёртая глава посвящена экспериментам по сверхбыстрому лазерно-индуцированному воздействию на интерфейсную анизотропию в магнитном туннельном переходе (МТП) $\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}/\text{MgO}/\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}$ ($\text{CoFeB}/\text{MgO}/\text{CoFeB}$) с ультратонкими электродами CoFeB , обладающими перпендикулярной магнитной анизотропией (ПМА) (см. Рис. 4 (а)). Было показано, что помимо сверхбыстрого размагничивания воздействие фемтосекундного лазерного импульса накачки приводит к возбуждению прецессии намагниченности в более тонком слое CoFeB , когда внешнее магнитное поле направлено в плоскости структуры (см. Рис. 4 (б)). При этом намагниченность более толстого слоя CoFeB оказывается направленной вдоль приложенного поля.

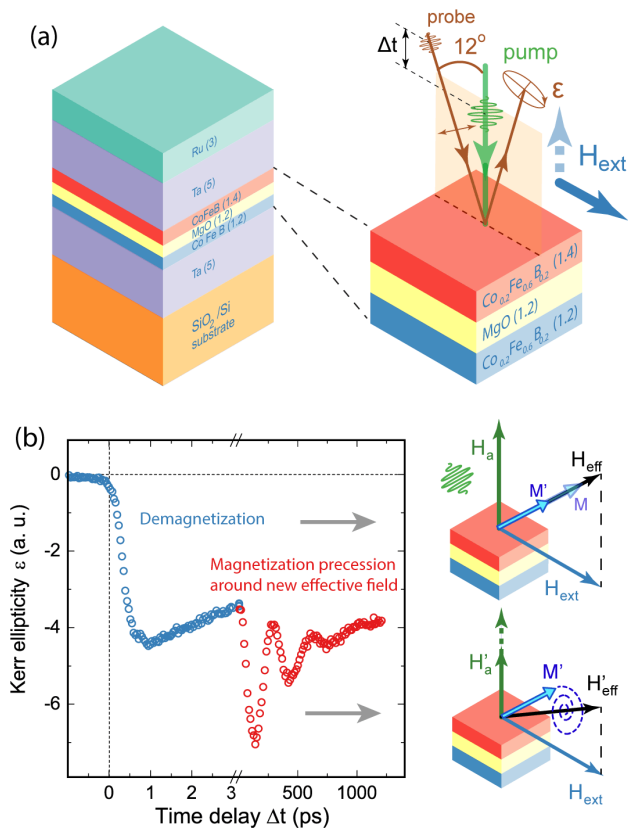


Рис. 4 — (а) Структура МТП и геометрия эксперимента по методике фемтосекундной накачки-зондирования. В скобках указаны толщины слоёв в нм. (б) Типичная временная зависимость керровской эллиптичности, измеренной в поле $\mu_0 H_{\text{ext}} = 0.18$ Т, приложенного в плоскости образца при $T = 140$ К. Справа проиллюстрирована траектория движения намагниченности в соответствии с графиком. M (M') намагниченность в равновесном (возбуждённом) состоянии. H_a и H_{eff} эффективное поле анизотропии и общее эффективное поле соответственно. H'_a и H'_{eff} те же поля после воздействия накачки.

Продemonстрирован сильный и нелинейный рост частоты прецессии с увеличением плотности лазерной накачки, что связано с полным лазерно-индуцированным подавлением ПМА в электроде CoFeB толщиной 1.2 нм, достигнутом при умеренной плотности возбуждения около 1.8 мДж/см² при комнатной температуре (см. вставку на Рис. 5 (а)). Это наблюдается в широком диапазоне внешних магнитных полей (см. Рис. 5 (а)). Установлена связь этого явления со сверхбыстрым обратимым переключением намагниченности тонкого электрода от направления перпендикулярно плоскости структуры к ориентации в плоскости, что открывает возможность управляемого переключения МТП между различными состояниями. Таким образом, воздействие фемтосекундных лазерных импульсов индуцирует спин-переориентационный переход в МТП.

Показано, что постепенное уменьшение ПМА с увеличением плотности возбуждения связано с лазерно-индуцированным нагревом МТП, который влияет на интерфейсную магнитную анизотропию сильнее, чем на анизотропию формы. На Рис. 5 (b) показаны зависимости энергии анизотропии формы, интерфейсной анизотропии и эффективного параметра ПМА от величины намагниченности, полученные из данных по сверхбыстрому размагничиванию и зависимости частоты прецессии от плотности лазерного возбуждения (см. вставку на Рис. 5 (а)). При низкой плотности лазерного возбуждения величины интерфейсной анизотропии и намагниченности насыщения, изменённые лазерным возбуждением, соотносятся согласно степенному закону (1) с $\gamma \approx 2.3$, что характерно для интерфейсной анизотропии, имеющей одноионный и двухионный вклады [18] (см. Рис. 5 (b)). Однако показатель степени значительно увеличивается при умеренных плотностях возбуждения, что позволяет реализовать лазерно-индуцированный спин-переориентационный переход. Предложено объяснение этого явления, заключающееся в зависимости $\gamma = 2.1 + \alpha_T(1 - m^2)$, где $m = M'_S(T, J)/M_S(T = 0, J = 0)$ и α_T — коэффициент температурного расширения [18], таким образом, при значительной величине размагничивания показатель степени γ в законе (1), справедливом и для интерфейсной анизотропии, увеличивается.

В **Пятой главе** рассмотрено лазерно-индуцированное изменение ростовой магнитной анизотропии в 10-мкм плёнке феррита-граната (YBiPrLu)₃(FeGa)₅O₁₂, выращенного на подложке гадолиний-галлиевого граната с ориентацией (210) (см. Рис. 6 (а, b)). Используя методику магнитооптической накачки-зондирования со спектральным разрешением и феноменологический анализ, было установлено, что прецессия намагниченности в этой плёнке является результатом как лазерно-индуцированного изменения ростовой магнитной анизотропии, так и сверхбыстрого обратного эффекта Фарадея.

Было показано, что ориентация внешнего магнитного поля относительно плоскости легкого намагничивания оказывает существенное

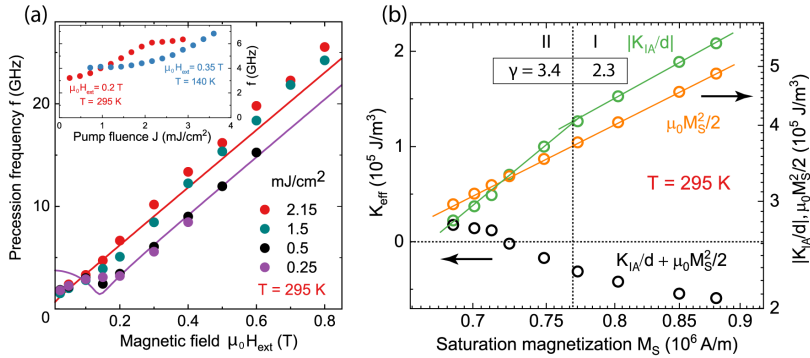


Рис. 5 — (a) Зависимость частоты прецессии намагниченности от величины внешнего поля для различных плотностей накачки, измеренной при $T = 295$ K. На вставке показана частота прецессии намагниченности как функция плотности лазерной накачки J , измеренной при $T = 295$ K (красные символы) и $T = 140$ K (синие символы). (b) Параметр интерфейсной анизотропии (открытые зеленые символы), анизотропии формы (открытые оранжевые символы) и полная (чёрные сплошные символы) энергия перпендикулярной анизотропии как функция намагниченности при $T = 295$ K.

влияние на параметры магнитной прецессии. Продemonстрировано, что относительными вкладами сверхбыстрого обратного эффекта Фарадея и изменения параметров ростовой анизотропии можно управлять величиной и ориентацией внешнего магнитного поля. Проведена оценка величины лазерно-индуцированного изменения параметров ростовой магнитной анизотропии.

Предложен и реализован метод определения относительного изменения различных параметров ростовой анизотропии под действием фемтосекундных лазерных импульсов по начальной фазе прецессии намагниченности в зависимости от направления внешнего магнитного поля. С использованием этого метода продемонстрировано соответствие между начальной фазой магнитной прецессии и компонентой крутящего момента $\mathbf{T}_z$ при $\Delta K_i = 2\Delta K_{yz}$ (см. Рис. 6 (c, d)).

Установлено, что изменение магнитной анизотропии — это результат лазерно-индуцированного нагрева решетки на пикосекундном временном масштабе (см. Рис. 7 (b)). Такой вывод сделан на основе результатов измерений с разной величиной сверхбыстрого лазерно-индуцированного нагрева, что реализовано настройкой энергии фотона в импульсах накачки.

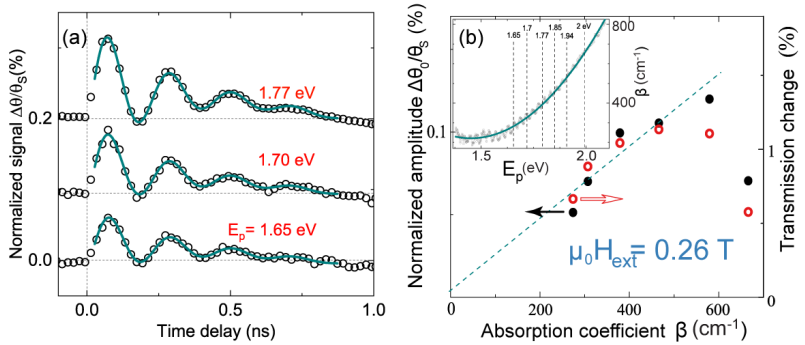


Рис. 6 — (a) Ориентация кристаллографических осей плёнки (210), внешнее магнитное поле $\mathbf{H}_{\text{ext}}$, эффективное поле анизотропии $\mathbf{H}_a$, коллективное эффективное поле $\mathbf{H}_{\text{eff}}$. x, y, z оси направлены вдоль кристаллографических осей [001], [120], и [210] соответственно. Эффективное поле анизотропии $\mathbf{H}_a$ составляет угол $\psi_a = 16^\circ$ с осью z в плоскости (yz) , как показано на вставке. Направление магнитного поля описывается полярным $\psi_H = 80^\circ$ и азимутальными углами φ_H . Направление намагниченности $\mathbf{M}$ описывается полярным ψ_M и азимутальными углами φ_M . В общем случае намагниченность $\mathbf{M}$ не коллинеарна внешнему полю и не лежит в плоскости (yz) . (b) Геометрия эксперимента по методике оптической накачки-зондирования. (c) Начальная фаза ξ_0 (сплошные символы) и амплитуда $\Delta\theta_0/\theta_S$ (открытые символы) лазерно-индуцированной прецессии как функции φ_H , измеренной во внешнем поле $\mu_0 H_{\text{ext}} = 0.26$ Тл. (d) z компонента вращающего момента T_0 , вычисленная как функция φ_H для случая, когда $\Delta K_i = 2\Delta K_{yz}$.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Воздействие фемтосекундным лазерным импульсом на металлические и диэлектрические магнитные пленки с выраженной магнитной анизотропией ростовой, магнитоупругой или интерфейсной природы приводит к обратимому уменьшению соответствующих параметров анизотропии, связанному с нагревом, возникающим на пикосекундном и сохраняющимся на наносекундном временных масштабах.
2. В структуре композитного мультиферроика $\text{CoFeB}/\text{BaTiO}_3$ с доминирующим вкладом магнитоэлектрической природы в анизотропию ферромагнитной металлической пленки CoFeB воздействие фемтосекундного лазерного импульса приводит к уменьшению магнитоупругого параметра B_1 , подчиняющемуся степенному закону с $n(n+1)/2 = 3$, установленному для

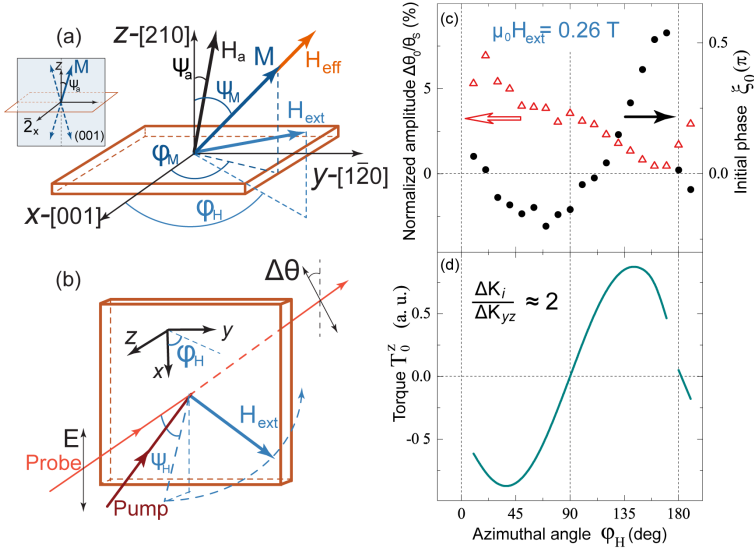


Рис. 7 — (а) Нормализованное вращение плоскости поляризации импульсов зондирования, индуцированное левоциркулярно поляризованными σ^- импульсами накачки с разной энергией фотона E_p , как функция времени задержки Δt во внешнем поле $\mu_0 H_{\text{ext}} = 0.26$ Тл, приложенном вдоль трудной оси (символы). (б) Нормализованная амплитуда магнитной прецессии (сплошные символы) и изменение пропускания импульсов зондирования (открытые символы) как функция коэффициента поглощения β при соответствующей энергии фотона E_p . На вставке показана зависимость коэффициента поглощения от энергии фотона импульсов накачки.

температурных изменений такого типа анизотропии. Лазерно-индуцированное уменьшение магнитоупругого параметра B_1 в отдельном магнитном домене CoFeB с задаваемой подложкой направлением оси анизотропии позволяет локализовано возбуждать прецессию намагниченности и прецессионно её переключать.

- В структуре с туннельным магнитным переходом CoFeB/MgO/CoFeB воздействие фемтосекундных лазерных импульсов приводит к полному подавлению перпендикулярной магнитной анизотропии ферромагнитных электродов CoFeB, включающей конкурирующие вклады интерфейсной анизотропии и анизотропии формы. В электроде с толщиной 1.2 нм это возможно при умеренной плотности энергии возбуждающего импульса $J = 2$ мДж/см² благодаря отклонению изменений параметра интерфейсной анизотропии от степенного закона с $n(n+1)/2 \approx 2.3$, возникающему при сверхбыстром размагничивании, превышающем 20%. Полное

подавление перпендикулярной магнитной анизотропии приводит к спин-переориентационному переходу и может быть использовано для лазерно-индуцированного переключения туннельного магнитного перехода между состояниями с параллельной и ортогональной взаимными ориентациями намагниченностей в электродах.

4. В эпитаксиальной пленке висмут-замещённого феррита-граната на низкосимметричной подложке гадолиний-галлиевого граната, характеризующейся одноосными и орторомбическим вкладами в анизотропию ростовой природы, воздействие фемтосекундных лазерных импульсов приводит к изменению всех параметров ростовой анизотропии в результате сверхбыстрого нагрева и позволяет возбуждать прецессию намагниченности при произвольном направлении внешнего магнитного поля. Начальная фаза прецессии определяется соотношением между изменениями различных параметров, что позволяет установить его из экспериментальных данных, а также создает возможность управлять начальной фазой прецессии в пределах $[-\pi/2; +\pi/2]$, меняя направление внешнего магнитного поля.

Список литературы

1. *Kirilyuk, A.* Ultrafast optical manipulation of magnetic order / A. Kirilyuk, A. V. Kimel, T. Rasing // *Rev. Mod. Phys.* — 2010. — Т. 82, вып. 3. — С. 2731–2784.
2. *Калашникова, А. М.* Сверхбыстрый оптомагнетизм / А. М. Калашникова, А. В. Кимель, Р. В. Писарев // *Усп. физ. наук.* — 2015. — Т. 185, № 10. — С. 1064–1076.
3. Magnetoplasmonics and femtosecond optomagnetism at the nanoscale / D. Bossini, V. Belotelov, A. Zvezdin, A. Kalish, A. Kimel // *Acs Photonics.* — 2016. — Т. 3, № 8. — С. 1385–1400.
4. *Bruck, E.* Handbook of Magnetic Materials / E. Bruck. — Elsevier, 2017.
5. The effect of dynamical compressive and shear strain on magnetic anisotropy in a low symmetry ferromagnetic film / T. L. Linnik, V. N. Kats, J. Jäger, A. S. Salasyuk, D. R. Yakovlev, A. W. Rushforth, A. V. Akimov, A. M. Kalashnikova, M. Bayer, A. V. Scherbakov // *Phys. Scr.* — 2017. — Т. 92, № 5. — С. 054006.
6. Antiferromagnetic opto-spintronics / P. Němec, M. Fiebig, T. Kampfrath, A. V. Kimel // *Nat. Phys.* — 2018. — Т. 14, № 3. — С. 229–241.
7. Ultrafast Spin Dynamics in Ferromagnetic Nickel / E. Beaurepaire, J.-C. Merle, A. Daunois, J.-Y. Bigot // *Phys. Rev. Lett.* — 1996. — Т. 76, вып. 22. — С. 4250–4253.
8. Ultrafast optical modification of exchange interactions in iron oxides / R. V. Mikhaylovskiy, E. Hendry [и др.] // *Nat. comm.* — 2015. — Т. 6, № 8190. — С. 1–9.
9. Transient ferromagnetic-like state mediating ultrafast reversal of antiferromagnetically coupled spins / I. Radu, K. Vahaplar [и др.] // *Nature.* — 2011. — Т. 472, № 7342. — С. 205.
10. Ultrafast nonthermal photo-magnetic recording in a transparent medium / A. Stupakiewicz, K. Szerenos, D. Afanasiev, A. Kirilyuk, A. V. Kimel // *Nature.* — 2017. — Т. 542, № 7639. — С. 71.
11. All-optical magnetic recording with circularly polarized light / C. D. Stanciu, F. Hansteen, A. V. Kimel, A. Kirilyuk, A. Tsukamoto, A. Itoh, T. Rasing // *Phys. Rev. Lett.* — 2007. — Т. 99, № 4. — С. 047601.
12. Ultrafast non-thermal control of magnetization by instantaneous photomagnetic pulses / A. V. Kimel, A. Kirilyuk, P. A. Usachev, R. V. Pisarev, A. M. Balbashov, T. Rasing // *Nature.* — 2005. — Т. 435, № 7042. — С. 655.

13. Femtosecond Photomagnetic Switching of Spins in Ferrimagnetic Garnet Films / F. Hansteen, A. Kimel, A. Kirilyuk, T. Rasing // Phys. Rev. Lett. — 2005. — Т. 95, вып. 4. — С. 047402.
14. *Zvezdin, A. K.* Modern magnetooptics and magneto-optical materials / A. K. Zvezdin, V. A. Kotov. — CRC Press, 1997.
15. All-Optical Probe of Coherent Spin Waves / M. van Kampen, C. Jozsa, J. T. Kohlhepp, P. LeClair, L. Lagae, W. J. M. de Jonge, B. Koopmans // Phys. Rev. Lett. — 2002. — Т. 88, вып. 22. — С. 227201.
16. Ultrafast three-dimensional magnetization precession and magnetic anisotropy of a photoexcited thin film of iron / E. Carbone, E. Mancini, D. Dazzi, C. Dallera, E. Puppini, S. De Silvestri // Phys. Rev. B. — 2010. — Т. 81, вып. 6. — С. 060415.
17. *Callen, E. R.* Anisotropic magnetization / E. R. Callen, H. B. Callen // J. Phys. Chem. Solids. — 1960. — Т. 16, № 3. — С. 310–328.
18. Temperature scaling of two-ion anisotropy in pure and mixed anisotropy systems / R. F. L. Evans, L. Rózsa, S. Jenkins, U. Atxitia // Phys. Rev. B. — 2020. — Т. 102, вып. 2. — С. 020412.

Шелухин Леонид Андреевич

Сверхбыстрое лазерно-индуцированное
подавление магнитной анизотропии
в тонких плёнках металлов и диэлектриков

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 70 экз.

Типография _____