

ИЗУЧЕНИЕ СВЕРХБЫСТРОЙ МАГНИТНОЙ ДИНАМИКИ В МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУРАХ Co/Pt И ПРИМЕРЫ ДРУГИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА УСТАНОВКЕ EUROPEAN XFEL

© 2023 г. Е. Ю. Лобанова^{1,2,*}, С. М. Сугурин², С. Л. Молодцов³, А. Е. Романов^{1,**}

¹Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

³Европейский рентгеновский лазер на свободных электронах, Шенефельд, Германия

*E-mail: elobanova@itmo.ru

**E-mail: alexey.romanov@niuitmo.ru

Поступила в редакцию 24.02.2022 г.

После доработки 12.05.2022 г.

Принята к публикации 12.05.2022 г.

Европейский лазер на свободных электронах (EuXFEL) — ведущий международный научный центр в области исследований структуры и свойств материалов с использованием когерентного рентгеновского излучения с высоким временным и пространственным разрешением. Кратко представлены результаты сотрудничества специалистов Европейского лазера на свободных электронах с учеными Университета ИТМО в 2015–2022 гг. Уникальные возможности установки EuXFEL продемонстрированы на примере исследований сверхбыстрой магнитной динамики учеными Университета ИТМО в 2019 г.

DOI: 10.31857/S0023476123600222, EDN: ZEKOXB

ВВЕДЕНИЕ

Находящийся в Германии в районе Гамбурга Европейский рентгеновский лазер на свободных электронах (EuXFEL, <https://www.xfel.eu/>) является уникальным международным научным центром. Возможность проведения исследований с использованием рентгеновского излучения с яркостью в миллиард раз выше, чем яркость лучших традиционных рентгеновских источников, открывает перед наукой принципиально новые возможности. В сотрудничестве с международным исследовательским сообществом, особенно из стран-акционеров, на установке класса Мега-сайенс EuXFEL проводятся эксперименты мирового уровня для широкого спектра научных приложений: изучение наноструктур, сверхбыстрых процессов и экстремальных состояний материалов, получение трехмерных изображений атомной структуры вирусов и белков и отслеживание химических реакций в реальном времени. Эксплуатация центра осуществляется некоммерческой организацией — European XFEL, которая тесно сотрудничает со своим крупнейшим партнером DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron — “Немецкий электронный синхротрон”) и другими исследовательскими организациями по всему миру.

Координация участия в экспериментах российских ученых и научное руководство со стороны России осуществляются Национальным исследовательским центром “Курчатовский институт”. EuXFEL использует сверхпроводящий линейный ускоритель электронов общей протяженностью 3.4 км и является одним из крупнейших и наиболее амбициозных мировых исследовательских центров, в создании и работе которого участвуют 12 стран: Великобритания, Венгрия, Германия, Дания, Испания, Италия, Польша, Россия, Словакия, Франция, Швейцария и Швеция.

Как установка класса Мегасайенс, EuXFEL определяет развитие многих научных областей, включая биологию, медицину, фармакологию, химию, материаловедение, физику, исследования в области энергетики и окружающей среды, электронику, нанотехнологии, фотонику. В настоящей работе рассмотрены направления исследований, проводимых на EuXFEL.

Российские специалисты имеют широкие возможности для проведения исследований на любой из экспериментальных станций EuXFEL. Подготовка уникальных экспериментов требует тесного взаимодействия с сотрудниками мегаустановки и широкой кооперации. Для этой цели еще до запуска установки EuXFEL в сентябре

2017 г. в Университете ИТМО был создан Транснациональный научно-образовательный центр перспективных методов исследования материалов (**Центр UniFEL**), стратегическими направлениями деятельности которого являются разработка методик, подготовка материалов, организация и проведение исследований на EuXFEL.

Рассмотрим некоторые результаты реализации исследовательского проекта “Изучение сверхбыстрой динамики намагниченности в мультислоях Co/Pt”, успешно выполненного на установке EuXFEL сотрудниками Центра UniFEL в 2019–2020 гг.

ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТА “ИЗУЧЕНИЕ СВЕРХБЫСТРОЙ ДИНАМИКИ НАМАГНИЧЕННОСТИ В МУЛЬТИСЛОЯХ Co/Pt” РОССИЙСКИМИ УЧЕНЫМИ НА УСТАНОВКЕ КЛАССА МЕГАСАЙЕНС EuXFEL

Исследование неравновесной спиновой динамики в упорядоченных магнитных системах является перспективным направлением развития современной науки о магнетизме, позволяющим получать новую информацию о фундаментальных взаимодействиях между спинами, электронами и степенями свободы решетки. В рамках данного направления особый интерес представляет изучение с нанометровым пространственным разрешением неравновесной динамики отклика магнитоупорядоченных материалов на сверхбыстрое оптическое возбуждение [1, 2]. С момента открытия сверхбыстрого отклика спиновой системы на фемтосекундный лазерный импульс [3] достигнут большой прогресс в исследовании оптического управления намагниченностью. В частности, продемонстрирована возможность полностью оптического переключения в ферромагнетиках [4] и простых ферромагнетиках [5]. Было показано, что существуют два типа полностью оптического переключения [6]: полностью оптическое переключение, зависящее от спиральности **HD-AOS** (*helicity-dependent all-optical switching*) [4, 7, 8], где новая магнитная ориентация определяется оптической поляризацией света, и термическое переключение, вызванное лазерным нагревом [9, 10]. Механизмы, лежащие в основе HD-AOS, в настоящее время являются предметом интенсивных дискуссий [6, 11–16] и требуют дальнейшего изучения. Особенно мало информации доступно о сверхбыстрой пространственной эволюции намагниченности. Так, в [17] изучалась оптическая накачка системы доменов, имеющих размер ~100 нм. Было показано, что размагничиванию доменной системы, сопровождающемуся уширением доменных стенок, способствуют сверхдиффузионные латеральные спиновые токи.

Однако в этом эксперименте (проведенном на ультрафиолетовом лазере на свободных электронах (**ЛСЭ**)) не было возможности получить пространственное разрешение менее 100 нм, следовательно, было невозможно изучение динамики нанометровых локальных неоднородностей. Эксперименты по исследованию магнитного отклика в однодоменной ферромагнитной системе на масштабах длин меньше 100 нм впервые провели в [18], где были выявлены динамически изменяющиеся магнитные неоднородности, вызванные процессами нелинейной магнитной локализации и коалесценции. Для наноразмерных ферромагнитных многодоменных систем вопрос о роли локальных неоднородностей в динамике оптического размагничивания и перемагничивания остается открытым.

В данной работе описаны результаты исследования сверхбыстрой магнитной динамики с пространственным разрешением в мультислоях Co/Pt. Эксперимент выполнен в 2019 г. на установке класса Мегасайенс EuXFEL международной группой специалистов под руководством И.И. Пронина (сотрудника ФТИ им. А.Ф. Иоффе и Центра UniFEL Университета ИТМО) на станции SCS European XFEL по проекту 2313 “Сверхбыстрая динамика хирально-зависимого полностью оптического переключения намагниченности в сверхтонких пленках кобальта” (“Ultrafast dynamics of helicity-dependent all-optical magnetization switching in ultrathin cobalt films”).

Схема эксперимента показана на рис. 1а. Фемтосекундные импульсы ИК-лазера с длиной волны 800 нм и частотой 280 кГц использовали для сверхбыстрого возбуждения равновесной спиновой системы. Для получения информации о мгновенном распределении спинов с нанометровым пространственным и пикосекундным временным разрешением в эксперименте регистрировали картины резонансного магнитного малоуглового рентгеновского рассеяния **mSAXS** (magnetic small angle X-ray scattering), вызванного взаимодействием магнитной доменной системы с фемтосекундными импульсами ЛСЭ. Картины рассеяния регистрировали в геометрии пропускания мегапиксельным сверхбыстрым рентгеновским детектором DSSC [19].

Чувствительность к флуктуациям намагниченности достигалась путем настройки энергии рентгеновских фотонов на L-край поглощения кобальта (779 эВ). Образец находился на расстоянии 600 мм от детектора для обеспечения нужного пространственного масштаба картин рассеяния. Частота импульсов ЛСЭ составляла 560 кГц — в 2 раза больше частоты лазера накачки. Таким образом, четные импульсы зондирования давали информацию о невозбужденном состоянии магнитной системы, а нечетные — о возбужденном.

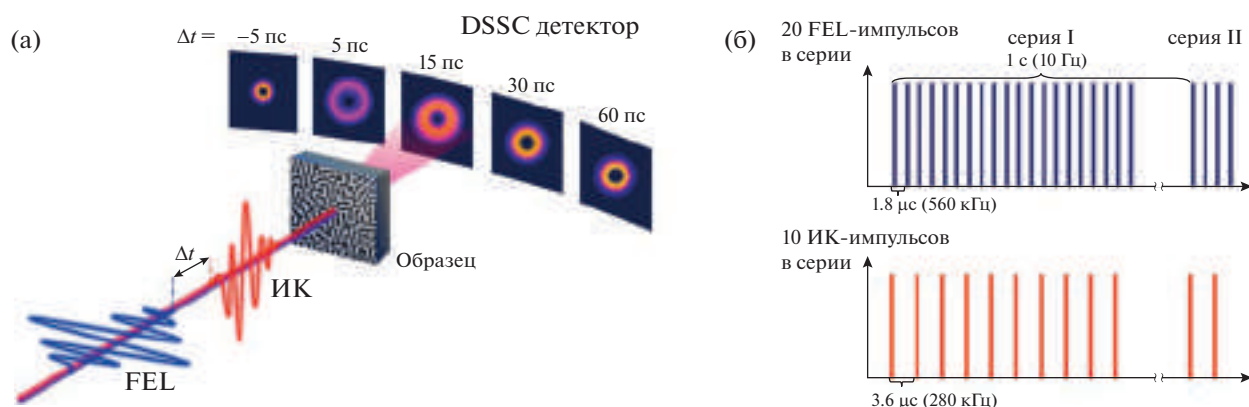


Рис. 1. Схема эксперимента (а) и временная структура импульсов накачки и зондирования (б).

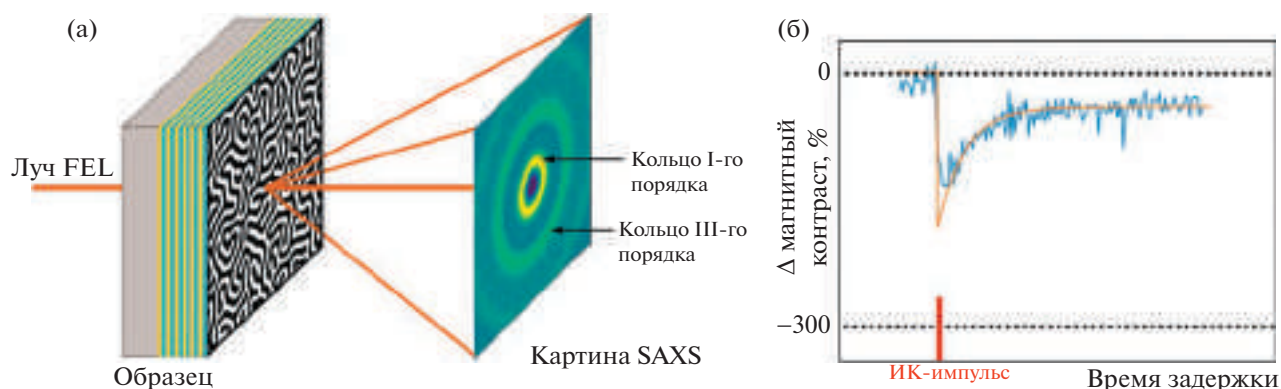


Рис. 2. Схематическое изображение магнитного малоуглового рассеяния от многослойного образца Co/Pt с лабиринтными магнитными доменами (а). Динамическое уменьшение интенсивности третьего порядка рассеяния на пикосекундных временах после ИК-импульса возбуждения (б).

Время задержки между импульсами накачки и зондирования плавно изменялось в диапазоне от -5 до $+60$ пс, чтобы исследовать динамику намагниченности на пикосекундном временном масштабе времени. Временная структура импульсов накачки и зондирования показана на рис. 1б. Для получения картин рассеяния с высоким соотношением сигнал—шум в эксперименте измеряли и усредняли десятки тысяч картин рассеяния.

Основные результаты настоящей работы получены на образце (Co 1.0 нм/Pt 1.2 нм) $\times 6$ (рис. 2а), выращенном методом магнетронного распыления на мембране Si_3N_4 . Перед проведением измерений образец был размагничен в перпендикулярном поле до состояния нулевой намагниченности, в котором в системе формируются хаотически направленные лабиринтные домены.

Картина малоуглового магнитного рассеяния от лабиринтной структуры доменов обычно представляет собой кольца первого и третьего порядков с диаметрами, обратно пропорциональными периоду доменной структуры (рис. 2а). Посколь-

ку в данном эксперименте первый порядок рассеяния был закрыт маской, на статической картине mSAXS наблюдалось лишь кольцо третьего порядка с волновым вектором q ($q \approx 0.1$ нм $^{-1}$), соответствующим периоду доменов ~ 190 нм.

Возбуждение образца ИК-лазерным импульсом вызывает мгновенное (фемтосекундное) уменьшение магнитного рассеяния третьего порядка с последующим более медленным (пикосекундным) восстановлением (рис. 2б). Уменьшение магнитного рассеяния соответствует ослаблению магнитного контраста доменной картины, связанному с уменьшением намагниченности насыщения в доменах и/или размытием границ между доменами. Данный феномен является известным признаком сверхбыстрого оптического размагничивания и наблюдался в [4].

Яркой особенностью настоящего исследования, не наблюдавшейся ранее в многодоменных ферромагнитных системах, является возникновение дополнительного кольца нестационарного магнитного рассеяния. Дополнительное переход-

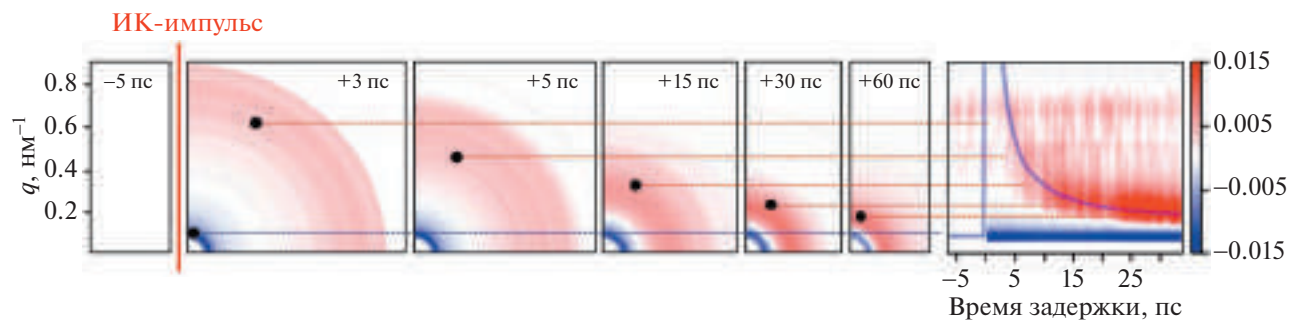


Рис. 3. Картины SAXS образца при его возбуждении ИК-лазером. Фрагменты разностных картин рассеяния, полученных при временах задержки -5 , $+3$, $+5$, $+15$, $+30$, $+60$ пс показаны слева. Справа приведены азимутально проинтегрированные разностные картины SAXS для времен задержки от -5 до 30 пс. Интенсивность показана цветом.

ное кольцо с $q > 0.8 \text{ нм}^{-1}$ (магнитный период больше 8 нм) наблюдалось при плотности накачки более 3.3 МДж/см^2 . Возникая через несколько пикосекунд после ИК-импульса накачки на границе детектора, кольцо быстро уменьшалось в диаметре так, что через 100 пс практически сливалось с рассеянием третьего порядка. Скорость схлопывания кольца рассеяния соответствует скорости увеличения размеров магнитных флуктуаций на уровне нескольких километров в секунду. На рис. 3 приведена серия разностных картин рассеяния, снятых при фиксированных временах задержки от -5 до $+60 \text{ пс}$, а также соответствующая радиальная зависимость интенсивности рассеяния, полученная путем азимутального усреднения картин SAXS. Синие области соответствуют уменьшению интенсивности рассеяния в связи со сверхбыстрым размагничиванием образца, а красные — появлению дополнительного кольца нестационарного рассеяния при больших q . Зависимость положения максимума интенсивности кольца рассеяния от времени была аппроксимирована двойной экспоненциальной функцией. Двойная экспоненциальная кривая (синяя линия) довольно хорошо воспроизводит поведение максимума рассеяния для больших q . Подгонка дает характерные постоянные времени 5.0 ± 0.5 и $58 \pm 4 \text{ пс}$, не зависящие от плотности потока.

Важно отметить, что образец не успевает полностью релаксировать в течение 3.6 мкс между последующими импульсами накачки. Это свидетельствует о квазистатическом увеличении температуры образца от импульса к импульсу на микросекундных временах. Как следствие, максимально яркий нестационарный магнитный сигнал наблюдался после первого импульса накачки. Рассеяние при больших q становилось все меньше при каждой последующей накачке и практически полностью исчезало после нескольких ИК-импульсов. Было показано, что количество ИК-импульсов, необходимых для исчезнове-

ния магнитного сигнала, уменьшается с увеличением плотности энергии ИК-излучения. Полное восстановление исходного магнитного контраста и связанного с ним нестационарного рассеяния происходило во время перерыва в 100 мс между сериями рентгеновских импульсов.

Примечательно, что нестационарное рассеяние, наблюдаемое при больших q , было синхронно с рассеянием третьего порядка от магнитных доменов (наблюдаемого при малых q). Таким образом, можно утверждать, что наблюдаемое в настоящей работе нестационарное рассеяние связано с оптически индуцированными короткопериодными магнитными флуктуациями, искажающими исходный порядок периодической системы стационарных магнитных доменов. Такие флуктуации могут появляться на границе магнитных доменов в связи с взаимным проникновением встречных спиновых токов, возникающих под действием импульса накачки. Турбулентное перемешивание спиновых токов может приводить к возникновению короткопериодных нанометровых магнитных флуктуаций (пузырьков), что в свою очередь приводит к появлению кольца магнитного рассеяния при больших q . По мере релаксации системы мелкие магнитные флуктуации коалесцируют с появлением все более крупных образований, пока система не вернется к изначальной конфигурации с крупными лабиринтными доменами. Описанная модель также хорошо объясняет уменьшение магнитного контраста, связанного с доменами, поскольку короткопериодные флуктуации нарушают четкую периодичность доменной структуры. Дополнительное доказательство магнитной природы наблюдаемого переходного рассеяния было получено в ходе изучения влияния магнитного поля на динамику размагничивания. При приложении сильного насыщающего поля 350 мТл наблюдали исчезновение третьего порядка магнитного рассеяния от доменов (в том числе, его изменения под действием импульсов накачки), а также прак-

тически полное подавление нестационарного рассеяния при больших q . Магнитную природу нестационарного рассеяния также подтверждает тот факт, что оно вовсе не наблюдалось в нерезонансных условиях.

Таким образом, в настоящей работе впервые для многодоменной ферромагнитной системы Co/Pt наблюдалось яркое нестационарное магнитное рассеяние, связанное со сверхбыстрыми явлениями, происходящими при фемтосекундном ИК-возбуждении спиновой системы. Нестационарное рассеяние с переменным вектором q вызвано появлением, коалесценцией и исчезновением короткопериодных нанометровых флуктуаций на границах магнитных доменов. Подтверждена магнитная природа наблюдаемых флуктуаций и показана корреляция между интенсивностью наблюдаемых флуктуаций и магнитным контрастом, присутствующим в исходной невозбужденной спиновой системе.

ОБСУЖДЕНИЕ ПЛАНОВ НА БУДУЩЕЕ

Сверхбыстрая магнитная динамика в ферро- и ферримагнетиках. Проект 2825 “Роль нанометровых магнитных флуктуаций при сверхбыстром оптическом размагничивании ферромагнитных доменных систем” (“The role of nanometer scale magnetic fluctuations in ultrafast optical demagnetization of ferromagnetic domain networks”) под руководством С.М. Сутурина является продолжением работы по изучению сверхбыстрого перемагничивания. Хотя в предыдущих экспериментах было показано, что наблюдаемое нестационарное рассеяние связано с короткодействующими нанометровыми оптически индуцированными магнитными флуктуациями, все еще остается неясным, в какой именно части доменной системы зарождаются эти флуктуации. Из наблюдаемого следует, что появление переходного рассеяния наиболее ярко выражено при оптически индуцированном разрушении основного параметра магнитного порядка, связанного с лабиринтной доменной структурой. Поэтому разумно предположить, что короткодействующие магнитные флуктуации возникают на доменных границах, делая их нечеткими и уменьшая корреляционную длину. Отметим, что подобное переходное рассеяние может быть вызвано и чисто продольной флуктуацией, приводящей к изменению магнитной плотности перпендикулярно границе [20]. Продольные и поперечные магнитные флуктуации нельзя было различить в предыдущих экспериментах из-за изотропного характера лабиринтного доменного рисунка. Поэтому запланированные исследования будут проведены, в том числе, на образцах с параллельными доменами для оценки анизотропии оптически индуцированных магнитных флуктуаций. Исследования будут

проводиться на ферромагнитных мультислоях Co/Pt, а также на ферримагнитных тонких пленках DyCo₃ для сравнения временной и пространственной эволюции оптически индуцированных магнитных флуктуаций в системах с одинаковыми и разными магнитными подрешетками. Изучение сверхбыстрого магнитного отклика в DyCo₃ при оптической накачке и сравнение оптически индуцированных магнитных флуктуаций в ферро- и ферримагнетиках важны для разработки потенциальных приложений спинтроники, а также с точки зрения фундаментальной физики.

Ранние стадии формирования супрамолекулярных сборок. Целью проекта 2883 “Исследование влияния дефектов на рост кристаллов с помощью фемтосекундного рентгеновского рассеяния” (“Femtosecond X-ray scattering study of defect-mediated crystal growth”) под руководством Е.В. Скорб является изучение ранних стадий формирования супрамолекулярных структур. Супрамолекулярные сборки могут рассматриваться как перспективные вещества для адресной доставки лекарств или биологических молекул и других применений [21–23]. Кроме того, выраженная слоистая структура супрамолекулярных самосборок делает эти вещества кандидатами для формирования 2D-ансамблей и функциональных покрытий в случае, если будет получен инструмент, позволяющий направленно подавлять определенные типы взаимодействий при формировании и росте кристаллов [24]. Управление прочностью связи между отдельными молекулами в самосборке открывает перспективы для создания широкого спектра разнообразных функциональных материалов. Проект направлен на изучение факторов, влияющих на состав, молекулярную структуру, кристалличность и форму частиц супрамолекулярных самосборок на ранних стадиях их образования.

Планируется провести эксперимент по широкоугольному рассеянию рентгеновских лучей (WAXS) при энергии 8 кэВ на станции SPB/SFX European XFEL на суспензиях супрамолекулярных самосборок в водных растворах. Для доставки будут использоваться микрофлюидные устройства для смешивания и ввода, предоставленные EuXFEL. В качестве исследуемых систем выбраны предварительно изученные самосборки на основе цианурат меламина и барбитурат меламина, которые демонстрируют ряд уникальных структурно-зависимых свойств.

Основная цель проекта — проследить процесс формирования и роста структур самосборок. На первом этапе будут проведены измерения растворов различной концентрации для сбора референсной информации и определения рабочего диапазона концентраций. На втором этапе будут смешиваться отдельные компоненты, а рост кри-

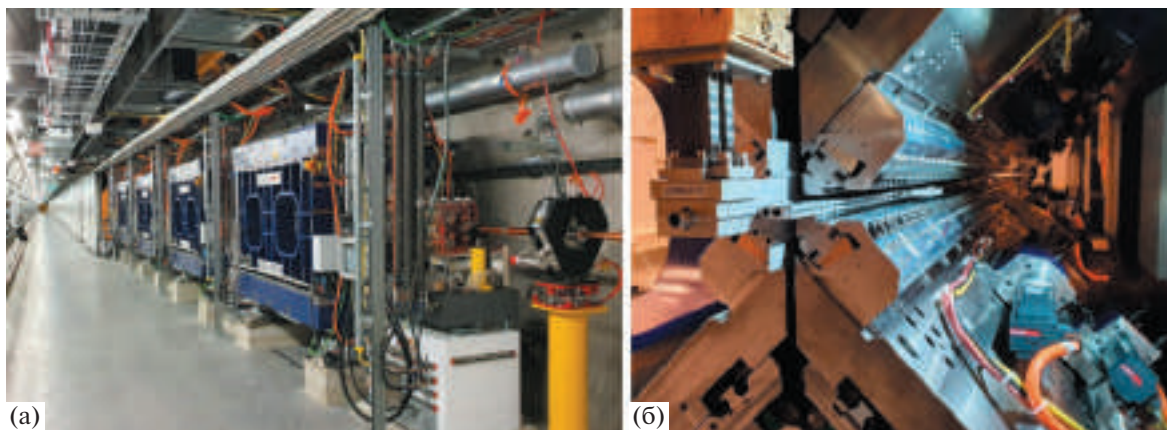


Рис. 4. Фотографии спирального ондулятора, вводимого в эксплуатацию на EuXFEL в 2022 г.: а — общий вид ондулятора, б — отдельная секция ондулятора.

сталлов будет отслеживаться во времени путем изменения расхода подаваемой жидкости и выбора длины каналов, а также будет определяться влияние примесных молекул различной природы на формирование частиц. Это позволит исследовать искомое пространство параметров (состав, температура) и накопить достаточную статистику для усреднения корреляционных функций.

Закрученный свет рентгеновского диапазона. Для исследования наносистем необходима разработка новых взаимодополняющих и взаимоконтролируемых методов диагностики. Одним из перспективных направлений развития диагностических рентгеновских методов является использование так называемых закрученных фотонов [25–27]. Наличие у таких фотонов орбитального углового момента позволяет использовать эту новую, ранее экспериментально недоступную степень свободы при исследовании различных структур. Сотрудниками Университета ИТМО Д.В. Карловцом и А.В. Волоткой совместно со специалистами EuXFEL проводятся теоретические исследования в данном направлении [28, 29].

Важным приложением фотонов с орбитальным моментом являются оптические пинцеты [30], позволяющие не только двигать, но и вращать отдельные микрообъекты, в том числе бактерии и клетки. Аналогичные фотоны рентгеновского диапазона позволят уменьшить на 2–3 порядка размер манипулируемых объектов вплоть до субатомного масштаба.

Как было отмечено, основным устройством, входящим в состав ЛСЭ, является ондулятор. Фотоны, испущенные заряженной частицей в спиральном ондуляторе, являются закрученными на гармониках выше фундаментальной, т.е. обладают ненулевой проекцией орбитального момента импульса на ось распространения [31]. Это позволяет предложить использовать существующие

ЛСЭ, в том числе EuXFEL, в качестве источников закрученных фотонов рентгеновского диапазона. В настоящее время на установке класса Мегасайенс EuXFEL проводятся первые эксперименты со спиральным ондулятором (рис. 4), который позволит приступить к решению задач с помощью закрученного света.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установки класса Мегасайенс — лазеры на свободных электронах, включая Европейскую установку EuXFEL, предоставляют уникальные возможности в исследовании классических (естественных) и рукотворных (искусственных) материалов на качественно новом уровне.

Российские ученые принимают активное участие в постановке и проведении таких исследований на установке класса Мегасайенс EuXFEL, координируемых в масштабах России Национальным исследовательским центром “Курчатовский институт”. В Университете ИТМО за взаимодействие с EuXFEL отвечает Центр UniFEL. Стратегической целью Центра являются организация и проведение поисковых работ, включая разработку методик и подготовку материалов для дальнейших исследований на EuXFEL, а также подготовка квалифицированных научных кадров для работы на установках класса Мегасайенс. Часть результатов, полученных учеными Университета ИТМО на установке EuXFEL, представлена выше.

Университет ИТМО является признанным лидером в России в области информационных технологий, в частности в области разработки новых материалов и устройств для передачи и обработки информации. Планируется, что будущие научные исследования Университета ИТМО на установке класса Мегасайенс EuXFEL будут посвящены фундаментальным и прикладным исследованиям

в области передачи и хранения информации на основе новых материалов и квантовых принципов.

Авторы выражают благодарность Е.А. Викторову за ценные замечания, высказанные им при обсуждении концепции статьи, А.В. Ковалеву и Е.О. Тиходеевой за помощь в подготовке материалов, а также Е.В. Скорб, В.В. Шиловских, М.В. Байдаковой, Д.В. Поторочину, Д.В. Карловцу и А.В. Волотке, принимавшим участие в подготовке и выполнении научных проектов на установке класса Мегасайенс EuXFEL от Университета ИТМО.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 075-15-2021-1349).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Koopmans B., Malinowski G., Dalla Longa F. et al. // Nat. Mater.* 2010. V. 9. P. 259. <https://doi.org/10.1038/nmat2593>
2. *Kirilyuk A., Kimel A.V., Rasing T. // Rep. Prog. Phys.* 2013. V. 76. P. 026501. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/76/2/026501>
3. *Beaurepaire E., Merle J., Daunois A. et al. // Phys. Rev. Lett.* 1996. V. 76. P. 4250. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.76.4250>
4. *Stanciu C.D., Hansteen F., Kimelet A.V. et al. // Phys. Rev. Lett.* 2007. V. 99. P. 047601. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.99.047601>
5. *Zhang Y., Chen S., Cai Y. et al. // Engineering.* 2020. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.06.019>
6. *Lambert C.-H., Mangin S., Varaprasad B.S.D.Ch.S. et al. // Science.* 2014. V. 345. P. 1337. <https://doi.org/10.1126/science.1253493>
7. *John R., Berritta M., Hinzke D. et al. // Sci. Rep.* 2017. V. 7. P. 4114. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04167-w>
8. *Vahaplar K., Kalashnikova A.M., Kimel A.V. et al. // Phys. Rev. Lett.* 2009. V. 103. P. 117201. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.103.117201>
9. *Mangin S., Gottwald M., Lambert C.H. et al. // Nat. Mater.* 2014. V. 13 (3). P. 286. <https://doi.org/10.1038/nmat3864>
10. *Radu I., Vahaplar K., Stamm C. et al. // Nature.* 2011. V. 472 (7342). P. 205. <https://doi.org/10.1038/nature09901>
11. *Ostler T.A., Barker J., Evans R.F.L. et al. // Nat. Commun.* 2012. V. 3 (1). P. 1. <https://doi.org/10.1038/ncomms1666>
12. *Gorchon J., Yang Y., Bokor J. et al. // Phys. Rev. B.* 2016. V. 94. P. 020409. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.94.020409>
13. *Ellis M.O.A., Fullerton E.E., Chantrell R.W. // Sci. Rep.* 2016. V. 6. P. 30522. <https://doi.org/10.1038/srep30522>
14. *Hadri E., Pirro M.S., Lambert P. et al. // Phys. Rev. B.* 2016. V. 94 (6). P. 064412. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.94.064412>
15. *Medapalli R., Afanasiev D., Kim D.K. et al. // Phys. Rev. B.* 2017. V. 96 (22). P. 224421. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.224421>
16. *El Hadri M.S., Hehn M., Mangin S. et al. // J. Phys. D: Appl. Phys.* 2018. V. 51. P. 215054. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aabf2b>
17. *Pfau B., Schaffert S., Müller L. et al. // Nat. Commun.* 2012. V. 3. P. 1100. <https://doi.org/10.1038/ncomms2108>
18. *Iacocca E., Liu T.-M., Reid A.H. et al. // Nat. Commun.* 2019. V. 10. P. 1756. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09577-0>
19. *Porro M., Andricek L., Aschauer S. et al. // IEEE Trans. Nucl. Sci.* 2021. V. 68. P. 1334. <https://doi.org/10.1109/TNS.2021.3076602>
20. *Sant T., Ksenzov D., Skorb E.V. et al. // Sci. Rep.* 2017. V. 7. P. 15064. <https://doi.org/10.1039/c6cp07456a>
21. *Imoro N., Shilovskikh V.V., Nesterov P.V. et al. // ACS Omega.* 2021. V. 6 (27). P. 17267. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c01124>
22. *Shilovskikh V.V., Timralieva A.A., Skorb E.V. et al. // Chem. A Europ. J.* 2020. V. 26 (70). P. 16603. <https://doi.org/10.1002/chem.202002947>
23. *Shilovskikh V., Timraliev A., Skorb E.V. et al. // Appl. Magn. Res.* 2020. <https://doi.org/10.1007/s00723-020-01254-6>
24. *Orekhov N., Kondratyuk N., Skorb E.V. et al. // Cryst. Growth. Des.* 2021. V. 21 (4). P. 1984. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.0c01285>
25. *Mancuso C.A., Hickstein D.D., Grychtol P. et al. // Phys. Rev. A.* 2015. V. 91. P. 031402. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.91.031402>
26. *Milošević D.B., Becker W. // Phys. Rev. A.* 2016. V. 93. P. 063418. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.93.063418>
27. *Mancuso C.A., Hickstein D.D., Dorney K.M. et al. // Phys. Rev. A.* 2016. V. 93. P. 053406. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.93.053406>
28. *Karlovets D.V., Serbo V.G., Surzhykov A. // Phys. Rev. A.* 2021. V. 104 (2). P. 023101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.104.023101>
29. *Volotka A., Samoilenko D., Surzhykov A. et al. // Ann. Phys.* 2022. P. 2100252. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2212.06311>
30. *Polimeno P., Magazzu A., Marago O.M. et al. // J. Quant. Spec. Radiat. Trans.* 2018. V. 218. P. 131. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2018.07.013>
31. *Müller J., Scheer M., Schmid P. // Phys. Rev. Lett.* 2013. V. 111. P. 034801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.034801>