

УДК 54.084

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ СТАНЦИИ ЕВРОПЕЙСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ЛАЗЕРА НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ

Тиходева Е.О. (Университет ИТМО),

Европейский рентгеновский лазер на свободных электронах (Европейский XFEL) — это международная научная установка, позволяющая проводить исследования с беспрецедентным временным (до 15 фс) и пространственным разрешением. В данном обзоре обсуждаются особенности данного класса установок, рассматриваются уникальные характеристики Европейского XFEL и научные задачи, для решения которых были спроектированы его исследовательские станции.

Введение. Уже больше века рентгеновское излучение используется учеными для определения разнообразных свойств окружающего мира. В последние два десятилетия благодаря совместной работе мирового научного сообщества рентгеновские исследования вышли на качественно новый уровень – были спроектированы, построены и введены в эксплуатацию первые рентгеновские лазеры на свободных электронах [англ. X-ray free-electron lasers (XFEL)]. Данные установки могут генерировать сверхинтенсивные, когерентные рентгеновские импульсы фемтосекундной (10^{-15} с) длительности, которые позволяют анализировать структурные особенности вещества на атомарном уровне и в то же время регистрировать процессы, длительность которых меньше характерных времен движения атомов. Таким образом, лазеры на свободных электронах открывают путь к сверхвысокому пространственному и временному разрешению.

Основная часть. В 2017 году в эксплуатацию был введен Европейский рентгеновский лазер на свободных электронах (European x-ray free electron laser) — первый XFEL, в котором для ускорения электронов используется явление сверхпроводимости. Данная технология позволяет увеличить частоту повторения до 27 000 импульсов в секунду и достичь ускорения электронов в 17,5 ГэВ. На начало 2022 года на Европейском XFEL введены в эксплуатацию *шесть исследовательских станций*, каждая из которых специализирована для решения определенных научных задач:

Femtosecond X-ray experiments (FXE) предназначена для исследования динамических процессов (приоритетно, химических и биохимических реакций в растворах или суспензиях) с фемтосекундным временным разрешением. Для анализа релаксации в образце стандартно применяется pump-probe метод – вещество возбуждается «обычным» лазером, а рентгеновские импульсы используются для зондирования системы. Поскольку под воздействием XFEL-излучения образец сильно изменяется, многократное облучение возбужденной структуры зондирующими импульсами может дать некорректный результат. Чтобы характеризовать последовательные этапы релаксации, зачастую проводят серию измерений с разной временной задержкой между импульсом накачки и «измеряющим» рентгеновским импульсом.

На станции *High Energy Density matter (HED)* проводятся исследования материи в экстремальных условиях. Для создания сверхвысоких давлений (>1 Мбар) и температур инструмент оснащен платформой с алмазной наковальней, лазером накачки, имеющим длительные импульсы с высокой частотой повторения, импульсным ИК лазером и мощным (>100 ТВт) фемтосекундным лазером. Импульсные магнитные катушки позволяют создавать сверхсильные электрические и магнитные поля (до 60 Тл). *HED* предназначена для моделирования и исследования вещества, образующегося внутри планет (высокие давления и температуры), нейтронных звезд (сверхвысокие магнитные поля), исследования структурных фазовых переходов и разного вида плазмы.

Materials imaging & dynamics (MID) специализирована на визуализации наноразмерной динамики, например: кавитации пузырьков, сверхбыстрых спиновых переходах и динамике доменных стенок. *MID* позволяет детально исследовать структурные изменения мягких и биологических материалов (коллоидов, вирусов и целых клеток). Уникальное разрешение обеспечивается благодаря высокой когерентности, мощности и малой длительности рентгеновских импульсов.

Совместное использование когерентного рассеяния рентгеновских лучей и спектроскопии позволяет одновременно анализировать электронную и атомную структуру образца, и их динамику на станции *Spectroscopy & coherent scattering (SCS)*. Например, на *SCS* были успешно проведены эксперименты, посвященные исследованию сверхбыстрых процессов намагничивания и наблюдению в реальном времени химических реакций в жидкостях.

Single Particles, Clusters, and Biomolecules (SPB) предназначена для тонкого анализа структуры нанообъектов и позволяет проводить эксперименты в разнообразном окружении: в вакууме, инертном газе (He), образец может подаваться в растворе, в котором он был синтезирован или очищен. На *SPB* использование сверхкоротких, сверхинтенсивных и высококогерентных импульсов XFEL позволяет получать четкие дифракционные картины от сложных структур (например, некристаллических биологических объектов) прежде, чем образец успеет разрушиться.

Small Quantum Systems (SQS) – это многофункциональная лаборатория, состоящая из 3 различных «подстанций». Она применяется для исследования изолированных частиц в газовой фазе, таких как атомы, молекулы, кластеры, биомолекулы и наночастицы. Важной задачей *SQS* является изучение процессов, связанных с ионизацией, например, кулоновского взрыва.

Выводы. Использование сверхкоротких, интенсивных и высококогерентных импульсов Европейского XFEL позволяет на атомарном уровне анализировать процессы, протекающие за десятки фемтосекунд, и исследовать объекты (например, некристаллические биологические системы), которые ранее не удавалось детально изучить, вследствие нестабильности и сложности их структуры. Высокое временное разрешение также незаменимо при характеристике вещества, находящегося в экстремальном состоянии, долго поддерживать которое крайне трудно.