

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

# Исследование структурной динамики веществ методами сверхбыстрой электронной дифракции и микроскопии

(к 50-летию Института спектроскопии РАН)

С.А. Асеев, Е.А. Рябов

*Структурная динамика вещества, индуцированная мощными, чаще всего фемтосекундными, лазерными импульсами, проявляется в атомно-молекулярном "кино", наблюдение которого представляет огромный интерес для современного естествознания. Для решения такой глобальной задачи необходимо обеспечить сверхвысокое пространственно-временное разрешение, что требует разработки специальных методов исследования. С помощью лазерной спектроскопии можно определить энергетические состояния образца и проследить эволюцию этих состояний во времени, однако извлечение структурной динамики вещества из этой информации в общем случае достигается косвенными, непрямыми методами. В статье продемонстрированы прямые подходы к исследованию лазерно-возмущённой материи в пространственно-временном континууме, основанные на зондировании вещества ультракороткими электронными и рентгеновскими импульсами, а также описана первая серия экспериментов, выполненных на фемтосекундном электронографе и пикосекундном просвечивающем электронном микроскопе в Институте спектроскопии РАН (Троицк, Москва).*

**Ключевые слова:** структурная динамика, электронография и электронная микроскопия с временным разрешением, фемтосекундное лазерное излучение, когерентные оптические фононы

PACS numbers: 07.78.+s, 61.05.J-, 64.70.D-,  
64.70.K-, 68.37.Og

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.06.038393>

## Содержание

1. Введение (306).
2. Фемтосекундный электронограф (307).
3. Сверхбыстрый просвечивающий электронный микроскоп (308).
4. Заключение (310).

Список литературы (310).

## 1. Введение

Изучение структурной динамики вещества открывает новые возможности как для фундаментальной науки (физики, химии, биологии), так и в плане развития многочисленных приложений. Использование чисто оптических методов, основанных на применении ультракороткого лазерного излучения, не позволяет напрямую регистрировать малые атомно-молекулярные перемещения, что обусловлено масштабом длины волны оптического спектрального диапазона. Для зондирования лазерно-индукционных процессов с высокой пространственно-временной детализацией необходимо использовать ультракороткие рентгеновские либо электронные сгустки, синхронизованные во времени с мощными оптическими импульсами, облучающими исследуемое вещество [1–6].

С.А. Асеев, Е.А. Рябов. Институт спектроскопии РАН,  
ул. Физическая 5, 108840 Троицк, Москва, Российской Федерации  
E-mail: [isanfemto@yandex.ru](mailto:isanfemto@yandex.ru), [ryabov@isan.troitsk.ru](mailto:ryabov@isan.troitsk.ru)

Статья поступила 16 июля 2018 г.

В пионерском эксперименте [7], выполненном в Москве в 1980-х годах советскими учёными на газофазном электронографе, удалось совместить высокое временное разрешение импульсного лазера с субатомным пространственным разрешением, обеспечиваемым методом зондирования вещества электронным пучком<sup>1</sup>. Успехи в развитии пико(фемто)секундной лазерной техники, а также в формировании плотных ультракоротких электронных импульсов предопределили дальнейший прорыв в области сверхбыстрой электронной дифракции (UED) [1–6]. В начале XXI в. американскими исследователями в Калтехе (Caltech) выполнен первый цикл экспериментов на просвечивающем электронном микроскопе<sup>2</sup>, реконструированном под исследования структурной динамики веществ на временному масштабу

<sup>1</sup> Здесь можно привести высказывание известного учёного Д. Миллера (R.J.D. Miller): "...The first use of electrons for time resolved structural studies of short lived gas phase intermediates was the work of Ischenko et al. — *Appl. Phys. B* **32** 161 (1983)". Цитата взята из его лекции "Making the Molecular Movie: Quest for the Structure-Function Correlation of Biology". В связи с трудностями финансирования отечественной науки в 1990-х годах эти исследования были продолжены в США [8].

<sup>2</sup> В истории развития микроскопии [9] отчётливо прослеживается тенденция повышения разрешающей способности: так, если в середине XX в. электронный микроскоп по своему разрешению фактически соответствовал лучшим оптическим микроскопам, то на рубеже XX и XXI веков в электронной микроскопии за счёт корректирующей aberrации электронной оптики достигнуто уже субангстремное пространственное разрешение [9, 10]. С появлением UED/UEM электронная микроскопия получила новый импульс своего развития [1–6].

табе от наносекунд до пикосекунд с перспективой освоения фемтосекундной временной шкалы, что означено – рождение сверхбыстрой электронной микроскопии (UED) [1]<sup>3</sup>.

В отличие от чисто оптических подходов к исследованию лазерно-возмущённой материи, методы, основанные на использовании электронных сгустков или импульсного рентгеновского излучения, позволяют получить прямую информацию о структурной динамике образца непосредственно из зависящей от времени дифракционной картины. Это обеспечивает возможность наблюдения когерентной динамики атомов в пределах элементарной ячейки при воздействии на вещество мощным импульсным лазерным излучением. Важным преимуществом UED являются компактные размеры настольной установки, что делает такой метод более доступным по сравнению с использованием синхротронов и лазеров на свободных электронах. С другой стороны, зондирование электронами твёрдого тела в режиме пропускания возможно лишь для тонких высококачественных образцов толщиной не более чем несколько десятков–сотен нанометров, что накладывает особые требования на подготовку материалов для исследования<sup>4</sup>. Рассмотрим несколько характерных примеров, иллюстрирующих возможности этих методов применительно к конденсированным средам.

Наблюдение лазерно-индущированного молекулярного движения в модифицированном протеине миоглобина методом времязарешённой рентгеновской дифракции открыло новую веху в исследовании структурной динамики сложных систем [21]. В этом эксперименте на каждом временному шаге эволюции лазерно-возмущённого белка обрабатывалось несколько тысяч рефлексов, зарегистрированных при зондировании образца импульсным коротковолновым излучением синхротрона в Гренобле. Полученная информация позволила с высоким пространственным ( $\approx 1,8 \text{ \AA}$ ) и временным ( $\approx 100 \text{ ps}$ )

<sup>3</sup> Здесь уместно напомнить о большом вкладе в развитие стробоскопического метода применительно к электронной микроскопии, сделанном в XX в. в СССР (работы Спивака и его коллег [11] и в Германии [12]).

<sup>4</sup> Детальное сравнение двух подходов к исследованию структурной динамики представлено в работе [13]. Здесь можно отметить, что сечение упругого рассеяния быстрых электронов (энергия электрона 100 кэВ) в  $\sim 10^5$  раз превышает сечение рассеяния коротковолнового электромагнитного излучения (энергия фотона 10 кэВ), а зондирование вещества нерелятивистским электронным пучком оказывается менее разрушительным для образца [14]. Однако для UED в силу кулоновского расталкивания довольно проблематично обеспечить сверхвысокое временнное разрешение, определяемое в основном длительностью электронных импульсов  $\tau_e$ , и преодолеть 100-фс барьер [15, 16]. В связи с этим довольно показательно, что на прошедшем 11–16 марта 2018 г. заседании Немецкого физического общества в Берлине представленные экспериментальные работы в области UED/UEM характеризовались пикосекундным–субпикосекундным либо субфемтосекундным временным разрешением. Заметим, что пока эксперименты в области генерации аттосекундных электронных импульсов для UED/UEM носят лишь демонстрационный характер [17]. На этом мероприятии фактически отсутствовали доклады, в которых сообщалось о фемтосекундном временному разрешении в диапазоне от нескольких до 100 фс, что обусловлено проблемой сжатия плотных электронных сгустков. Сейчас для компрессии фотоэлектронных импульсов активно развивается ряд перспективных методов [18], в частности, подходы, использующие ячейку с радиочастотным сжатием [19] и электростатическое зеркало на основе рефлектрона [20].

6\*

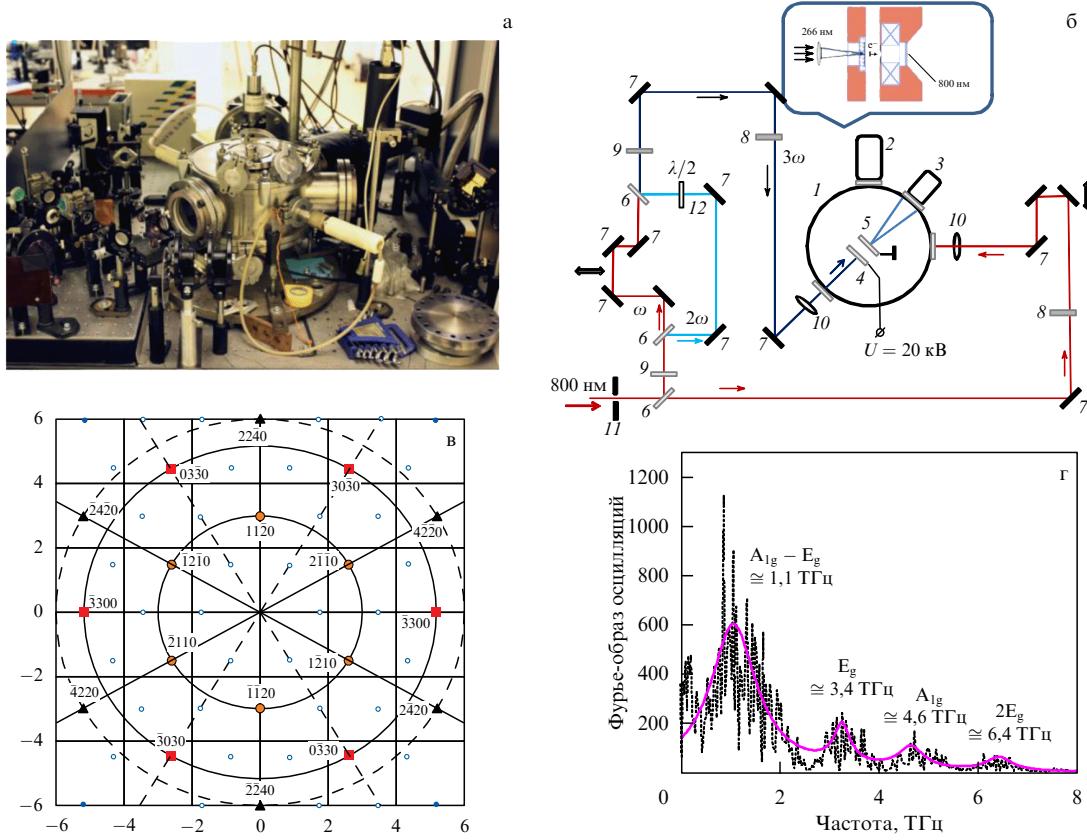
разрешением восстановить карту перемещений лиганда CO в протеине.

Для исследования структурной динамики методом сверхбыстрой электронной дифракции требуется более простой инструментарий. Так, в работе [22] наблюдение лазерно-индущированного сверхбыстрого фазового перехода изолятор–проводник в органическом соединении (EDO-TTF)<sub>2</sub>PF<sub>6</sub> выполнено с помощью настольного фемтосекундного электронографа, позволившего проследить молекулярное движение в пространственно-временном континууме. На временной шкале  $\sim 10 \text{ ps}$  обнаружено существование нового метастабильного состояния. Эта же методология была использована для исследования нетеплового плавления в висмуте, вызванного воздействием мощного фемтосекундного лазерного излучения на полуметалл [23]. С помощью UED показано, что при плотности энергии около 20 мДж см<sup>-2</sup> в лазерном импульсе с длиной волны 387 нм (вторая гармоника фемтосекундного Ti:Sa-лазера), облучающем кристалл Bi, переход из твёрдого в жидкое состояние происходил за рекордные 200 фс.

Таким образом, методика UED/UEM открывает совершенно новые возможности изучения материи. Для этих целей в Институте спектроскопии РАН разработаны экспериментальные подходы, нацеленные на исследование лазерно-индущированной структурной динамики в веществе с помощью пико(фемто)секундных электронных пучков, жёстко синхронизованных с возбуждающим образец фемтосекундным лазерным излучением, и позволяющие проследить состояние исследуемого вещества в пространственно-временном континууме. На созданном фемтосекундном электронографе и реконструированном сверхбыстро просвечивающем электронном микроскопе выполнена первая серия экспериментов.

## 2. Фемтосекундный электронограф

Схема собранной компактной установки (рис. 1а), реализующей метод UED, приведена на рис. 1б [24, 25]. Метод основан на известном в сверхбыстрой лазерной спектроскопии принципе "pump-probe", когда первый импульс осуществляет возбуждение образца, а второй, посылаемый с регулируемой задержкой, осуществляет его зондирование. Только здесь в качестве накачки использована основная частота фемтосекундного Ti:Sa-лазера (длина волны  $\lambda_1 \approx 800 \text{ nm}$ , длительность лазерного импульса  $\approx 50 \text{ fs}$ , частота повторения лазерных импульсов  $f_{\text{laser}} = 1 \text{ kHz}$ ), а в качестве зондирующего пучка — фотоэлектронные сгустки, получаемые за счёт фотоэффекта при облучении фотокатода (30-нм слоя серебра на кварцевой пластине) третьей гармоникой от того же Ti:Sa-лазера (длина волны  $\lambda_2 \approx 266 \text{ nm}$ ). Это обеспечило прецизионную синхронизацию оптического и фотоэлектронного импульсов для исследования когерентных фононов в плёнке сурьмы толщиной около 30 нм на углеродной подложке, применяемой в просвечивающей электронной микроскопии. Для возбуждения фононов образец облучался под углом 45° слабосфокусированным линейно-поляризованным лазерным излучением с плотностью энергии в импульсе около 1,5 мДж см<sup>-2</sup> ( $\approx 1 \text{ eV} \text{ \AA}^{-2}$ ). Импульсный фотоэлектронный пучок с энергией 20 кэВ и диаметром 100 мкм в зоне образца формировался линзой на основе постоянного магнита,



**Рис. 1.** Фотография (а) и схема (б) фемтосекундного электронографа: 1 — вакуумная камера, 2 — турбомолекулярный насос, 3 — усилитель электронного тока на основе микроканальных пластин и ПЗС-камеры, 4 — серебряный фотокатод, 5 — анод + мишень, 6 — делители пучка, 7 — зеркала, 8 — ослабитель излучения, 9 — преобразователи во 2-ю и 3-ю гармоники, 10 — линзы, 11 — диафрагма, 12 — вращатель поляризации лазерного пучка (на вставке показаны основные элементы: фотокатод, анод, магнитная линза и образец). (в) Электронограмма образца сурьмы. (г) Фурье-спектр лазерно-индущированных осцилляций дифракционного сигнала в пленке Sb: штриховая линия — эксперимент, сплошная линия — аппроксимация экспериментальных данных функциями Лоренца.

что позволило достичь предельно малого времязадержки промежутка от катода до образца, равного 12 мкм, и соответственно минимизировать расплывание электронных импульсов. Дифрагированные образцом электроны регистрировались 2D детектором на основе сдвоенных микроканальных пластин, люминофора и CCD-камеры (CCD — Charge Coupled Device, прибор с зарядовой связью).

На рисунке 1в приведена дифрактограмма тонкой пленки сурьмы, полученная с помощью импульсного фотоэлектронного пучка в отсутствие оптического возбуждения. Наличие ярких рефлексов однозначно свидетельствует о кристаллической природе исследуемого образца. Изменения интенсивности дифракционной картины в различных её частях, обусловленные оптическим возбуждением образца, регистрировались при разных задержках (шаг 60 фс, время накопления сигнала 1 с) между возбуждающим оптическим и зондирующими фотоэлектронным импульсом.

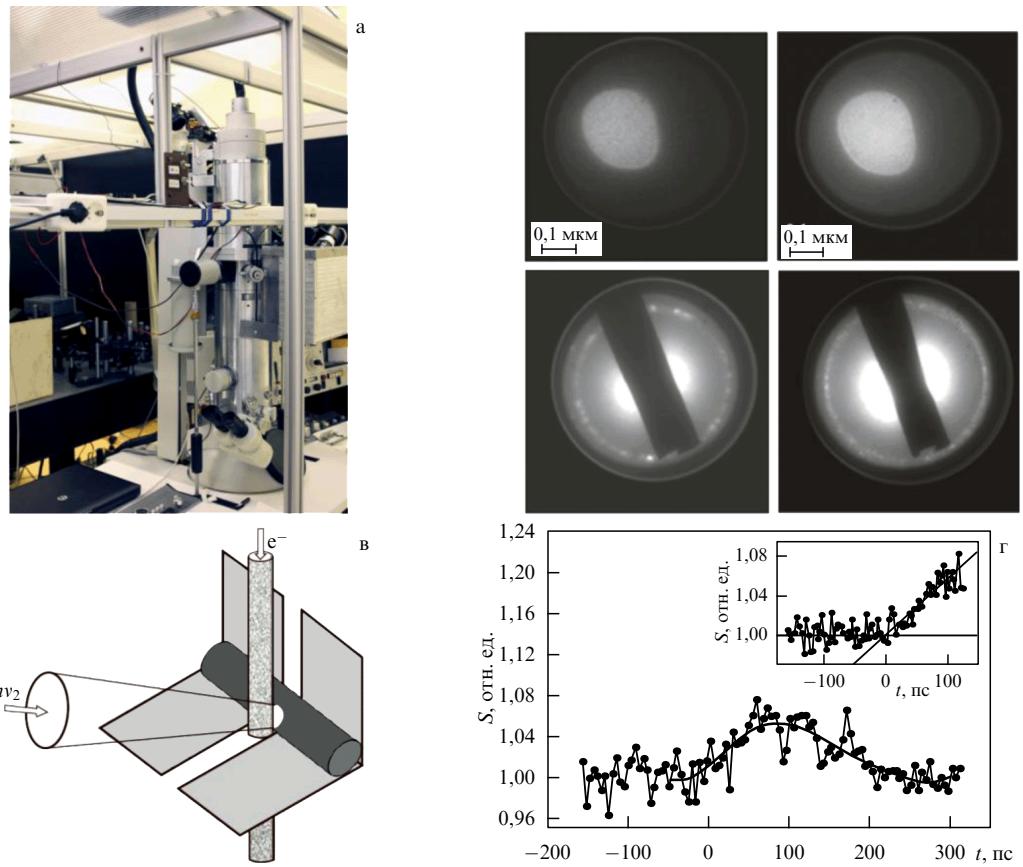
Измеренные значения интенсивности в разных областях дифракционной картины нормировались на величину сигнала в соответствующей области электронограммы в отсутствие оптического возбуждения. Зарегистрированная динамика характеризовалась явно выраженной осциллирующей компонентой с периодом порядка пикосекунды. Из фурье-анализа когерентных осцилляций (рис. 1г) следует, что наблюдаемая модуляция

сигнала обусловлена присутствием четырёх мод с частотами 1,1, 3,4, 4,6 и 6,4 ТГц, три из которых наблюдались ранее в чисто оптических экспериментах [26, 27]. Следуя этим работам, можно связать частоты 4,5 и 3,5 ТГц с полносимметричным  $A_{1g}$  и дважды вырожденным  $E_g$  оптическими фононами сурьмы, а 1,1 ТГц — с разностным оптическим колебанием  $A_{1g} - E_g$ . Частота 6,4 ТГц, отвечающая второй гармонике  $E_g$ , ранее не наблюдалась для Sb. Выполненные исследования и сопутствующий теоретический анализ свидетельствуют о том, что на созданном компактном электронографе достигнуто временнное разрешение  $\tau_e \approx 300$  фс [24, 25].

Таким образом, в нашем эксперименте впервые осуществлено прямое наблюдение генерации когерентных оптических фононов в сурьме методом UED [24, 25]. Эти исследования были продолжены немецкими коллегами [28, 29]: так, в работе [29] проиллюстрирован механизм возбуждения сформированных оптических колебаний решётки в Sb мощными лазерными импульсами (1–2 мДж см<sup>-2</sup>) фемтосекундной длительности.

### 3. Сверхбыстрый просвечивающий электронный микроскоп

В отличие от электронографа, технически более сложный электронный микроскоп открывает возможность исследования структурной динамики методами UED и



**Рис. 2.** (а) Фотография пикосекундного просвечивающего электронного микроскопа. (б) Изображения отверстия в углеродной плёнке и дифракционные картины от Al-микро частиц на углеродной подложке, полученные в фотоэмиссионном (левая панель) и термоэмиссионном (правая панель) режиме работы прибора. (в) Конструкция образца, использованного для сведения электронных и оптических импульсов, а также нахождения нулевой точки отсчёта  $t = 0$ . (г) Зависимость электронного сигнала  $S$  от задержки  $t$  между оптическим и электронным импульсом (на вставке приведена зависимость  $S(t)$  на начальной стадии эволюции): аппроксимация экспериментальных данных дана сплошной линией.

UEM<sup>5</sup>. Для реконструкции просвечивающего электронного микроскопа Hitachi H-300 (рис. 2а), изначально рассчитанного на работу с непрерывным электронным пучком с энергией до 75 кэВ и обеспечивающего пространственное разрешение 5,4 Å в режиме микроскопии, необходимо было решить ряд важных задач. Прежде всего, это подвод лазерного излучения внутрь микроскопа, что в значительной степени затруднено конструкцией промышленного прибора. Также в условиях ограниченного свободного пространства необходимо обеспечить контроль пространственно-временного совмещения фотоэлектронных и лазерных импульсов на поверхности образца в вакууме и найти так называемую нулевую точку отсчёта, т.е. решить "t = 0 problem"<sup>6</sup>. В

связи с этим отметим, что ультракороткие оптические/электронные импульсы, с одной стороны, обеспечивают высокое временное разрешение, но с другой — создают трудности при нахождении нулевой точки отсчёта, особенно при отсутствии прямого визуального доступа к образцу.

В рамках реконструкции прибора осуществлено успешное решение вышеперечисленных задач, включая замену фотографической регистрации электронов на позиционно-чувствительный детектор на основе люминофора и CCD-камеры [31]. На рисунке 2б представлены изображения и дифрактограммы, полученные в фотоэмиссионном и термоэмиссионном режимах работы. Для активации фотокатода использовалось ультрафиолетовое (УФ) излучение 2-й гармоники фемтосекундного лазера серии Mai Tai с  $f_{\text{laser}} = 80$  МГц. Отметим, что экспериментальные данные, за исключением уровня сигнала, оказались фактически идентичными, что послужило подтверждением работоспособности реконструированного микроскопа. Из численного анализа распространения фотоэлектронного пучка в колонне прибора следовало, что при числе электронов в сгустке  $\approx 300$  длительность электронного импульса в районе образца была  $\tau_e \approx 7$  пс; это позволило проводить измерения с пикосекундным временным разрешением [31].

<sup>5</sup> В 2018 г. молодому немецкому профессору С. Шаферу (Sascha Schäfer), ученику нобелевского лауреата по химии А. Зевайла, была присуждена премия имени Вальтера Шоттки (Walter Schottky Prize) за цикл исследований, выполненных на сверхбыстро просвечивающим электронным микроскопе с фотокатодом в форме остирия. Важным достоинством такого подхода является возможность достижения сверхвысокой поперечной пространственной когерентности, правда, при довольно малом числе фотоэлектронов в каждом сгустке; поэтому для накопления сигнала требуется использование лазерного источника с высокой частотой повторения импульсов, например, фемтосекундного волоконного лазера.

<sup>6</sup> "t = 0 problem" — калька с текста работы [30].

Методом "pump-probe" осуществлена визуализация сверхбыстрого взаимодействия 75-кэВ фотоэлектронного пучка с плотным ансамблем медленных электронов. В качестве источника медленных электронов использован медный цилиндр диаметром 0,5 мм и длиной 3 мм, закреплённый на пересечении двух ортогональных медных пластин с прорезями шириной 0,1 мм (рис. 2в). Излучение волоконного лазера ((ANTAUS, ООО Авеста-Проект, г. Троицк, Москва)  $f_{\text{laser}} = 250 \text{ Гц} - 500 \text{ кГц}$ ) на длине волны 1050 нм с энергией в импульсе до  $\sim 1,6 \text{ мкДж}$  и длительностью импульса  $\sim 300 \text{ фс}$  преобразовывалось во 2-ю и 4-ю гармоники. После их разделения УФ-излучение активировало Ag-фотокатод, а 2-я гармоника облучала образец. При изменении задержки между 2-й и 4-й гармониками была зарегистрирована динамика пролёта 75-кэВ электронного пучка сквозь электронное облако, формирующуюся в результате фотоэффекта под действием мощных ( $\sim 5 \text{ мДж см}^{-2}$ ) лазерных импульсов (рис. 2г).

В рамках анализа экспериментальных данных ширину контура сигнала целесообразно связать с характерным временем пролёта медленными электронами области взаимодействия с 75-кэВ фотоэлектронным пучком. Найденная из этих соображений величина  $\approx 39 \text{ мкм}$  близка к измеренному диаметру 75-кэВ пучка электронов [31]. С другой стороны, согласно популярному подходу в UED нулевая точка отсчёта ( $t = 0$ ) определяется пересечением двух прямых, одна из которых соответствует плато, а другая — фронту изменения сигнала, полученного при импульсном воздействии на электроны [32]. Найденное таким образом положение " $t = 0$ " размыто на величину  $\Delta t_0 \approx 10,5 \text{ пс}$ , что оказалось близким к численной оценке  $\tau_e$  [31].

Таким образом, при реконструкции прибора Hitachi H-300 достигнуто временнóе разрешение  $\approx 7 \text{ пс}$ . В сочетании с высоким пространственным разрешением электронной микроскопии это открывает возможности исследования лазерно-стимулированной структурной динамики в сложных органических системах методами UED/UEM.

#### 4. Заключение

Интенсивно развивающиеся методы сверхбыстрой электронной дифракции и микроскопии позволяют следить за атомно-молекулярными перемещениями на их естественных пространственно-временных масштабах. Для реализации этих методов в Институте спектроскопии РАН созданы экспериментальные установки, в которых зондирование лазерно-индущированных быстропротекающих процессов в веществе осуществляется с помощью ультракоротких электронных пучков. На созданном оборудовании проведена первая серия экспериментов и впервые в мире выполнены исследования когерентных оптических фононов в сурье методом UED. Успешно реконструирован сверхбыстрый просвечивающий электронный микроскоп на базе Hitachi H-300 и достигнуто  $\approx 7\text{-пс}$  временнóе разрешение. Использование такого прибора представляет интерес для исследования структурной динамики в белках и других сложных органических соединениях. В рамках развития сверхбыстрой электронной дифракции создана молекулярно-кластерная установка, объединённая с импульсным электронным источником и высокочувствительной 2D

системой регистрации дифрагированного пучка для проведения исследований в молекулярно-кластерных струях, включая лазерно-индущированные внутрикластерные реакции, миграцию энергии и структурно-фазовые переходы.

Авторы выражают искреннюю признательность своим коллегам: С.В. Андрееву, В.Н. Баграташвили, Н.С. Воробьёву, А.А. Ищенко, В.О. Компанцу, И.В. Кочикову, А.Л. Малиновскому, Б.Н. Миронову, О.В. Мишочки, Д.Г. Пойдашеву, А.А. Тимофееву, С.В. Чекалину, Е.В. Шашкову, вместе с которыми были получены представленные выше результаты.

Исследования проведены при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ № 16-02-00139 и 16-29-11679 офи\_м. Эксперименты выполнены на уникальной научной установке (УНУ) "Многоцелевой фемтосекундный лазерно-диагностический спектрометрический комплекс" Института спектроскопии РАН.

#### Список литературы

1. Zewail A H, Thomas J M *4D Electron Microscopy. Imaging in Space and Time* (London: Imperial College Press, 2010)
2. Ищенко А А, Гиричев Г В, Тарасов Ю И *Дифракция электронов. Структура и динамика свободных молекул и конденсированного состояния вещества* (М.: Физматлит, 2013)
3. Ischenko A A, Aseyev S A *Time-Resolved Electron Diffraction. For Chemistry, Biology and Materials Science (Advances in Imaging and Electron Physics, Vol. 184)* (San Diego: Academic Press, 2014)
4. Ищенко А А и др. УФН **184** 681 (2014); Ishchenko A A et al. *Phys. Usp.* **57** 633 (2014)
5. Miller R J D *Annu. Rev. Phys. Chem.* **65** 583 (2014)
6. Ischenko A A, Weber P M, Miller R J D *Chem. Rev.* **117** 11066 (2017)
7. Ischenko A A et al. *Appl. Phys. B* **32** 161 (1983)
8. Ischenko A A et al. *J. Mol. Struct.* **300** 115 (1993)
9. Muller D A *Nature Mater.* **8** 263 (2009)
10. Uhlemann S et al. *Phys. Rev. Lett.* **111** 046101 (2013)
11. Спивак Г В, Сапарин Г В, Быков М В УФН **99** 635 (1969); Spivak G V, Saparin G V, Bykov M V Sov. *Phys. Usp.* **12** 756 (1970)
12. Dömer H, Bostanjoglo O *Rev. Sci. Instrum.* **74** 4369 (2003)
13. Chergui M, Zewail A H *Chemphyschem* **10** 28 (2009)
14. Spence J C H *Struct. Dynamics* **4** 044027 (2017)
15. van Oudheusden T et al. *Phys. Rev. Lett.* **105** 264801 (2010)
16. van Oudheusden T et al., in *Ultrafast Phenomena XVI* (Springer Series in Chemical Physics, Volume 92, Eds P Corkum et al.) (Berlin: Springer-Verlag, 2009) p. 938
17. Hassan M Th J. *Phys. B* **51** 032005 (2018)
18. Щелев М Я УФН **182** 649 (2012); Shchelëv M Ya *Phys. Usp.* **55** 607 (2012)
19. van Rens J F M et al. *Ultramicroscopy* **184** 77 (2018)
20. Mankos M, Shadman K, Siwick B J *Ultramicroscopy* **183** 77 (2017)
21. Schotte F et al. *Science* **300** 1944 (2003)
22. Gao M et al. *Nature* **496** 343 (2013)
23. Sciaiani G et al. *Nature* **458** 56 (2009)
24. Миронов Б Н и др. *Письма в ЖЭТФ* **103** 597 (2016); Mironov B N et al. *JETP Lett.* **103** 531 (2016)
25. Миронов Б Н и др. *ЖЭТФ* **151** 494 (2017); Mironov B N et al. *JETP* **124** 422 (2017)
26. Ishioka K, Kitajima M, Misochko O V *J. Appl. Phys.* **103** 123505 (2008)
27. Chekalin S V, Melnikov A A, Misochko O V *Laser Phys.* **24** 094004 (2014)
28. Waldecker L et al. *Phys. Rev. B* **95** 054302 (2017)
29. Bauerhenne B, Zijlstra E S, Garcia M E *Appl. Phys. A* **123** 608 (2017)

30. Hebeisen C T et al. *Opt. Express* **16** 3334 (2008)  
31. Андреев С В и др. *Квантовая электроника* **47** 116 (2017);  
Andreev S V et al. *Quantum Electron.* **47** 116 (2017)  
32. Badali D S, Gengler R Y N, Miller R J D *Struct. Dynamics* **3** 034302  
(2016)

## Investigation of structural dynamics of substances using ultrafast electron diffraction and microscopy

S.A. Aseyev, E.A. Ryabov

Institute of Spectroscopy, Russian Academy of Sciences,  
ul. Fizicheskaya 5, 108840 Troitsk, Moscow, Russian Federation  
E-mail: isanfemto@yandex.ru, ryabov@isan.troitsk.ru

The structural dynamics of matter induced by powerful and most often femtosecond laser pulses is manifested in an atomic-molecular "movie", a collection of processes the exploration of which is of immense interest for modern natural science. Studying this global phenomenon requires an ultra-high spatiotemporal resolution that involves the development of dedicated research methods. Laser spectroscopy may be used to determine energy states of samples and track their evolution in time; however, the structural dynamics of matter can only be extracted from that information by indirect methods. We present here direct techniques for studying laser-perturbed substances in the spatiotemporal continuum where matter is probed with ultra-short electron and X-ray pulses. We also describe the first series of the experiments performed using a femtosecond electron diffractometer and picosecond transmission electron microscope at the Institute of Spectroscopy, Russian Academy of Sciences based in Troitsk, Moscow.

**Keywords:** structural dynamics, time-resolved electron diffraction and electron microscopy, femtosecond laser radiation, coherent optical phonons

PACS numbers: **07.78.+s**, 61.05.J-, 64.70.D-, 64.70.K-, 68.37.Og

Bibliography — 32 references

Received 16 July 2018

*Uspekhi Fizicheskikh Nauk* **189** (3) 306–311 (2019)

*Physics – Uspekhi* **62** (3) (2019)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.06.038393>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2018.06.038393>