

“Аномальный” фотоэффект в методе сверхбыстрой электронной дифракции

С. А. Асеев⁺, Б. Н. Миронов⁺, Д. Г. Пойдашев⁺¹⁾, А. А. Ищенко*, Е. А. Рябов⁺

⁺ Институт спектроскопии РАН, 108840 Троицк, Москва, Россия

* РТУ-МИРЭА – Российский технологический университет,

Институт тонких химических технологий имени М. В. Ломоносова, 119571 Москва, Россия

Поступила в редакцию 6 марта 2024 г.

После переработки 6 марта 2024 г.

Принята к публикации 7 марта 2024 г.

Зондирование электронными импульсами быстропротекающих лазерно-индуцированных процессов открыло возможность прямого наблюдения структурной динамики в веществе с высоким пространственно-временным разрешением. В качестве фотокатода оказалось удобным использовать тонкую золотую пленку, а сам процесс фотоэлектронной эмиссии - индуцировать фемтосекундным УФ излучением с энергией кванта около 4.65 ÷ 4.75 эВ (в частности, для III гармоника Ti:Sa лазера $\hbar\omega \cong 4.65$ эВ). Для линейного фотоэффекта это противоречит справочным данным о работе выхода чистого металла ($W_{Au} \cong 5.1 \div 5.3$ эВ). Проведен анализ причин такого несоответствия и предложена модель генерации фотоэлектронных импульсов, с помощью которой достигнуто хорошее совпадение с экспериментальными данными.

DOI: 10.31857/S1234567824070036, EDN: VZDSTE

1. Введение. Метод сверхбыстрой электронной дифракции (UED) получил большое развитие в современной мировой практике, охватывающей такие дисциплины, как физика, химия, биофизика, нанотехнологии [1–4]. Основанный на использовании фемтосекундной лазерной техники, UED позволяет детектировать лазерно-индуцированную структурную динамику в веществе с высоким пространственно-временным разрешением. Это открывает возможность прямого наблюдения когерентной динамики ядер (фс – фемтосекундное временное разрешение) и электронов (ас – аттосекундное временное разрешение) фотоиндуцированных процессов в свободных молекулах и конденсированном веществе. В отличие от крупномасштабного рентгеновского лазера на свободных электронах (XFEL) метод UED обеспечивает возможность проведения исследований с помощью лабораторной установки.

Схематически UED представлен двумя каналами: возбуждения (лазерной накачки) образца и его зондирования задержанными во времени электронными импульсами. Оптическая линия задержки позволяет осуществить развертку исследуемой динамики в виде последовательности электронограмм, регистрируемых на позиционно-чувствительном детекторе в

регулируемой временной последовательности. Прецизионная синхронизация обоих каналов достигается за счет единого задающего источника ультракоротких лазерных импульсов. Для генерации электронных сгустков удобно использовать фотоэффект в металле или полупроводнике [5, 6].

Использование полупрозрачной золотой пленки в качестве фотокатода обеспечило возможность создания импульсного электронного пучка достаточно простым и эффективным способом на-просвет. Для активации такого катода можно применить импульсное лазерное излучение в ультрафиолетовом (УФ) спектральном диапазоне (линейный фотоэффект), либо в видимом диапазоне с длиной волны $\lambda \cong 560$ нм (2-фотонная электронная эмиссия).

В качестве источника УФ импульсов оказалось удобным использовать III гармонику ($\lambda \cong 265$ нм) фемтосекундного Ti:Sa лазера, который получил большое распространение во многих лабораториях, занимающихся изучением быстропротекающих процессов. Однако здесь прослеживается явное противоречие: энергия кванта такого УФ излучения оказывается заметно меньше, чем работа выхода чистого золота W_{Au} , приведенная во многих справочных пособиях. Несмотря на то, что все эксперименты в области UED выполнены в условиях высокого вакуума (зачастую в сверхвысоком вакууме), с тонкими пленками, полученными разными методами и в раз-

¹⁾e-mail: poydashev@isan.troitsk.ru

ных лабораториях, расхождение между справочными данными и “фактической” W_{Au} является заметным и может достигать величины около 1 эВ.

Цель данной статьи – установить причины такого несоответствия. Здесь проанализированы возможные причины уменьшения работы выхода для тонкопленочного золотого катода, а также отмечены факторы, влияющие на проведение эксперимента в области UED. Предложена модель формирования ультракоротких электронных импульсов, объясняющая экспериментально полученные результаты.

2. Экспериментальные схемы UED с тонкопленочным золотым катодом. Высокое временное разрешение метода UED обусловлено использованием ультракоротких синхронизованных оптических и электронных импульсов. Если в канале возбуждения можно использовать коммерчески доступные источники фемтосекундных лазерных импульсов с длительностью, достигающей ≈ 5 фс, то для канала зондирования возникают известные затруднения (см., например, [1, 3, 4]).

Прежде всего, это кулоновское расталкивание электронов, приводящее к существенному ухудшению временного разрешения UED. Чтобы уменьшить влияние этого эффекта, в эксперименте необходимо использовать зондирующие сгустки (с начальным поперечным размером $10 \div 30$ мкм, определяемым диаметром лазерного пучка в фокальном пятне), содержащие сравнительно небольшое число, до $\sim 10^4$ электронов в каждом импульсе, увеличить их кинетическую энергию, а также уменьшить расстояние между катодом и образцом. В условиях большого времени накопления, когда для надежной регистрации картины электронной дифракции необходимо суммировать вклады от многих импульсов, – наблюдение структурной динамики в течение нескольких часов требует стабильной и долговременной работы фотоэлектронного источника.

Важнейшее отличие фемтосекундного электронографа от такой крупномасштабной установки, как XFEL, является его сравнительная простота и компактность. Для генерации импульсного электронного пучка в методе UED оказалось весьма эффективным использовать тонкопленочные (толщиной несколько десятков нм) полупрозрачные металлические катоды, чтобы на-просвет подводить лазерное излучение непосредственно к области фотоэлектронной эмиссии в вакууме. III гармоника фемтосекундного Ti:Sa лазера ($\lambda \cong 265$ нм, $\hbar\omega \cong 4.65$ эВ) позволила реализовать линейный фотоэффект в пленках золота и серебра. При этом серебро хотя и обеспечивало более высокую квантовую эффективность,

но по возможности долговременной работы такого катода на практике значительно уступало золоту.

Поэтому тонкопленочный золотой фотокатод был и остается основой элегантной схемы формирования фотоэлектронных импульсов ультракороткой длительности в компактной установке UED (рис. 1) [7–14].

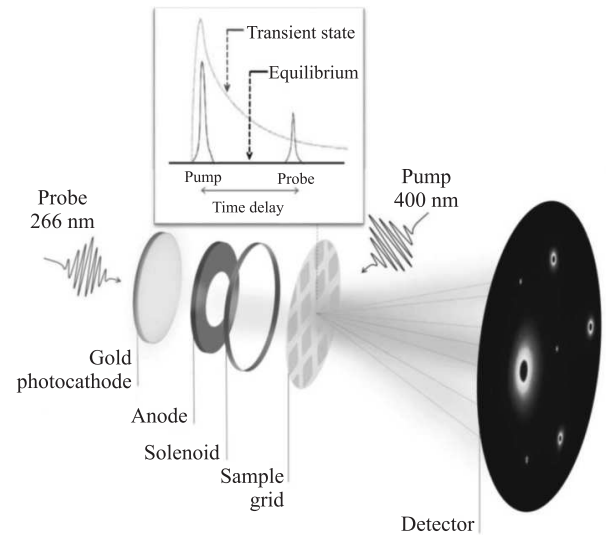


Рис. 1. Схема экспериментальной установки UED. Электронный сгусток, генерируемый фотокатодом (III гармоника фемтосекундного Ti:Sa лазера), ускоряется в электрическом поле и фокусируется магнитной линзой на основе соленоида. Возбуждение образца осуществляется II гармоникой того же Ti:Sa лазера. Дифракционная картина регистрируется с помощью позиционно-чувствительного детектора

В работе [7] методом сверхбыстрой электронной дифракции исследован фотоиндуцированный отклик в высококачественном монокристалле кремния. Продемонстрировано, что в противоречии с известным эффектом Дебая–Уоллера фотостимулированный нагрев кристаллической решетки способен привести к неожиданному росту интенсивности брэгговских пиков на дифракционной картине. Показано, что такое поведение можно объяснить исключительно в рамках динамической теории дифракции, с учетом многократного рассеяния зондирующих электронов в образце. Сделан вывод, что учет таких эффектов открывает путь к количественному исследованию неравновесной динамики дефектов в высококачественных совершенных монокристаллах.

Заметим, что именно золотой тонкопленочный катод использован на установке, описанной в работах [11, 12], в которых IV гармоника фемтосекундного Yb:KGW лазера ($\lambda \cong 260$ нм, $\hbar \cong 4.78$ эВ) индуциру-

ет фэтоэлектронную эмиссию в условиях сверхвысокого вакуума. В [12] исследован гигагерцовый структурный резонанс в антиферромагнитной 16 нм пленке (FePS_3) при охлаждении материала ниже температуры Нееля. Методом UED зарегистрирован сдвиг слоев в образце, когда отдельные участки тонкой пленки антиферромагнетика, подобно когерентным осцилляторам, смещаются параллельно друг другу.

Если в [7–12, 14] тонкая золотая пленка используется в режиме линейного фотоэффекта, то 2-фотонная электронная эмиссия при облучении подобного катода лазерными импульсами в видимом диапазоне открывает новые возможности. В качестве примера следует отметить компактный фемтосекундный электронограф [13], в котором использовано фемтосекундное лазерное излучение ($\lambda \cong \cong 565$ нм, $\hbar \cong \cong 2.2$ эВ) на выходе из параметрического усилителя. Подстраивая длину волны “под порог” 2-фотонной эмиссии, достигнута высокая когерентность зонда за счет “нулевой” начальной кинетической энергии электронов. Это позволило зарегистрировать отклонения [13, 15] от широко известной двухтемпературной модели, описывающей динамику возбуждения электронной и фононной подсистем в твердом теле [16, 17]. На основе 2-фотонной электронной эмиссии [18, 19] разработан стабильный источник однопериодных импульсов (для которого эффективная W_{Au} оказалась около 4.3 эВ), когда практически устранено кулоновское расталкивание.

3. Факторы, влияющие на работу выхода золотого катода. Для того, чтобы выяснить причины заметного расхождения (порог фотоэлектронной эмиссии для тонкой пленки золота оказался заметно ниже по сравнению с имеющимися литературными данными; $4.3 \div 4.4$ эВ [13, 18, 19] вместо $5.1 \div 5.3$ эВ [20–22]), рассмотрим несколько факторов. Во-первых, из описания эффекта Шоттки [21] известно, что внешнее электрическое поле F уменьшает работу выхода W . Если поверхность планарного катода однородна, то это уменьшение ΔW [эВ] при наложении электрического поля напряженностью F [В/см], приблизительно равно:

$$\Delta W \cong 3.8 \times 10^{-4} \sqrt{F}. \quad (1)$$

В ускоряющем промежутке электронографа следует поддерживать высокую напряженность поля E , так как ускорение электронов на малом отрезке позволяет не только минимизировать время пролета до образца, но и уменьшить влияние разброса начальных энергий электронов для достижения высокого временного разрешения. Однако для предотвращения пробоев и обеспечения условий стабильной рабо-

ты прибора максимальная F ограничена величиной на уровне 10^5 В/см. Тогда, согласно (1) $\Delta W \cong 0.1$ эВ, что не способно объяснить вышеуказанное расхождение. Поэтому следует проанализировать другие причины такого несоответствия.

Как отмечено в [23], существенное уменьшение W_{Au} от ≈ 5.1 эВ до ≈ 4.4 эВ может происходить за счет хемосорбции прочно связанного монослоя полярных молекул (таких, как вода), а также углеводородов. В [24] исследована динамика поверхностного загрязнения $\text{Au}(111)$, выращенного на слюдяных подложках, в разные моменты времени (минуты, часы, дни) с помощью сканирующей атомно-силовой микроскопии и кельвин-зондовой силовой микроскопии, что обеспечило понимание механизмов поверхностной реорганизации, вызывающих изменение W_{Au} в диапазоне между 5.25 и 4.75 эВ исключительно за счет разных условий хранения золотого образца. Например, на открытом воздухе или в герметично закрытом контейнере в той же лаборатории. Как оказалось, так называемый адвентивный углерод (AdC) присутствует повсеместно на поверхности практически всех неорганических материалов за счет воздушно-капельного механизма. В [24] выявлены два режима загрязнения. Начальная быстрая фаза отвечает адсорбции органических молекул на поверхности золота в течение нескольких минут после изменений условий воздействия окружающей среды. В более медленной фазе накопление AdC сопровождается миграцией углеродсодержащих кластеров по поверхности и их ростом.

С одной стороны, наличие органической пленки на поверхности золотого катода способно объяснить возможность электронной эмиссии под действием лазерных импульсов в УФ диапазоне (когда $\hbar\omega \cong 4.65 \div 4.75$ эВ) в режиме линейного фотоэффекта. Однако, с другой стороны, стабильная долговременная работа источника электронов в условиях высокого вакуума требует чистых условий проведения эксперимента, при которых AdC пленка может легко разрушаться под действием УФ лазерных импульсов. В связи с этим, важно понять, насколько исчерпывающим является такое описание и в какой мере механизм уменьшения работы выхода золота за счет наличия углеродсодержащих молекул (или полярных молекул воды) на его поверхности является единственно возможным.

4. Механизм фотоэлектронной эмиссии в биметаллической структуре Cr/Au под действием фемтосекундных лазерных импульсов. Учтем, что основой компактного фотоэлектронного источника для многих схем UED стала биметалличе-

ская наноструктура. В [7–13] эмитирующий слой золота наносился поверх специального буферного слоя для повышения адгезии Au к прозрачной подложке, через которую УФ излучение подводилось к катоду в вакууме (рис. 2). Так, для экспериментальной

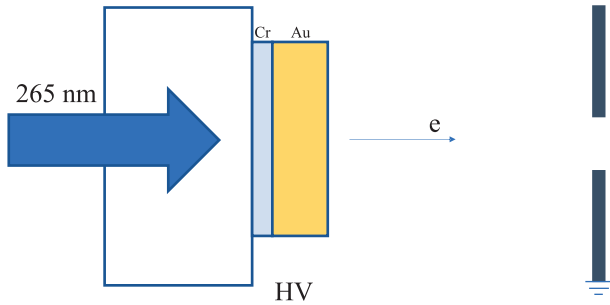


Рис. 2. (Цветной онлайн) Тонкопленочная структура Cr/Au под действием УФ лазерного излучения “напросвет” эмитирует электроны, которые затем ускоряются за счет действия статического электрического поля в промежутке между катодом и анодом; здесь к катоду применен высокий отрицательный потенциал HV

установки в [11] тонкопленочный золотой фотокатод на сапфировой подложке приготавливался путем электронно-лучевого испарения, когда сначала наносился адгезионный слой хрома толщиной 1 нм, а затем 20-нм слой золота.

Обратим внимание на следующее немаловажное обстоятельство. Согласно прецизионным измерениям квантовой эффективности фотоэлектронной эмиссии [13, 18, 19] работа выхода тонкопленочного катода составляла величину около $4.3 \div 4.4$ эВ, что фактически совпадало с W_{Cr} . Действительно, хром обладает сравнительно низкой работой выхода, ≈ 4.4 эВ, что совместно с разработанной методикой однородного роста тонких пленок обеспечивает его многочисленные применения [25].

Свойства биметаллических структур типа Cr/Au представляют особый интерес. В [26] с помощью электронной микроскопии, атомно-силовой микроскопии и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии детально исследовано, как адгезионный слой Cr влияет на структуру тонких пленок Au (толщина $2 \div 20$ нм). Как установлено, для всех образцов кристаллическая ориентация золота была преимущественно [111], а слой хрома оказался частично окисленным [26].

Учитывая, что оксидная пленка способна препятствовать электрическому контакту между Cr и Au, возьмем за основу электронные энергетические диаграммы для двух изолированных друг от друга металлических слоев Au и Cr. В данной моде-

ли “сэндвича” (Cr – оксидный слой – Au) электроны проводимости туннелируют (рис. 3а) из пленки

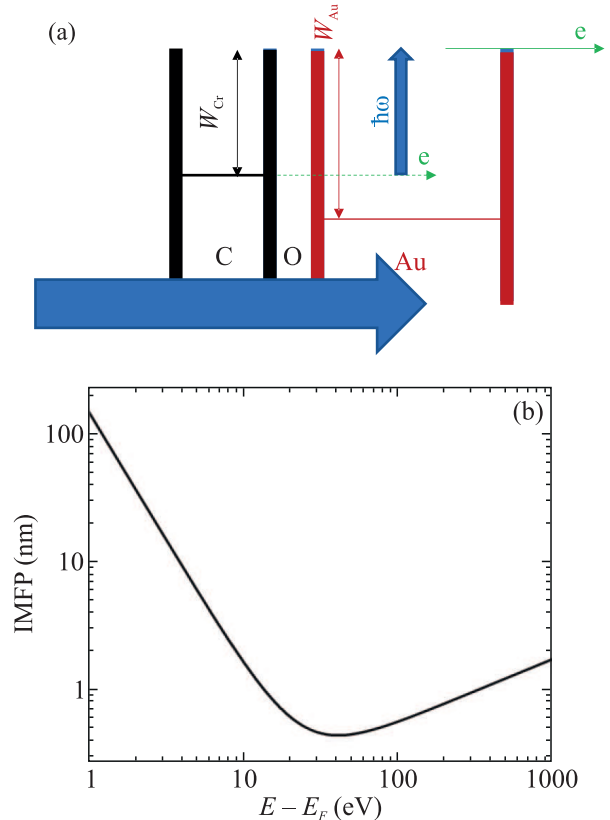


Рис. 3. (Цветной онлайн) Иллюстрация модели “сэндвича” (Cr – оксидный слой – Au) для наблюдения фотоэлектронной эмиссии (а). Здесь учтено, что в процессе изготовления тонкопленочного золотого катода слой хрома покрывается оксидной пленкой (обозначенной O), которая способна препятствовать электрическому контакту между Cr и Au. (б) Универсальная кривая, качественно отражающая зависимость неупругой длины свободного пробега электронов в твердом теле от кинетической энергии электронов [27]. Для золота данные для длин пробега электронов до неупругого рассеяния IMFP, рассчитанные в работе [28], приведены в табл. 1

хрома в объем золота сквозь оксидный слой (CrO_x , $1 < x < 1.5$) проводимость которого может “кратковременно включаться” под действием УФ лазерных импульсов (или мощных импульсов в видимом диапазоне). Электроны с энергией $W_{Au} - W_{Cr} \approx 1$ эВ способны “баллистически” распространяться в золотой пленке на длину в несколько десятков нм (рис. 3б), составляющей фактическую толщину катода. Для них порог фотоэлектронной эмиссии составляет величину ≈ 4.4 эВ, что хорошо согласуется с экспериментом [13, 18, 19].

Таблица 1. Данные для длин пробега электронов IMFP до неупругого рассеяния в золоте согласно [28]

$E - E_F$ [эВ]	1	2	3	4
IMFP [нм]	30–40	10–20	5–7	3–4

В этой модели роль золотой пленки, как инертного слоя, фактически сводится к поддержанию неизменной структуры самого “сэндвича”. Для использования сравнительно толстого слоя такой защитной пленки (толщина Au $20 \div 30$ нм) важно, чтобы отличие работы выхода буферного слоя и W_{Au} было не очень большим, так как длина пробега электронов до неупругого рассеяния в золоте резко падает с ростом кинетической энергии (см. левую часть рис. 3b и табл. 1). На рисунке 3b длина пробега электрона до неупругого рассеяния описывается зависимостью [27]:

$$\text{IMFP} = 143/(E - E_F)^2 + 0.054\sqrt{(E - E_F)}, \quad (2)$$

где E_F – энергия уровня Ферми; длина пробега электрона IMFP выражена в [нм], а разностная энергия $E - E_F$ в [эВ]. Учитывая, что выражение (2) применимо исключительно для качественного описания, конкретно для золота данные IMFP, рассчитанные согласно [28], приведены в табл. 1.

Ранее, в [29] зарегистрирован необычный характер многофотонного процесса генерации электронов в биметаллической структуре, когда золотые пленки разной толщины на алюминиевой подложке облучались фемтосекундными лазерными импульсами ($\lambda \cong 780$ нм, $\hbar\omega \cong 1.6$ эВ). Установлено, что при P -поляризации и толщине слоя ≈ 43 нм, 4-фотонная эмиссия (характерная для $W_{Au} \cong 5.3$ эВ) сменялась 3-фотонным процессом; это позволило сделать вывод о наблюдении аномального фотоэффекта в золоте на фемтосекундном масштабе. Учитывая, что суммарная энергия 3 квантов приблизительно равна 4.8 эВ, данный результат [29] свидетельствовал в пользу существенного понижения порога эмиссии электронов из металла. Как оказалось из численного моделирования [30], для биметаллической структуры Al/Au максимум градиента поля возбужденных поверхностных плазмонов приходился на границу раздела, что обеспечивало существенное ускорение электронов за счет действия пондеромоторной силы, индуцированной фемтосекундным излучением. Таким образом, металлическая подложка способна оказывать существенное влияние на фотоэффект в золотой пленке.

Согласно предложенной нами модели, для биметаллического фотокатода (с внешним золотым

защитным слоем) порог фотоэлектронной эмиссии определяется работой выхода металлического буфера W . Это открывает потенциальную возможность управления начальным распределением вылетевших электронов по энергии за счет подбора буфера, что может быть использовано для повышения когерентности зондирующего пучка в методе UED (когда W фактически совпадает с энергией кванта одной из гармоник фемтосекундного лазера). Например, применение иттрия с $W_Y \cong 3$ эВ для изготовления биметаллической структуры Au/Y, возможно, позволит использовать II гармонику Ti:Sa лазера ($\lambda = 400$ нм, $\hbar \cong 3.1$ эВ), чтобы не только формировать электронные импульсы с практически “нулевой” начальной энергией, но и, соответственно, упростить схему детектирования структурной динамики на компактной установке.

5. Заключение. Следует отметить, что в обзоре [1], посвященном развитию метода UED, в качестве материалов фотокатодов перечислены исключительно медь и серебро, обладающие (согласно табличным данным) сравнительно низкой работой выхода; для поликристаллов $W_{Cu} \cong 4.4$ эВ и $W_{Ag} \cong 4.3$ эВ. Вместе с тем, компактные источники электронов на базе тонкопленочного золотого катода позволили выполнить целый ряд успешных экспериментов в этой области [7–14], используя, по сути, “подпороговый” процесс сверхбыстрой фотоэлектронной эмиссии.

“Проблема золотого фотокатода” оказывается наиболее выраженной в случае линейного фотоэффекта, когда можно исключить сверхбыстрый нагрев ансамбля свободных электронов и, соответственно, существенное (на ≈ 1 эВ) понижение W_{Au} за счет хвоста электронного распределения Ферми. Действительно, в отличие от двухфотонного процесса, для линейного фотоэффекта использованы лазерные импульсы сравнительно невысокой интенсивности, что обеспечивало долговременную и стабильную работу фотоэлектронного источника.

Возможно, именно углеродсодержащая пленка на поверхности Au обеспечивает аномально низкую работу выхода для фотоэлектронной эмиссии.

В предложенной нами модели (в которой учтено, что в процессе изготовления биметаллического катода Au/Cr слой хрома покрывается оксидной пленкой, препятствующей электрическому контакту между Cr и Au) “работает” исключительно тонкий слой хрома, а роль золотой пленки, как инертного слоя, фактически сводится к поддержанию неизменной структуры самого “сэндвича” (Cr – оксидный слой – Au). Здесь электроны с уровня Ферми в хrome туннелируют в объем золота (при этом представляется важ-

ным учитывать возможность “быстрого включения” проводимости оксидного слоя под действием фемтосекундных лазерных импульсов). Электроны “баллистически” распространяются на всю толщину золотой пленки, где далее им сообщается энергия, необходимая для фотоэлектронной эмиссии. Основываясь на табличных значениях работ выхода для Сг и Аи, получено хорошее совпадение с экспериментом.

Авторы признательны А. А. Соколику и Ю. Е. Лозовику за внимательное ознакомление с текстом и высказанные ценные замечания.

Финансирование работы. Данная статья подготовлена в рамках выполнения работ по Госзаданию FFUU-2022-0004.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

1. D. Filippetto, P. Musumeci, R. K. Li, B. J. Siwick, M. R. Otto, M. Centurion, and J. P. F. Nunes, *Rev. Mod. Phys.* **94**, 045004 (2022).
2. A. De La Torre, D. M. Kennes, M. Claassen, S. Gerber, J. W. McIver, and M. A. Sentef, *Rev. Mod. Phys.* **93**, 041002 (2021).
3. А. А. Ищенко, Г. В. Фетисов, С. А. Асеев, *Методы детектирования ультрабыстрой динамики вещества*, ФИЗМАТЛИТ, М. (2022).
4. С. А. Асеев, А. С. Ахманов, Г. В. Гиричев, А. А. Ищенко, И. В. Кочкиков, В. Я. Панченко, Е. А. Рябов, *УФН* **190**, 113 (2020).
5. Ch. Li, M. Guan, H. Hong, K. Chen, X. Wang, H. Ma, A. Wang, Zh. Li, H. Hu, J. Xiao, J. Dai, X. Wan, K. Liu, Sh. Meng, and Q. Dai, *Sci. Adv.* **9**, eadf4170 (2023).
6. C. Hong, W. Zou, P. Ran, K. Tanaka, M. Matzelle, W. C. Chiu, R. S. Markiewicz, B. Barbiellini, Ch. Zheng, S. Li, A. Bansil, and R. H. He, *Nature* **617**, 493 (2023).
7. I. G. Vallejo, G. Gallé, B. Arnaud, S. A. Scott, M. G. Lagally, D. Boschetto, P. E. Coulon, G. Rizza, F. Houdellier, D. Bolloc’h, and J. Faure, *Phys. Rev. B* **97**, 054302 (2018).
8. Y. Morimoto, R. Kanya, and K. Yamanouchi, *J. Chem. Phys.* **140**, 064201 (2014).
9. M. S. Robinson, P. D. Lane, and D. A. Wann, *Rev. Sci. Instrum.* **86**, 013109 (2015).
10. C. J. Hensley, J. Yang, and M. Centurion, *Phys. Rev. Lett.* **109**(13), 133202 (2012).
11. A. Zong, *Emergent States in Photoinduced Charge-Density-Wave Transitions*, Doctoral Thesis accepted by Massachusetts Institute of Technology, MA, USA, Springer Theses Recognizing Outstanding Ph.D. Research (2021).
12. A. Zong, Q. Zhang, F. Zhou et al. (Collaboration), *Nature* **620**, 988 (2023).
13. L. Waldecker, R. Bertoni, and R. Ernstorfer, *J. Appl. Phys.* **117**, 044903 (2015).
14. S. A. Aseyev, E. A. Ryabov, B. N. Mironov, I. V. Kochikov, and A. A. Ischenko, *Chem. Phys. Lett.* **797**, 139599 (2022).
15. L. Waldecker, R. Bertoni, R. Ernstorfer, and J. Vorberger, *Phys. Rev. X* **6**(2), 021003 (2016).
16. S. I. Anisimov, A. M. Bonch-Bruevich, M. A. El’yashevich, Ya. A. Imas, N. A. Pavlenko, and G. S. Romanov, *Soviet Physics – Technical Physics* **11**, 945 (1967).
17. S. I. Anisimov, B. L. Kapeliovich, and T. L. Perel’man, *Soviet Physics – JETP* **66**, 776 (1974).
18. M. Aidelsburger, F. O. Kirchner, F. Krausz, and P. Baum, *PNAS* **107**, 19714 (2010).
19. L. Kasmí, D. Kreier, M. Bradler, E. Riedle, and P. Baum, *New J. Phys.* **17**, 033008 (2015).
20. W. M. H. Sachtler, G. J. H. Dorgelo, and A. A. Holscher, *Surf. Sci.* **5**, 221 (1966).
21. *Физические величины. Справочник*, под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова, Энергоатомиздат, М. (1991), 1232 с.
22. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 95th edition, ed. by W. M. Haynes, D. R. Lide, and T. J. Bruno, CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton (2014).
23. P. J. Wass, D. Hollington, T. J. Sumner, F. Yang, and M. Pfeil, *Rev. Sci. Instrum.* **90**, 064501 (2019).
24. N. Turetta, F. Sedona, A. Liscio, M. Sambì, and P. Samori, *Adv. Mater. Interfaces* **8**(10), 2100068 (2021).
25. A. Moradi, M. Rog, G. Stam, R. M. Tromp, and S. J. van der Molen, *Ultramicroscopy* **253**, 113809 (2023).
26. M. Todeschini, A. Bastos da Silva Fanta, F. Jensen, J. B. Wagner, and A. Han, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **9**, 37374 (2017).
27. M. P. Seah, W. A. Dench, *Surf. Interface Anal.* **1**, 2 (1979).
28. H. T. Nguyen-Truong, *J. Phys. Chem.* **119**, 7883 (2015).
29. J. Kupersztych and M. Raynaud, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 147401 (2005).
30. M. Raynaud and J. Kupersztych, *Phys. Rev. B* **76**, 241402 (R) (2007).