

Интерферометрическая диагностика нанодеформаций поверхности мишени в пикосекундном диапазоне при импульсном лазерном воздействии

Е. В. Струлева, П. С. Комаров и С. И. Ашитков

Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва 125412, Россия

E-mail: struleva.evgenia@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 23 ноября 2018 г.

Аннотация. Рассмотрена интерферометрическая методика высокоскоростной регистрации движения поверхности мишени для изучения лазерно-индуцированных ударно-волновых явлений в пикосекундном временном диапазоне. Приведена оптическая схема и результаты калибровочных измерений. Методика обеспечивает непрерывную регистрацию пространственно неоднородного движения поверхности мишени с погрешностью на уровне 1 нм и временным разрешением не хуже 1 пс. <https://doi.org/10.33849/2018128>

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие повышенное внимание уделяется изучению высокоскоростной деформации и разрушения материалов в условиях воздействия ударных нагрузок предельно малых длительностей, которые могут быть реализованы только с помощью лазерных импульсов пико- и фемтосекундной длительности. Данный интерес, с одной стороны, обусловлен фундаментальными вопросами механики и физики конденсированного состояния вещества, а с другой — связан с развитием высокопрецизионных лазерных технологий обработки и наноструктурирования поверхности материалов [1–9]. Кроме того, данные, полученные в ударно-волновых экспериментах с импульсами ультракороткой длительности, по пространственно-временным параметрам близки к условиям, реализуемым в молекулярно-динамических расчетах, и в настоящее время используются для тестирования новых межатомных потенциалов взаимодействия. В особенности эти данные актуальны для разработки новых потенциалов в форме модели погруженного атома ЕАМ (Embedded Atom Model) [10], хорошо описывающие большие деформации материала на сжатие и растяжение, которые реализуются в лазерных экспериментах. Диагностика нанодеформаций явлений в основном осуществляются интерферометрическими методами путем измерения профилей скорости или смещения поверхности испытываемых образцов. В микросекундном диапазоне для этого применяются стандартные методики VISAR или ORVIS [11–13], временное разрешение которых ограничено на уровне $\sim 10^{-9}$ с. В последние годы для изучения быстропротекающих процессов в пикосекундном диапазоне, инициируемых фемтосекундными лазерами, получили развитие многоимпульсные pump-probe методы с дискретно варьируемой задержкой с временным разрешением $\sim 10^{-13}$ с, в том числе метод фемтосекундной интерференционной микроскопии [1, 14, 15]. Его основным недостатком является необходимость проведения многократных измерений каждый раз на новом месте мишени, что может вносить дополнительную погрешность, и накладывает существенные ограничения на однородность свойств, постоянство толщины испытываемых образцов, стабильность лазерных импульсов. В настоящей работе описан интерферометрический метод непрерыв-

ной регистрации нанодеформаций поверхности мишени в пикосекундном временном диапазоне, инициируемых импульсами фемтосекундного лазера, с применением частотно-модулированного (чирпированного) диагностического лазерного импульса [4, 7, 16–18]. Принцип основан на том, что разные спектральные компоненты чирпированного импульса приходят на образец в разные моменты времени. Данный метод позволяет регистрировать динамику процессов высокоскоростной деформации с пространственным и временным разрешением при однократном лазерном воздействии. Необходимо отметить более высокую надёжность однократных измерений, что позволяет применять их для исследования процессов в неоднородных образцах. В настоящей статье работа данной методики продемонстрирована на примере измерения динамики деформации поверхности мишени при выходе импульса ударного сжатия, генерируемого импульсом фемтосекундного лазера.

2. ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА ИЗМЕРЕНИЙ

В описываемой экспериментальной схеме небольшая часть чирпированного импульса длительностью 300 пс отводилась из лазерного тракта перед компрессором и направлялась в оптическую схему измерений для подсветки интерферометра смещения, совмещенного с дифракционным спектрометром. Основная часть усиленного фемтосекундного импульса после компрессора, жестко синхронизованного во времени с диагностическим импульсом, направлялась на мишень, генерируя в ней импульс ударного сжатия. В экспериментальной схеме (рисунок 1) источником лазерного излучения служила титан-сапфировая фемтосекундная лазерная система Legend, Coherent, США. Система реализована по известной схеме усиления чирпированных импульсов и представляет собой задающий генератор, стретчер (временной расширитель), регенеративный усилитель и компрессор. В случае временного расширителя на дифракционных решетках (что имеет место в используемой фемтосекундной лазерной системе) чирпированный импульс обладает линейной частотной модуляцией, когда несущая частота излучения пропорциональна текущему моменту времени (положительный чирп). Импульс фемтосекундной длительности на центральной длине волны $\lambda_0 = 795$ нм после оптически-

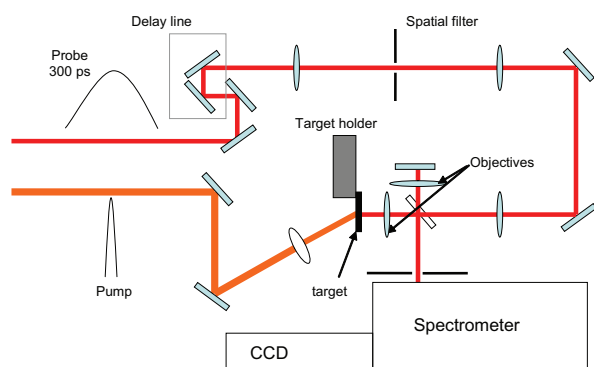


Рисунок 1. Экспериментальная схема.

го компрессора с помощью широкополосных диэлектрических зеркал направлялся на мишень для генерации ударной волны (рисунок 1). Путем изменения расстояния между решетками компрессора длительность оптических импульсов τ_L могла варьироваться от 40 до 500 фс. Возможность изменения длительности τ_L может в ряде случаев служить для оптимизации режима лазерного воздействия на мишень, в том числе во избежание приповерхностного оптического пробоя за счет снижения пиковой интенсивности излучения. Плавная регулировка энергии нагревающих импульсов в пределах трех порядков величины осуществлялась с помощью поляризационного аттенюатора, состоящего из полуволновой фазовой пластины и призмы Глана. Для избежания переотражений в пучке и потерь энергии все оптические элементы оптической схемы имели широкополосные просветляющие покрытия. Фокусировка нагревающего излучения на мишень осуществлялась под углом падения 30° с помощью сменных линз с фокусным расстоянием 30 и 50 см. Наклонное падение нагревающего луча обеспечивало отсутствие повреждения микрообъектива интерферометра при совмещении нагревающего и пробного лучей на мишени в процессе юстировки. Ирисовая диафрагма служила для коррекции пространственного распределения. Система фокусировки обеспечивала гауссово пространственное распределение плотности энергии $F(x, y)$ в фокусе на мишени с характерным радиусом $r_0 = 18\text{--}30$ мкм по уровню e^{-1} . Данный пространственный размер области воздействия обеспечивает одномерный характер деформаций в исследуемом временном диапазоне. Для настройки на фокус линза перемещалась вдоль оптической оси на микротрансляторе. Точная настройка и измерение параметров пространственного распределения в фокальном пятне осуществлялась с помощью оптической схемы микроинтерферометра и CCD-камеры. Энергия нагревающих импульсов E измерялась с помощью калиброванного фотодиода. Максимально достижимая энергия импульсов на мишени в данной схеме измерений составила $E \approx 200$ мкДж. Исследуемые образцы устанавливались на управляемый с компьютера трехкоординатный микроманипулятор, собранный на базе моторизованных линейных трансляторов Standa 8MT160-20 и осуществляющий перемещение образца по трем взаимно перпендикулярным направлениям XYZ с максимальной величиной перемещения 20 мм по каждой из координат и шагом 1.25 мкм. Для проведения каждого

из измерений на новом месте образца, мишень перемещалась в плоскости XY примерно на 200 мкм. В данном случае отсутствовало перекрытие модифицированных после воздействия областей мишени. Перемещением вдоль координаты Z осуществлялось позиционирование образца в предметной плоскости микрообъектива интерферометра. Для диагностики ударно-волновых явлений использовались частотно-модулированные (чирпированные) импульсы длительностью около 300 пс с центральной длиной волны излучения $\lambda_0 = 795$ нм и шириной спектра $\Delta\lambda = 40$ нм. Зондирующий луч через оптическую линию задержки направлялся в интерферометр Майкельсона. Оптическая линия задержки служила для точного согласования времени прихода на мишень нагревающего и диагностического импульсов. Поглощение нагревающих лазерных импульсов в поверхностном слое мишени сопровождается генерацией импульсов ударного сжатия, которые распространяясь по направлению к тыльной поверхности образца, вызывают его деформацию. Диагностический узел представлял собой интерферометр Майкельсона с переносом изображения (конфигурация Линника) поверхности исследуемого образца на входную щель спектрометра. Перенос изображения в объектном плече интерферометра осуществлялся с помощью микрообъектива Olympus с числовой апертурой $NA = 0.2$. Опорное плечо интерферометра было образовано аналогичным объективом и диэлектрическим зеркалом. Опорное зеркало интерферометра перемещалось на микротрансляторе, с помощью которого проводилось выравнивание оптической длины опорного и объектного плеча. Критерием выравнивания служил максимальный контраст интерференционных полос на выходе интерферометра. Для улучшения контраста интерференционных полос в случае большого различия коэффициентов отражения мишени и опорного зеркала в опорное плечо интерферометра помещался нейтральный светофильтр, выравнивающий интенсивности интерферирующих лучей. Для увеличения размера подсвечиваемой области на мишени в схеме интерферометра была установлена положительная линза, образующая с микрообъективом телескоп с увеличением 1:1.5. Настройка интерферометра осуществлялась с помощью угловой юстировки опорного зеркала таким образом, чтобы интерференционные полосы располагались перпендикулярно входной щели спектрометра. Разложение в спектр частотно-модулированного сигнала с выхода интерферометра проводилось с помощью дифракционного спектрометра Astor-2300i, собранного по схеме Черни–Тернера с фокусным расстоянием 300 мм. Оптическая схема спектрометра включает два сферических зеркала и плоскую дифракционную решетку. Излучение в спектрометр поступает через входную щель, далее раскладывается в спектр (по координате X), который на выходе регистрируется CCD-камерой. При этом по второй координате Y отображается пространственное распределение падающего на щель излучения. Плоская форма фокальной поверхности в данной схеме позволяет получить высокое разрешение во всем рабочем спектральном диапазоне. Используемый в измерительной схеме спектрометр укомплектован моторизованной турелью с плоским зеркалом и двумя дифракционными решетками 600 штр/мм и 1800 штр/мм. Спектрометр мог работать как в режиме регистрации спектров, так

и в режиме переноса изображения при установке зеркала. Запись оптических сигналов на выходе спектрометра осуществлялась CCD-камерой SensiCam QE (производитель PCO CCD Imaging, США) с охлаждаемой матрицей, разрядностью 12 бит и размером пикселя 9 мкм. Высокая разрядность АЦП позволяла регистрировать интерферограммы с меньшим шагом квантования интенсивности, что увеличивает чувствительность экспериментальной схемы.

3. ФУРЬЕ-АНАЛИЗ ИНТЕРФЕРОГРАММ, ПОЛУЧЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ЧИРПИРОВАННОГО ИМПУЛЬСА

В каждом эксперименте записываются три интерферограммы: интерферограмма поверхности образца до воздействия (начальная), интерферограмма поверхности в момент выхода ударной волны (временная) и интерферограмма после окончания ударно-волнового процесса — спустя примерно несколько секунд после воздействия (финальная). Смещение поверхности мишени при выходе на неё импульса сжатия приводит к изменению соотношения фаз объектного и опорного лучей, что приводит к сдвигу интерференционных полос. Компьютерная обработка интерференционных картин производится с использованием двумерного преобразования Фурье, подробно описанного в [12]. Результатом обработки экспериментальных интерферограмм является пространственно-временная развертка изменения фазы $\Delta\psi(y, t)$ диагностического импульса, характеризующая динамику величины смещения Δz поверхности образца во времени t с разрешением по одной пространственной координате y в плоскости образца.

4. КАЛИБРОВКА ВРЕМЕННОЙ РАЗВЕРТКИ

Временная калибровка для перехода от шкалы длин волн λ к шкале текущего времени t проводилась с помощью оптической линии задержки, позволяющей варьировать временной интервал Δt между приходом на мишень диагностического и нагревающего импульса. Нагрев фронтальной поверхности мишени, граничащей со стеклом, осуществлялся лазерным импульсом длительностью 100 фс с плотностью энергии ~ 1 Дж/см². Мишенью служила золотая пленка толщиной 500 нм, нанесенная на стеклянную подложку толщиной 150 мкм. Интенсивность нагревающего импульса была ниже порога возникновения оптического пробоя в стекле. Изменение фазы диагностического импульса $\Delta\psi(y, \lambda)$, соответствующее деформации свободной поверхности образца, регистрировалось интерферометром. При изменении временной задержки t между нагревающим и диагностическим импульсами на регистрируемом спектре менялось положение начала изменения фазы диагностического импульса, вызванное деформацией поверхности. Шаг изменения временной задержки t между нагревающим и зондирующим импульсами составлял $\Delta t = 20$ пс. Момент времени, соответствующий выходу ударной волны, определялся по уровню, на порядок превышающему величину погрешности изменения фазы $\delta\psi \approx 0.01$ рад. На рисунке 2 приведен калибровочный график для дифракционной ре-

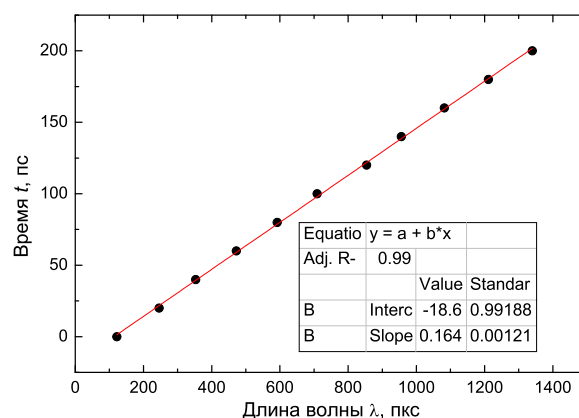


Рисунок 2. Калибровочная кривая $t(\lambda)$ для дифракционной решетки спектрометра с периодом штрихов 600 штр/мм (маркеры — эксперимент; линия — линейная аппроксимация).

шетки спектрометра с периодом 600 штр/мм, устанавливающий соответствие между регистрируемой длиной волны λ и текущим моментом времени t в частотно-модулированном диагностическом импульсе. Вид зависимости $\lambda(t)$ свидетельствует о линейной частотной модуляции диагностического импульса в измеряемом спектральном интервале длин волн $\Delta\lambda = 775\text{--}815$ нм. Экспериментальные данные хорошо аппроксимируются линейной зависимостью с угловым коэффициентом $K = 0.164 \pm 0.001$ пс/пкс, который является калибровочным коэффициентом для пересчета из относительной шкалы (номер пикселя CCD матрицы N) в текущее значение времени t . Для рассматриваемой экспериментальной схемы при использовании дифракционной решетки 600 штр/мм величина одновременно регистрируемого временного интервала соответствует $\Delta t = 0\text{--}240$ пс.

5. ПРОСТРАНСТВЕННОЕ И ВРЕМЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ СХЕМЫ, ТОЧНОСТЬ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ МИШЕНИ

Калибровка масштаба переноса изображения мишени на матрицу CCD-камеры проводилась с помощью штриховой миры. Для этого мира устанавливалась на место мишени в объектное плечо интерферометра. Опорное плечо при этом перекрывалось. Далее спектрометр переводился в режим переноса изображения путем поворота турели и установки зеркала на место дифракционной решетки. При полностью открытой входной щели спектрометра с помощью микроманипулятора мишенного узла поверхность миры совмещалась с предметной плоскостью объектива интерферометра. CCD-камерой регистрировалось увеличенное изображение поверхности штриховой миры. Масштаб переноса изображения поверхности мишени в плоскость CCD-камеры составил 0.4 мкм/пкс. Величина временного разрешения в спектральной интерферометрии δt с применением частотно-модулированного импульса определяется спектральным разрешением спектрометра, которое в свою очередь зависит от рабочей ширины $\delta\lambda$ входной щели и дисперсии, определяемой типом решетки и

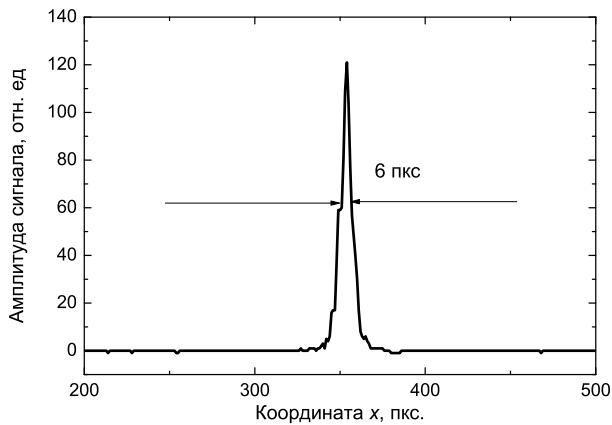


Рисунок 3. Пространственный профиль распределения интенсивности рабочей щели спектрометра $I(x)$ в режиме переноса изображения.

фокусным расстоянием оптической системы. На рисунке 3 приведён профиль распределения интенсивности рабочей щели спектрометра в режиме переноса изображения $I(x)$, регистрируемое на выходе CCD-камерой. Измеренная ширина щели (рисунок 3) на уровне $0.5I_{\max}$ составила $\delta x \approx 6$ пкс. Отсюда, используя результаты временной калибровки, из соотношения $\delta t = K\delta x$ имеем, что при проведении измерений с дифракционной решеткой 600 штр/мм величина временного разрешения составляет $\delta t_1 \approx 1$ пс. Пространственное разрешение в плоскости мишени определяется числовой апертурой используемого микрообъектива, масштабом переноса изображения и размером пикселя CCD-матрицы. В описываемой схеме пространственное разрешение вдоль оси (вдоль щели спектрометра) также составляет величину $\delta y \approx 2.5$ мкм. Для микрообъектива пространственное разрешение в плоскости объекта определяется выражением $\delta y = 1.22\lambda/2NA$ [19], где NA — числовая апертура объектива. Тогда для используемых в интерферометре микрообъективов с $NA = 0.2$ величина латерального пространственного разрешения будет равна $\delta y \approx 2-3$ мкм. Таким образом, найденное экспериментально значение поперечного пространственного разрешения совпадает с расчетным. Одной из важных задач, возникающих в ходе проведения измерений, является точное позиционирование поверхности мишени в предметной плоскости объектива интерферометра. Такая задача возникает при замене экспериментального образца или его поперечном перемещении при наличии перекоса плоскости его поверхности относительно предметной плоскости. Точное позиционирование мишени обеспечивает сохранение соотношения длин оптических путей нагревающего и диагностического лучей, или, другими словами, обеспечивает постоянство временной задержки Δt между нагревающим и диагностическим импульсом. Позиционирование мишени в пределах глубины резкости $\delta R_z = \lambda/2(NA)^2$ обеспечивает точность на уровне $\delta R_z = \pm 10$ мкм. Более высокая точность позиционирования в интерферометрии может быть достигнута путем наблюдения за контрастом интерференционных полос. При позиционировании поверхности объекта в предметной плоскости и при равенстве оптических длин в плечах интерферометра в плоскости изображе-

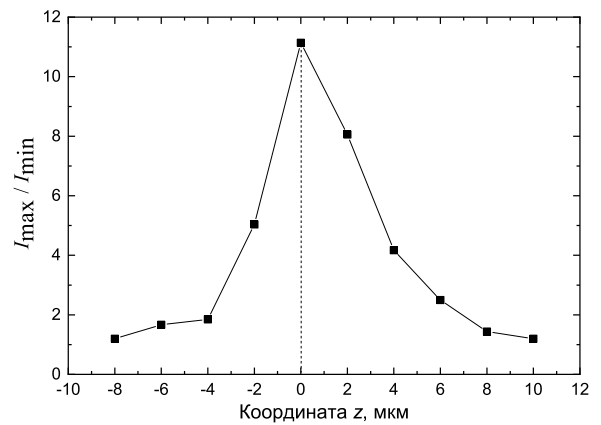


Рисунок 4. Зависимость изменения контраста интерференционных полос от величины смещения поверхности объекта относительно предметной плоскости интерферометра $z = 0$.

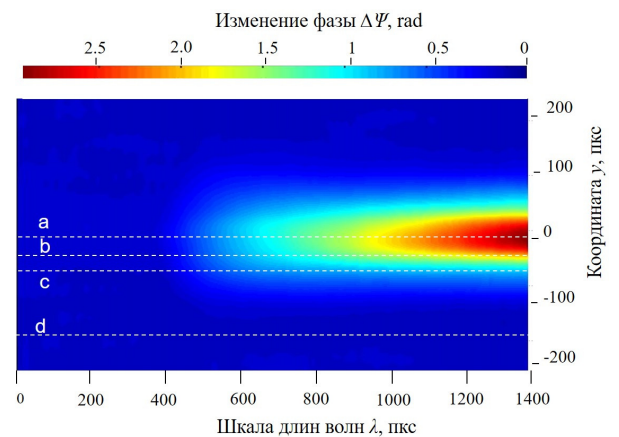


Рисунок 5. Двумерное распределение изменения фазы $\Delta\psi(y, \lambda)$ диагностического импульса при выходе ультракороткой ударной волны на тыльную поверхность алюминиевой мишени.

ний вблизи оптической оси реализуется максимальный контраст полос. На рисунке 4 приведен график, характеризующий изменение контраста интерференционных полос $I_{\max}/I_{\min}$, регистрируемый CCD-камерой на выходе спектрометра в режиме переноса изображения в зависимости от величины смещения поверхности образца относительно предметной плоскости. Из рисунка 4 видно, что смещение поверхности образца на расстояние 2 мкм ведет к ухудшению контраста полос примерно в 2 раза. Это позволяет реализовать точность позиционирования образца относительно предметной плоскости на уровне $\Delta z = 1-2$ мкм, что соответствует точности установки задержки между нагревающим и зондирующим импульсом на уровне $\Delta t = 2\Delta z/c \approx 10$ фс.

6. ПРИМЕР ОБРАБОТКИ ИНТЕРФЕРОГРАММ

На рисунке 5 в качестве примера приведено пространственно-временное распределение изменения фазы $\Delta\psi(y, \lambda)$, полученное в результате применения алгоритма Фурье-анализа интерференционных картин. Данное распределение описывает изменение фазы диа-

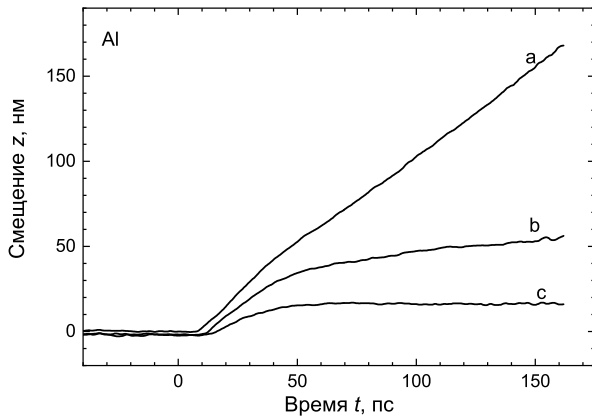


Рисунок 6. Временные профили смещения $\Delta z(t)$ в центральной a и периферийной b, c частях области взаимодействия.

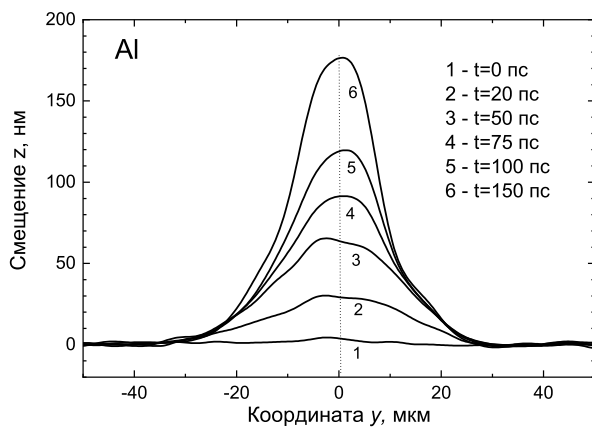


Рисунок 7. Пространственные профили деформации поверхности $\Delta z(y)$ для различных моментов времени.

гностического импульса $\Delta\psi(y, \lambda)$, вызванное деформацией тыльной поверхности алюминиевого пленочного образца толщиной 700 нм в момент прихода импульса ударного сжатия, образованного после воздействия на фронтальную поверхность мишени лазерного импульса длительностью 100 фс с пространственным гауссовым распределением интенсивности. Цветовая шкала соответствует величине изменения фазы $\Delta\psi$ в радианах. Для случая частотно-модулированного диагностического импульса изменение фазы $\Delta\psi(y, t)$ связано с величиной смещения поверхности $\Delta z(y, t)$ посредством соотношения $\Delta z(y, t) = \lambda(t)\Delta\psi(y, t)/4\pi$, где зависимость $\lambda(t)$ для частотно-модулированного диагностического импульса определяется калибровочным коэффициентом K . На рисунке 6 показаны временные профили смещения $\Delta z(t)$ в центральной (a) и периферийной (b, c) частях области взаимодействия. На рисунке 7 приведены пространственные профили деформации поверхности $\Delta z(y)$ для различных моментов времени. Погрешность измерения $\Delta\psi$ определяется амплитудой шумов. На рисунке 8 приведён фрагмент профиля $\Delta\psi(t)$ невозмущенной поверхности образца (фрагмент сечения d на рисунке 5). Среднее квадратичное отклонение для высокочастотных флуктуаций, характеризующее погрешность измерения фазы, в данном случае составила вели-

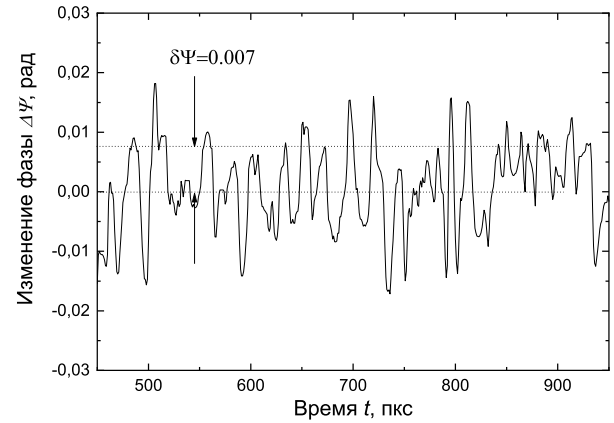


Рисунок 8. Шумовой сигнал $\Delta\psi(\lambda)$ в невозмущенной области мишени.

чину $\delta\psi \approx 0.007$ рад. При этом точность определения величины смещения поверхности составила $\delta z \approx \pm 0.5$ нм.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе на примере пленочного образца алюминия продемонстрирована интерферометрическая методика с использованием частотно-модулированных диагностических импульсов для исследования ударно-волновых явлений в металлах, вызываемых воздействием мощных фемтосекундных лазерных импульсов. Приведены результаты калибровки пространственно-временных параметров схемы измерений и способа прецизионного позиционирования мишени с точностью 1–2 мкм. Диагностическая методика обеспечивает непрерывную регистрацию движения поверхности при однократном лазерном воздействии во временном интервале 0–240 пс с временным разрешением 1 пс, пространственным разрешением в плоскости мишени 2.5 мкм, и погрешностью определения величины смещения на уровне 1 нм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ashitkov S I, Agranat M B, Kanel G I, Komarov P S and Fortov V E 2010 *JETP Lett.* **92** 516–20
2. Whitley V H, McGrane S D, Eakins D E, Bolme C A, Moore D S and Bingert J F 2011 *Appl. Phys.* **109** 013505
3. Crowhurst J C, Armstrong M R, Knight K B, Zaug J M and Behymer E M 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 144302
4. Ashitkov S I, Komarov P S, Agranat M B, Kanel G I and Fortov V E 2013 *JETP Lett.* **98** 384–88
5. Demaske B J, Zhakhovsky V V, Inogamov N A and Oleynik I I 2013 *Phys. Rev. B* **87** 054109
6. Crowhurst J C, Reed B W, Armstrong M R, Radousky H B, Carter J A, Swift D C, Zaug J M, Minich R W, Teslich N E and Kumar M 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 113506
7. Ashitkov S I, Komarov P S, Struleva E V, Agranat M B and Kanel G I 2015 *JETP Lett.* **101** 276–81
8. Abrosimov S A, Bazhulin A P, Voronov V V, Geras'kin A A, Krasnyuk I K, Pashinin P P, Semenov A Yu, Stuchebruykhov I A, Khishchenko K V and Fortov V E 2013 *Quantum Electron.* **43** 246–51
9. Krasnyuk I K, Pashinin P P, Semenov A Yu, Khishchenko K V and Fortov V E 2016 *Laser Phys.* **26** 094001
10. Inogamov N A, Zhakhovskii V, Ashitkov S, Khokhlov V, Petrov Yu V, Komarov P, Agranat M, Anisimov S and Nishihara K 2009 *Appl. Sur. Sci.* **255** 9712–16

11. Eliezer S, Moshe E and Eliezer D 2002 *Laser and Part. Beams* **20** 87–92
12. Celliers P M, Bradley D K, Collins G W and Hicks D G 2004 *Rew. Sci. Instr.* **75** 4916–29
13. Bloomquist D D and Sheffield S A 1983 *J. Appl. Phys.* **54** 1717–22
14. Temnov V V, Sokolovski-Tinten K, Zhou P and von der Linde D 2006 *J. Opt. Soc. Am. B.* **23** 1954–64
15. Gahagan K T, Moore D S, Funk D J, Reho J H and Rabie R L 2002 *J. Appl. Phys.* **92** 3679–82
16. Geindre J P, Audebert P, Rebibo S and Gauthier J C 2001 *Opt. Lett* **92** 1612–14
17. Bolme C, McGrane S, Moore D and Funk D 2008 *Proc. of SPIE.* **7005** 70050M
18. Ашитков С И, Комаров П С, Овчинников А В, и др 2013 *Квантовая электроника* **43** 242–45
19. Ахманов С А и Никитин С Ю 1998 *Физическая оптика* (Москва: Издательство Московского университета)