

ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Влияние структурных дефектов аperiodических многослойных зеркал на свойства отраженных (суб)фемтосекундных импульсов

С.А.Гарахин, Е.Н.Мельчаков, В.Н.Полковников, Н.Н.Салашенко, Н.И.Чхало

На примере модельного аperiodического многослойного Mo/Si-зеркала, предназначенного для сжатия chirпированного импульса со спектром, лежащим в диапазоне энергий фотонов 50–80 эВ, численно изучено влияние структурных дефектов, таких как межслойная шероховатость, флуктуации толщин слоев и отличие плотности пленок Mo от табличной, на амплитуду и фазу комплексного коэффициента отражения, а также на амплитуду и длительность отраженного импульса. Показано, что наиболее сильно на амплитуду и длительность отраженного импульса влияют отличие плотностей пленок Mo от табличных значений и флуктуации толщин пленок. Межслойная шероховатость оказывает сопоставимое воздействие на амплитуду коэффициента отражения, но при этом не столь сильно влияет на длительность отраженного импульса. Даже незначительные флуктуации толщин пленок могут привести к появлению дополнительных отраженных импульсов с высокой интенсивностью, задержанных по времени относительно основного. В широком диапазоне толщин пленок Mo в Mo/Si-зеркале показано, что плотность пленок при изменении их толщины от 1.5 до 5.5 нм изменяется от 0.77 до 0.97 (в долях от табличного значения для массивного молибдена). Обсуждаются ключевые проблемы, которые необходимо решить для развития технологии изготовления аperiodических многослойных зеркал с требуемыми характеристиками.

Ключевые слова: аperiodическое многослойное зеркало, фемтосекундный chirпированный импульс, комплексный коэффициент отражения, генетический алгоритм, шероховатость, преобразования Фурье.

1. Введение

В последнее время в связи с прогрессом в развитии мощных фемтосекундных лазеров наблюдается огромный интерес к генерации (суб)фемтосекундных и аттосекундных импульсов электромагнитного излучения. Такие импульсы, например, могут быть получены при когерентной генерации высоких гармоник лазерного излучения [1], при когерентном взаимодействии лазерного излучения с релятивистскими пучками заряженных частиц [2] и при взаимодействии фемтосекундных пучков лазерного излучения с твердым телом [3]. Поскольку длительность импульсов оказывается соизмеримой со «временем обращения» электронов в атоме, временами межатомных, внутриатомных, а в ряде случаев и внутриядерных, переходов, то это излучение может стать уникальным инструментом при изучении быстротекущих процессов [4–6].

Другим не менее актуальным приложением аттосекундных импульсов является получение сверхмощных электромагнитных полей и, соответственно, экстремальной плотности мощности. Как показали оценки [7], даже при использовании лазера на свободных электронах FLASH с относительно малой пиковой мощностью [8], длительностью импульса 250 фс и энергией импульса всего 1.4 мДж на длине волны 13.5 нм с помощью многослойных зеркал

нормального падения можно достичь плотности мощности в пятне фокусировки свыше 10^{21} Вт/см². Это происходит за счет нанофокусировки (дифракционный предел диаметра пятна фокусировки в области вблизи 10 нм примерно на два порядка, а площадь, следовательно, на четыре порядка меньше, чем в ИК диапазоне) и малой длительности импульса. В современных мощных лазерах энергия импульса достигает десятков джоулей, а длительность импульса приближается к единицам фемтосекунд [3]. С учетом эффективной трансформации энергии лазерных импульсов в энергию (суб)фемтосекундных и аттосекундных импульсов [9] можно ожидать уже на современном уровне развития техники генерации плотностей мощности фокусировки (суб)фемто- и аттосекундных импульсов до 10^{28} Вт/см², что близко к пороговой плотности мощности «пробоя» вакуума.

На пути успешного решения этих задач встает проблема управления такими импульсами (транспортировка пучков, коллимация и фокусировка, спектральный анализ, управление спектром и др.). Поскольку спектральная ширина Δf импульса длительностью τ_0 удовлетворяет условию $\Delta f \geq 1/\tau_0$, то его спектр лежит в области экстремального УФ (ЭУФ) и мягкого рентгеновского излучения. Для длительностей $\tau_0 = 1–100$ ас частоты лежат в диапазоне $10^{16}–10^{18}$ Гц, а длины волн – в диапазоне 0.3–30 нм. В ряде работ было показано, что одними из самых эффективных оптических элементов для решения этих задач являются периодические и аperiodические многослойные зеркала (ПМЗ и АМЗ) [10–13]. Выбор типа многослойного зеркала определяется как длительностью, так и несущей частотой импульса, например в [14] было установлено, что при длительности импульсов менее 1 фс и несущей частоте, соответствующей энергии кванта 77.6 эВ, спектр импульса становится шире спектра

С.А.Гарахин, В.Н.Полковников, Н.Н.Салашенко, Н.И.Чхало. Институт физики микроструктур РАН, Россия, Нижегородская обл., Кстовский р-н, 603087 Афонино, ул. Академическая, 7; e-mail: polkovnikov@ipmras.ru
E.N.Mel'chakov. Laboratoire Charles Fabry Institut d'Optique Graduate School 2 av. Augustin Fresnel, 91127 Palaiseau, France

Поступила в редакцию 3 марта 2017 г.

отражения Mo/Si-ПМЗ, и эффективность отражения от такой структуры начинает снижаться. Поэтому для большинства приложений представляют интерес АМЗ, у которых спектральная ширина области высокого отражения может быть увеличена по сравнению с таковой для ПМЗ в несколько раз.

Однако само по себе обеспечение широкого спектра отражения не решает проблему отражения коротких импульсов без искажения их частотных и временных характеристик. При прохождении излучения через многослойное зеркало вследствие дисперсии оптических констант различные спектральные компоненты проникают на разную глубину (как правило, высокочастотные проникают глубже в структуру), что приводит к дополнительной разности фаз отраженных спектральных компонент. Следствием этого является «расплывание» импульса. Поэтому при оптимизации структуры АМЗ, предназначенного для управления импульсом с заданными характеристиками, необходимо учитывать не только амплитуду, но и фазу каждой отраженной спектральной компоненты. Расчету АМЗ для отражения (суб)фемто- и аттосекундных импульсов посвящено большое число работ. Расчеты выполнялись для импульсов как с фиксированной, так и с переменной (чирпированные импульсы) несущей частотой. В первом случае ставилась задача сохранения неизменной формы отраженного импульса, для чего целевыми функциями выбирались равенство амплитуд и фаз коэффициентов отражения для всех спектральных компонент. Для чирпированных импульсов, несущая частота которых в пределах огибающей изменялась по определенному закону [15], ставилась задача уменьшения длительности импульса. Поэтому при формировании целевой функции на амплитуду и фазу коэффициента отражения использовались дополнительные условия, которые будут рассмотрены ниже.

Главным недостатком отмеченных выше работ является то, что расчеты были выполнены для АМЗ с идеальными структурными параметрами: нулевая межслоевая шероховатость, табличные плотности и номинальные толщины пленок. На практике эти условия не выполняются. Более того, плотность материалов пленок может зависеть от их толщины. Как было показано ранее в [16], где анализировалось влияние межслоевых шероховатостей, плотностей пленок, случайных и систематических ошибок толщин пленок на спектральную зависимость коэффициента отражения АМЗ, учет этих структурных дефектов приводит, как правило, к отличным от «идеального» случая оптимальным толщинам пленок в АМЗ. И наоборот, использование структуры АМЗ, полученного без учета шероховатости и реальных плотностей материалов пленок на практике приводит к сильному искажению спектральной зависимости коэффициента отражения по сравнению с требуемой.

В настоящей работе впервые на примере чирпированного импульса с несущей частотой, соответствующей энергии фотонов 70 эВ, и длительностью 1 фс проведен численный анализ влияния таких структурных дефектов Mo/Si-АМЗ, как межслоевая шероховатость, отличие плотностей пленок от табличных значений и флуктуации толщин пленок, на амплитуду и фазу коэффициента отражения АМЗ, а также на амплитуду и длительность отраженного импульса. Продemonстрировано сильное влияние флуктуаций толщин пленок и их плотностей на длительность и амплитуду отраженного импульса. Впервые при-

водится измеренная зависимость плотности молибденовых пленок в многослойных Mo/Si-зеркалах от толщины пленок, изменяющихся в широком диапазоне, характерном для АМЗ. Обсуждаются основные проблемы, которые необходимо решать для улучшения алгоритмов оптимизации структуры АМЗ при решении конкретных задач управления (суб)фемто- и аттосекундными импульсами электромагнитного излучения. Рассмотрение в статье чирпированных импульсов обусловлено только практическим интересом авторов к возможности сжатия импульсов и не влияет на общность результата. Аналогичные результаты были бы получены и при рассмотрении влияния структурных дефектов АМЗ на импульсы с постоянной несущей частотой.

2. Методика расчета АМЗ для сжатия чирпированных импульсов

Метод расчета формы отраженного импульса основан на преобразованиях Фурье. Сначала падающая волна посредством прямого преобразования Фурье преобразуется в спектр. Затем спектр умножается на комплексный коэффициент отражения зеркала, а далее с помощью обратного преобразования Фурье находится отраженный импульс.

В настоящее время нет прямого доступа к программному обеспечению, позволяющему рассчитать состав оптимальной структуры для заданной формы отраженного импульса. Поэтому, вслед за авторами [17], для решения этой задачи мы задавали две целевые функции: профили амплитуды и фазы коэффициента отражения для каждой спектральной компоненты. Для расчета применялась программа IMD [18]. На первом этапе в качестве целевого профиля для амплитуды коэффициента отражения выбирался прямоугольный профиль (плато), ограниченный энергиями фотонов ϵ_{\min} и ϵ_{\max} , а подгоночными параметрами служили толщины слоев в АМЗ. Расчеты были проведены для Mo/Si-АМЗ, наиболее часто используемого в ЭУФ диапазоне. Кроме того, дополнительным параметром являлось число периодов (бислоев) в образце. Первый от подложки слой состоял из кремния, последний – из молибдена. Исходным для первого шага являлось Mo/Si-ПМЗ с максимумом отражения на частоте ω_0 .

На следующем этапе в качестве второго целевого профиля выбиралась квадратичная зависимость фазы амплитудного коэффициента отражения от энергии фотонов. Как было показано в [17], квадратичная зависимость фазы от энергии позволяет подобрать такие параметры АМЗ, при которых отраженный импульс будет сжат по времени, причем степень сжатия может достигать 10.

После оптимизации фазы, как правило, искажалось плато коэффициента отражения структуры. Поэтому следующим шагом была корректировка плато. Исходной для этого шага являлась структура, полученная на предыдущем этапе. После каждого цикла оптимизации структуры АМЗ по коэффициенту отражения и фазе с использованием фурье-преобразования проверялась форма отраженного импульса. Процедура оптимизации амплитуды и фазы коэффициента отражения повторялась до тех пор, пока длительность отраженного импульса либо не достигала заданного значения, либо переставала изменяться.

Для определенности обратимся к задаче сжатия импульса с длительностью 1 фс и амплитудой E_0 (рис.1).

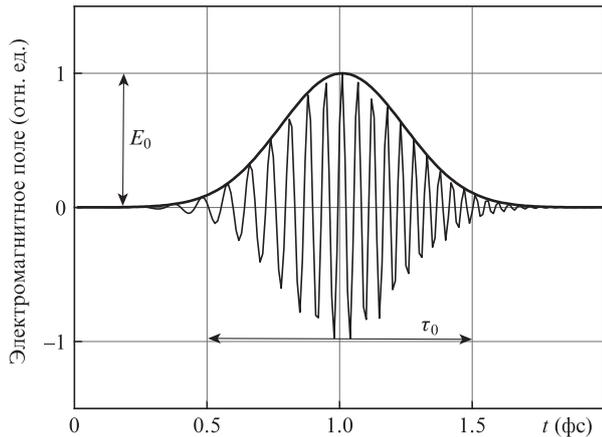


Рис.1. Начальный гауссов чирпированный импульс с амплитудой E_0 и длительностью τ_0 . Длительность импульса определяется по уровню 10% от максимальной величины поля.

Рассмотрим случай, когда фаза гауссова импульса изменяется во времени по квадратичному закону:

$$E(t) = E_0 \exp[-\Gamma t^2 + i(\omega_0 t - at^2)], \quad (1)$$

где форма огибающей определяется длительностью τ_0 , взятой по уровню 10% от амплитуды импульса, коэффициентом $\Gamma = \tau_0^{-2}$ и величиной a , характеризующей параметр чирпа. В нашем случае $\tau_0 = 1$ фс и $a = 10$ фс⁻².

Итогом стала рассчитанная структура АМЗ, которая максимально соответствовала обоим целевым профилям. На рис.2 приведены зависимости толщин слоев Мо и Si для этого АМЗ от номера слоя (нумерация ведется от поверхности к подложке). Толщины слоев Мо и Si находятся в диапазонах 2.1–5.2 нм и 3.9–8.7 нм соответственно, а число слоев равно 80. На рис.3 представлены спектры квадрата амплитуды и фазы коэффициента отражения идеального (без структурных дефектов) Мо/Si-АМЗ, рассчитанные указанным выше способом. Видно, что средний коэффициент отражения составил около 15%, при этом плато коэффициента отражения сильно искажилось в области низких энергий. Зависимость фазы коэффициента отражения от энергии близка к квадратичной.

Сравнение импульсов падающего на рассчитанное АМЗ и отраженного от него излучения приведено на рис.4. При падении на зеркало импульса с длительностью 1 фс и

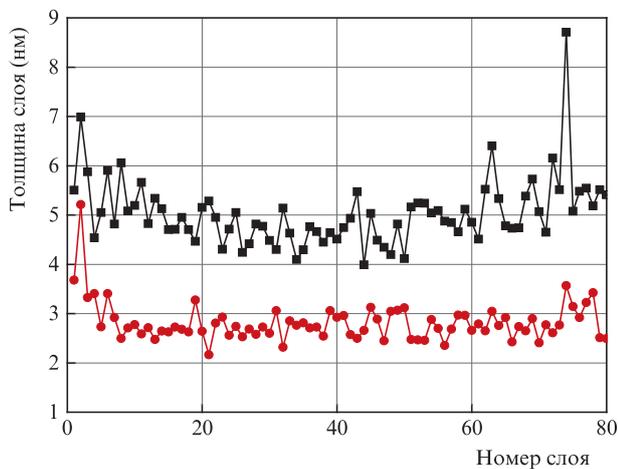


Рис.2. Зависимости толщин слоев Мо (●) и Si (■) для оптимизированного АМЗ от номера слоя.

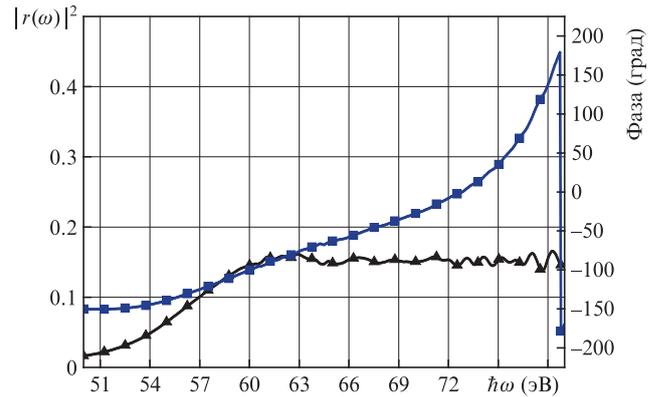


Рис.3. Квадрат амплитуды $|r(\omega)|^2$ (▲) и фаза (■) коэффициента отражения Мо/Si-АМЗ, оптимизированного на максимальное равномерное отражение в области 60–80 эВ, при сжатии чирпированного импульса.

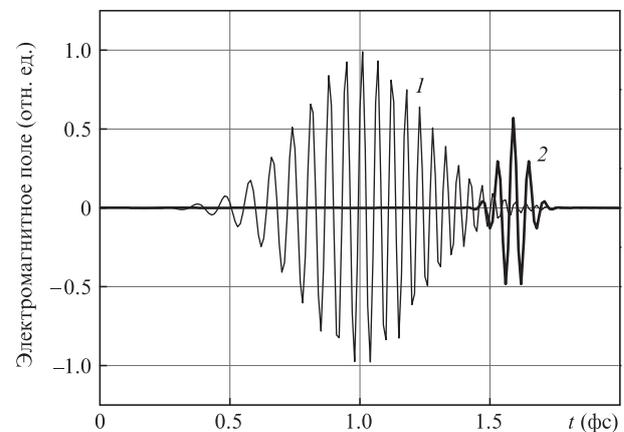


Рис.4. Сравнение полей падающего на идеальное АМЗ (1) и отраженного от него (2) импульсов.

амплитудой E_0 отраженный импульс имеет амплитуду, равную $0.57E_0$, и длительность 0.24 фс. Таким образом, даже при среднем энергетическом коэффициенте отражения 15% за счет уменьшения длительности импульса в четыре раза амплитуда отраженного импульса составляет 57% от амплитуды падающего. При этом мощность электромагнитного поля возросла более чем в два раза.

3. Влияние структурных дефектов АМЗ на коэффициент отражения и характеристики отраженного импульса

В реальных условиях невозможно создать АМЗ с идеальной структурой – неизбежно будет присутствовать случайное отклонение толщин слоев (флуктуации) от расчетных значений. Кроме того, в реальной многослойной структуре имеются межслойные переходные границы, которые в дальнейшем будем называть шероховатостью, а пленки имеют плотность, отличную от табличной. Как уже отмечалось, в [16] рассматривалось влияние детерминированных и случайных отклонений толщин пленок от номинальных значений, а также межслойных шероховатостей на спектральные зависимости коэффициентов отражения АМЗ и было показано, что эти дефекты заметным образом влияют на вид спектральной кривой отражения и должны учитываться при расчете структуры АМЗ.

В данном разделе рассматривается влияние таких дефектов внутренней структуры АМЗ, как отклонение плотности пленок молибдена, межслоевые шероховатости и флуктуации толщин, на амплитудно-фазовые характеристики коэффициента отражения, а также на амплитуду и длительность отраженных импульсов.

3.1. Влияние шероховатости

Среднеквадратичные шероховатости для периодических Mo/Si-зеркал, оптимизированных для ЭУФ диапазона, хорошо изучены [19, 20]. Практически все исследования показывают, что шероховатость границы Mo на Si составляет 1.2 нм, а границы Si на Mo – 0.6 нм. В дальнейших расчетах мы использовали эти значения.

На рис.5,а и б показаны расчетные спектральные зависимости квадрата амплитуды и фазы коэффициента отражения АМЗ, толщины слоев которого представлены на рис.2. Из рис.5,а видно, что в хорошем соответствии с расчетами [16] шероховатость приводит как к снижению коэффициента отражения, так и к изменению формы спектральной зависимости коэффициента отражения. При этом шероховатость, как следует из рис.5,б, оказывает незначительное воздействие на фазу коэффициента отражения.

Отраженный импульс имеет чуть большую длительность и в полтора раза меньшую амплитуду по сравнению с импульсом, отраженным от идеальной структуры: 0.28 фс и $0.39E_0$ соответственно (табл.1).

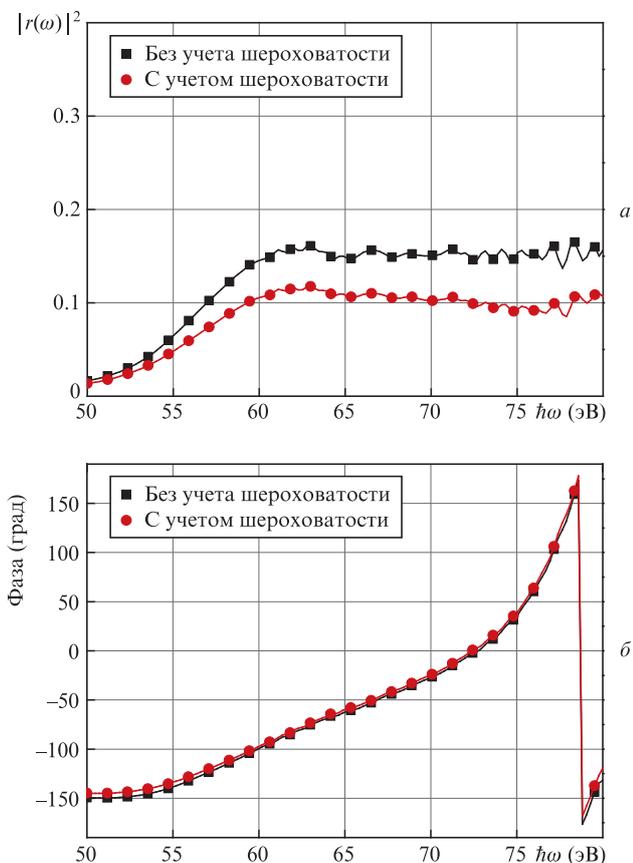


Рис.5. Влияние межслоевой шероховатости (0.6 нм для границы Mo на Si и 1.2 нм для границы Mo на Si) на квадрат амплитуды (а) и фазу (б) комплексного коэффициента отражения АМЗ.

Табл.1. Влияние шероховатости, случайного разброса толщин слоев и отличной от табличной плотности слоев Mo на основные параметры отраженного импульса.

Структурные дефекты	Амплитуда поля	Длительность (фс)
Идеальная структура	$0.57E_0$	0.24
Шероховатость	$0.39E_0$	0.28
Случайный разброс толщин	$0.37E_0$	0.35
Отличие плотности пленок Mo от табличной	$0.33E_0$	0.31

Таким образом, шероховатость в наибольшей степени влияет на амплитуду отраженной волны и в существенно меньшей степени на длительность импульса.

3.2. Влияние флуктуаций толщин пленок

Вторым фактором, влияющим на параметры отраженного импульса, являются случайные ошибки (флуктуации) толщин пленок в АМЗ. Практика показывает, что в случае применения технологии магнетронного распыления к случайным ошибкам приводят флуктуации напряжений на магнетронах и токов разряда, а также давления рабочего газа.

Для имитации данного эффекта при расчетах по программе IMD используется функция следующего вида:

$$z'_j = z_j + \delta z \cdot \text{RANDOM}(\text{seed}), \tag{2}$$

где z_j – номинальная толщина j -го слоя в АМЗ; оператор $\text{RANDOM}(\text{seed})$ подчиняется нормальному распределению со средним значением, равным нулю, и единичным стандартным отклонением; параметр $\delta z = 0.1$ нм (значение, характерное для напыления ПМЗ методом магнетронного распыления). Среднеквадратичная шероховатость межслоевых границ полагалась равной нулю.

На рис.6,а и б приведены результаты расчета влияния флуктуаций толщин на амплитудно-фазовые характеристики коэффициентов отражения АМЗ. Для наглядности на рисунках представлены характерные (выбранные из двухсот) реализации, соответствующие «выпадающим» кривым и случаю максимального сгущения кривых. Поскольку вероятность реализации крайних, наиболее влияющих на спектр вариантов мала, для анализа влияния флуктуаций толщин на параметры отраженного сигнала мы взяли именно средний случай. Стоит отметить, что флуктуации толщин существенно влияют как на амплитуду, так и на фазу комплексного коэффициента отражения, что в итоге сказывается на амплитуде и длительности отраженного импульса: $0.37E_0$ и 0.35 фс соответственно (табл.1). Таким образом, флуктуации толщин играют более существенную роль нежели шероховатость, особенно с точки зрения длительности отраженного импульса.

Строго говоря, величина поля на уровне 10% от амплитуды отраженного импульса достигается при нескольких значениях времени – настолько сильно расплывается во времени сигнал. Это можно наблюдать на рис.7. Значение 0.35 фс взято для первого пересечения огибающей импульса с уровнем 10%. Флуктуации толщин слоев приводят к расплыванию отраженного импульса. Длительность сигнала значительно возрастает, а пиковая мощность па-

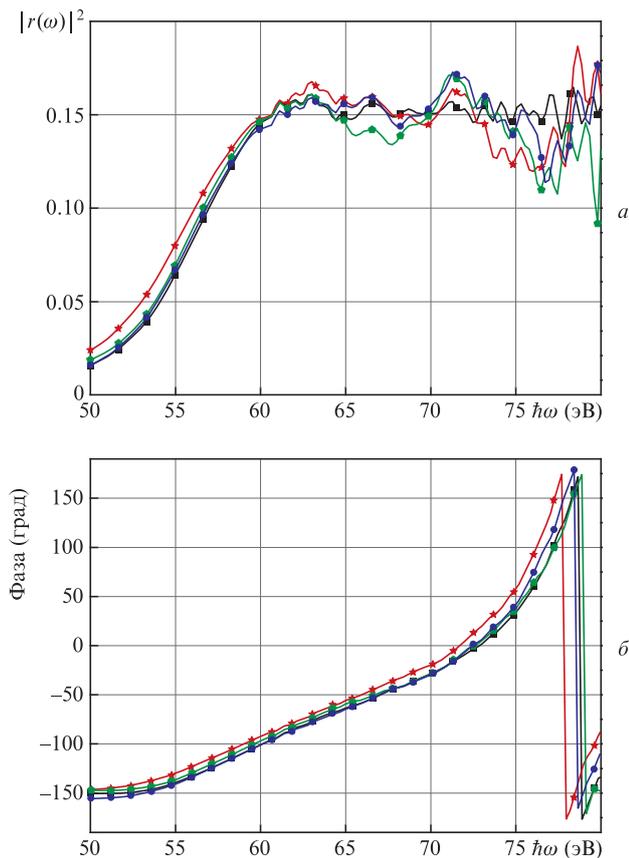


Рис.6. Влияние флуктуаций толщин пленок на амплитудно-фазовые характеристики коэффициента отражения АМЗ. Приведены характерные реализации, соответствующие «выпадающим» кривым и случаю их максимального сгущения. Средней реализации соответствует кривая с квадратными символами. Цветной вариант рис.6 помещен на сайте нашего журнала <http://www.quantum-electron.ru>.

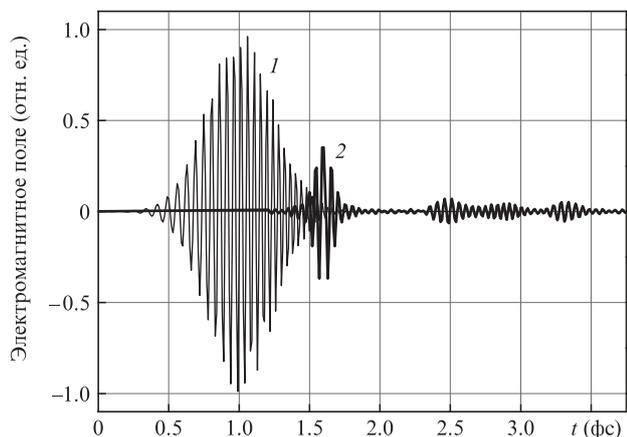


Рис.7. Сравнение полей падающего импульса (1) и импульса, отраженного от АМЗ (2), в котором смоделирован случайный разброс толщин слоев.

дает. Это является наиболее серьезным следствием флуктуаций толщин слоев, составляющих АМЗ.

3.3. Влияние плотности пленок молибдена

Третьим фактором, влияющим на коэффициенты отражения многослойных зеркал, является отличие плотностей тонких пленок от табличных значений для массивных материалов. Из анализа характеристик ПМЗ извест-

но, что в случае классических зеркал, состоящих из материалов с сильно различающимися атомными номерами, наибольшее влияние на коэффициенты отражения оказывает плотность тяжелого (рассеивающего) материала, в то время как плотность легкого материала примерно равна табличному значению. Также известно, что плотность пленок рассеивающего материала зависит от их толщины [21]. В наибольшей степени эта проблема изучена для Мо/Si-зеркал, предназначенных для спектральной области вблизи 13.5 нм [22, 23]. Однако такие исследования проведены для узкого диапазона толщин пленок молибдена. Для АМЗ диапазон толщин существенно шире, что потребовало дополнительных исследований.

Для этих целей использовался набор Мо/Si-ПМЗ с неизменной толщиной пленок кремния h_{Si} и изменяемой в диапазоне 1.5–5.5 нм толщиной пленок молибдена h_{Mo} . Образцы изготавливались методом магнетронного распыления в атмосфере аргона при давлении 1×10^{-3} Тор. Подробнее условия роста Мо/Si-ПМЗ описаны в [24]. Подложками служили кремниевые пластины для микроэлектронной промышленности с эффективной шероховатостью 0.3 нм, измеренной методами атомно-силовой микроскопии и малоуглового отражения рентгеновского излучения с применением оборудования и методов, описанных в [25, 26].

Структурные параметры образцов определялись методом подгонки экспериментальных угловых зависимостей коэффициентов отражения излучения с длиной волны 0.154 нм к расчетным. Измерения проводились на четырехкристальном высокоразрешающем дифрактометре PANalytical X’Pert Pro [18]. Для уменьшения числа параметров и, соответственно, повышения точности измерений по форме кривой отражения для дальнейшей обработки отбирались образцы, у которых отсутствовали флуктуации и систематические изменения периода (образцы определялись по отсутствию уширения брэгговских пиков отражения). Параметрами подгонки служили период, толщины пленок в периоде h_{Si} и h_{Mo} и межслоевые шероховатости на различных границах. Пример такой подгонки приведен на рис.8. Из анализа различных реализаций погрешность измерений плотности молибдена можно оценить в $\pm 2\%$. Результаты измерений показаны на рис.9.

Как следует из рис.2, в рассчитанном нами АМЗ для сжатия фемтосекундного импульса толщины пленок молибдена меняются от 2.1 до 5.2 нм. Согласно рис.9 плот-

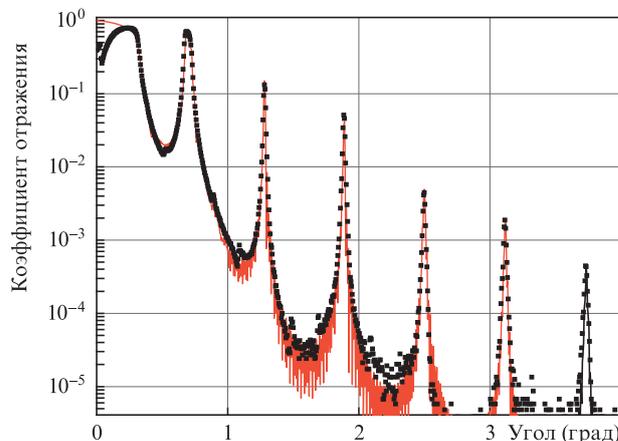


Рис.8. Пример подгонки результатов малоугловой рентгеновской дифракции для Мо/Si-ПМЗ. Точки – экспериментальные данные, сплошная кривая – результат теоретической подгонки.

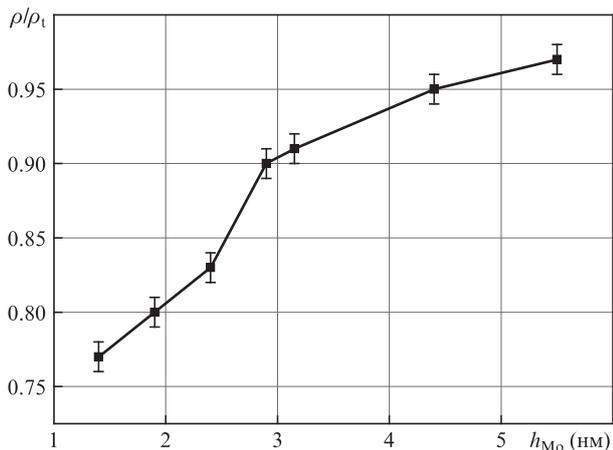


Рис.9. Зависимость плотности пленок Мо ρ , нормированной на табличное значение ρ_t , от толщины пленки в Mo/Si-ПМЗ.

ность пленок Мо меняется в пределах 0.77–0.97 от табличного значения, поэтому для корректного расчета необходимо варьировать не только толщины пленок молибдена, но и их плотность в зависимости от толщины. Однако задача оптимизации структуры с таким большим набором параметров на сегодняшний день никем не решена. Поэтому для оценки влияния плотности слоев молибдена на амплитуду и фазу комплексного коэффициента отражения АМЗ мы рассмотрели случаи, когда плотности каждого слоя конкретного АМЗ одинаковы, но различаются для разных АМЗ. На рис.10, *a* и *b* приведе-

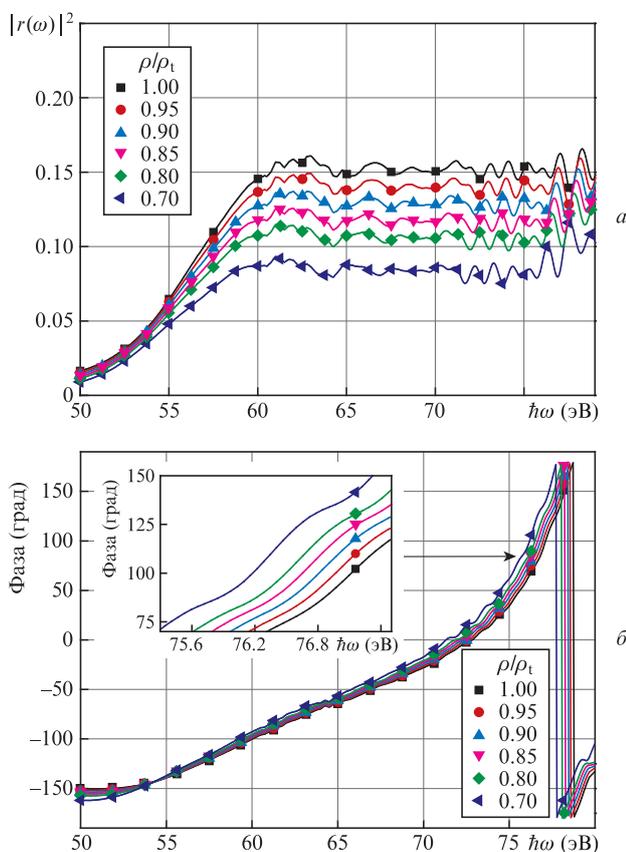


Рис.10. Влияние отличия плотности молибдена от табличного значения на квадрат амплитуды (*a*) и фазу (*b*) комплексного коэффициента отражения АМЗ. Цветной вариант рис.10 помещен на сайте нашего журнала <http://www.quantum-electron.ru>.

ны результаты расчета для плотностей молибдена 1, 0.95, 0.9, 0.85, 0.8 и 0.7 от табличного значения. Видно, что отклонение плотности пленок молибдена от табличной сказывается как на фазе, так и на амплитуде коэффициента отражения. При этом с увеличением отклонения отличие от идеального случая возрастает. В частности, уменьшение плотности на 10% приводит почти к двукратному снижению амплитуды отраженного импульса и к увеличению его длительности почти в полтора раза (см. табл.1). А если учесть, что в пределах одного АМЗ, в зависимости от толщины пленок, плотности пленок Мо меняются в диапазоне 77%–97% от табличного значения, то можно с уверенностью сказать, что расчетные и экспериментальные характеристики АМЗ будут сильно различаться. Таким образом, для адекватного расчета оптимальной структуры АМЗ нужно учитывать зависимость плотности пленок от их толщины непосредственно в процессе оптимизации.

4. Заключение

В настоящей работе впервые на примере модельного Mo/Si-АМЗ, предназначенного для сжатия chirпированного импульса, численно изучено влияние структурных несовершенств АМЗ, таких как межслоевая шероховатость, флуктуации толщин слоев и отличие плотности пленок Мо от табличной, на амплитуду и фазу комплексного коэффициента отражения, а также на амплитуду и длительность отраженного импульса. В рамках проведенного анализа были получены следующие результаты.

Во-первых, показано, что наиболее сильно на амплитуду и длительность отраженного импульса влияют отличие плотностей пленок Мо от табличных значений и флуктуации толщин пленок. Межслоевая шероховатость оказывает сопоставимое воздействие на амплитуду коэффициента отражения, но при этом не столь сильно влияет на длительность импульса, увеличивая ее примерно на 10%.

Во-вторых, при практическом применении АМЗ флуктуации толщин пленок даже на уровне 1% от толщины слоя могут привести к сильному негативным последствиям, в частности к появлению дополнительных импульсов с высокой интенсивностью, задержанных по времени относительно основного. Поэтому для совершенствования технологии изготовления АМЗ необходимо развивать методики, которые позволят в лабораторных условиях изучать спектральные зависимости амплитуды и фазы коэффициента отражения, с тем чтобы предсказать влияние АМЗ на характеристики отраженного импульса.

В-третьих, сильное влияние плотности пленок Мо на интенсивность и длительность отраженных импульсов вместе с зависимостью плотности пленок от их толщины обуславливает непредсказуемость свойств АМЗ, рассчитанных без учета этого фактора. Поэтому актуальной задачей ближайшего будущего является разработка алгоритмов (программ) оптимизации структуры АМЗ, которые бы учитывали эту зависимость.

В-четвертых, впервые в широком диапазоне толщин (1.5–5.5 нм) пленок Мо в Mo/Si-ПМЗ измерена зависимость их плотности от толщины. Показано, что при изменении толщины от 1.5 до 5.5 нм плотность изменяется от 0.77 до 0.97 (в долях от табличного значения для массивного молибдена). Этот результат представляет интерес не только для АМЗ, но и для ПМЗ, предназначенных для работы в длинноволновой части ЭУФ диапазона ($\lambda > 13.5$ нм),

когда толщины молибденовых пленок в ПМЗ и АМЗ сопоставимы.

Работа поддержана Программой Президиума РАН «Экстремальное лазерное излучение: физика и фундаментальные приложения», грантом РФФИ №17-52-150006, а также грантом РНФ–DFG №16-42-01034 в части экспериментального определения зависимости плотности пленок молибдена от их толщины.

1. Иванов А.А., Алфимов М.В., Желтиков А.М. *УФН*, **174** (7), 743 (2004).
2. Luo W., Yu T.P., Chen V. *Opt. Express*, **23** (6), 7732 (2015).
3. Yeung M., Rykovanov S., Bierbach J. *Nat. Photonics*, **11**, 32 (2017).
4. Крюков П.Г. *УФН*, **185** (8), 817 (2015).
5. Squier J.A., Muller M., Brakenhoff G.J., et al. *Opt. Express*, **3** (9), 315 (1998).
6. Hentschel M., Kienberger R., Spielmann Ch., et al. *Nature*, **414**, 509 (2001).
7. Барышева М.М., Пестов А.Е., Салашенко Н.Н. и др. *УФН*, **182** (7), 727 (2012).
8. Saldin E.L., Schneidmiller E.A., Yurkov M.V. *New J. Phys.*, **12**, 035010 (2010).
9. Bourassin-Bouchet C., de Rossi S., Wang J. *New J. Phys.*, **14**, 023040 (2012).
10. Lin C.-Y., Yin L., Chen S.-J., et al. *Chin. Phys. B*, **25** (9), 097802 (2016).
11. Morlens A.-S., Balcou P., Zeitoun P., et al. *Opt. Lett.*, **30** (12), 1554 (2005).
12. Wonisch A., Neuhäusler U., Kabachnik N.M., et al. *Appl. Opt.*, **45** (17), 4147 (2006).
13. Guggenmos A., Hofstetter M., Rauhut R., et al. *Proc. SPIE*, **8502**, 850204 (2012).
14. Бейгман И.Л., Пирожков А.С., Рагозин Е.Н. *Письма в ЖЭТФ*, **74** (3), 167 (2001).
15. Ragozin E.N., Kondratenko V.V., Levashov V.E., et al. *Proc. SPIE*, **4782**, 176 (2002).
16. Гайкович П.К., Полковников В.Н., Салашенко Н.Н. и др. *Квантовая электроника*, **46** (5), 406 (2016).
17. Beigman I.L., Pirozhkov A.S., Ragozin E.N. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, **4** (4), 443 (2002).
18. Windt D.L. *Comput. Phys.*, **12** (4), 360 (1998).
19. Aquila A.L., Salmassi F., Dollar F., et al. *Opt. Express*, **14** (21), 10073 (2006).
20. Kuhlmann T., Yulin S., Feigl T., et al. *Proc. SPIE*, **4782**, 196 (2002).
21. Chernov V.A., Chkhalo N.I., Fedorchenko M.V., et al. *J. X-Ray Sci. Technol.*, **5** (4), 389 (1995).
22. Stearns M.B., Chang C., Stearns D.G. *J. Appl. Phys.*, **71**, 187 (1992).
23. Andreev S.S., Gaponov S.V., Gusev S.A. *Thin Solid Films*, **415**, 123 (2002).
24. Andreev S.S., Akhsakhalyan A.D., Bibishkin M.A. *Centr. Eur. J. Phys.*, **1**, 191 (2003).
25. Chkhalo N.I., Churin S.A., Pestov A.E., et al. *Opt. Express*, **22** (17), 20094 (2014).
26. Chkhalo N.I., Salashchenko N.N., Zorina M.V. *Rev. Sci. Instrum.*, **86**, 016102 (2015).