

УДК 535.211, 535.217

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТОНКИХ ПЛЁНОК МОЛИБДЕНА НА ПРОЦЕСС ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ

© С. Д. Полетаев

ИСОИ РАН — филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,
443001, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 151
E-mail: sergpolet@gmail.com

В работе путём численного моделирования исследовано влияние изменения теплофизических свойств плёнки молибдена при промежуточном окислении в процессе лазерной абляции на размерный эффект формирования трека. В соответствии с полученными данными произведено уточнение гипотезы, объясняющей сокращение ширины трека в зоне абляции плёнки по сравнению с эффективным диаметром лазерного пучка. Показано, что специфическое изменение коэффициента теплопроводности вещества в момент окисления оказывает значительное влияние на распределение температурного поля, выражаемое в сужении характеристики распределения температуры по поверхности плёнки, что ранее не рассматривалось. Установлено, что изменения плотности, удельной теплоёмкости и теплового эффекта химической реакции окисления молибдена в процессе окисления плёнки не оказывают существенного влияния на распределение температуры в зоне воздействия лазерного пучка.

Ключевые слова: моделирование COMSOL, тонкие плёнки, лазерная абляция, дифракционная решётка, разрешающая способность.

DOI: 10.15372/AUT20220512

Введение. В настоящее время прямая лазерная запись широко применяется для создания различных изделий микро- и нанотехнологий, таких как фотошаблоны для литографии [1, 2], интегральные схемы [3, 4], микрооптические устройства [5–8]. Одним из направлений в этой области исследований является формирование микрорельефа в тонких металлических плёнках путём абляции (удаления) вещества под действием сфокусированного лазерного излучения. Полученные микроструктуры могут быть использованы как самостоятельные оптические элементы, так и в качестве масок для последующего селективного травления целевого материала. Однако для создания дифракционных оптических элементов видимого диапазона длин волн необходимы микроструктуры с частотой штрихов более 500 мм^{-1} . Разрешение же прямой лазерной записи недостаточно для изготовления таких микроструктур вследствие дифракционного предела.

Преодолеть существующие ограничения возможно за счёт поиска условий нелинейного взаимодействия лазера и материала, позволяющего избирательно использовать максимум гауссового распределения интенсивности излучения в фокальном пятне [6, 9]. В [10] экспериментально показано, что в этом отношении могут быть перспективны тонкие плёнки молибдена. Была исследована лазерная абляция молибденовых плёнок толщиной менее 50 нм при интенсивности излучения $1\text{--}10 \text{ МВт/см}^2$. Особенность результата заключалась в трёхкратном уменьшении зоны абляции по сравнению с исходным диаметром фокального пятна (0,8 мкм). Предполагалось, что этот эффект связан с промежуточным окислением металла [11]. Согласно полученным результатам моделирования образование оксида в центральной зоне воздействия лазерного пучка приводит к значительному повышению температуры в области воздействия фокального пятна. Модель учитывала изменение теплофизических параметров, соответствующее переходу от молибдена к его оксиду, однако

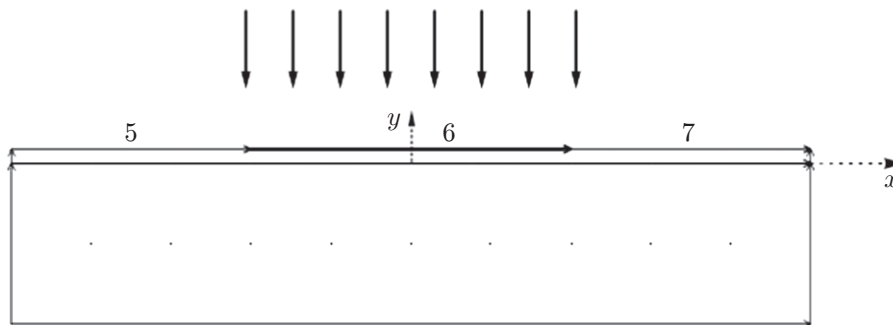


Рис. 1. Моделируемая система

подробно их влияние на распределение температуры в зоне воздействия лазерного пучка не рассматривалось. Также предполагалось, что изменение теплофизических свойств плёнки в процессе окисления может способствовать появлению нелинейного температурного эффекта, приводящего к существенному сокращению ширины трека в плёнке.

Для развития экспериментальных исследований в данной области необходим дальнейший поиск возможных тепловых эффектов и закономерностей методом моделирования. В представленной работе численно исследовано влияние изменений теплофизических характеристик тонкой плёнки молибдена в процессе окисления на распределение температуры при локальном воздействии лазерного излучения с плотностью мощности порядка $\sim 10 \text{ МВт/см}^2$.

Метод и постановка задачи. На рис. 1 показана моделируемая система, которая представляет собой фрагмент подложки плавленного кварца, покрытой плёнкой металла. Граница 6 соответствует участку, подвергаемому воздействию круглого пятна лазерного излучения с гауссовым профилем интенсивности относительно начала координат с характеристиками, соответствующими станции лазерной записи CLWS-200 [11, 12]. Под действием лазерного излучения плёнка испаряется, формируя трек, ширина которого определяется длительностью воздействия и интенсивностью излучения в фокальном пятне. Подложка и плёнка имеют размеры $4000 \times 600 \text{ нм}$ и $4000 \times 35 \text{ нм}$ соответственно. В рамках данной работы будет исследовано предполагаемое влияние изменения теплофизических характеристик плёнки в процессе промежуточного окисления молибдена на возникновение эффекта сокращения ширины трека по сравнению с эффективным диаметром пятна лазерного излучения.

Численный эксперимент, реализующий решение задачи, проводился в программной среде COMSOL Multiphysics v.5.2 (COMSOL) с физическим модулем Heat Transfer With Surface to Surface Radiation. Этот модуль используется для моделирования теплопередачи за счёт проводимости, конвекции и излучения, включая излучение от поверхности к поверхности.

Химическая реакция окисления молибдена приводит к скачкообразному изменению теплофизических параметров и соответствующему появлению межфазной границы металл — оксид. Поэтому моделирование проводилось методом сквозного счёта со сглаживанием коэффициентов, которыми в задачах теплопроводности являются теплофизические характеристики: плотность, удельная теплоёмкость, коэффициент теплопроводности. Метод сквозного счёта не выделяет границу фаз и применяет уравнение теплопроводности для всей расчётной области. При этом исходная задача представляется программой в виде единого уравнения с разрывными коэффициентами (теплофизическими параметрами) на межфазной границе. Для реализации численного метода решения задачи проводится процедура сглаживания разрывных коэффициентов в области межфазного перехода. При

Константы

Параметр	Значение
Радиус фокального пятна r_0 , мкм	0,8
Начальный коэффициент поглощения (A_0)	0,4
Плотность мощности в центре пучка (Q_0), Вт/м ²	$2,0 \cdot 10^9$
Температура фазового перехода (окисления), К	870
Интервал аппроксимации фазового перехода, К	10
Начальный термооптический коэффициент \varkappa , К ⁻¹	$3,0 \cdot 10^{-5}$
Теплота образования оксида молибдена (H), кДж/кг	5000

этом ступенчатая область межфазного перехода заменяется линейной функцией, крутизна которой определяется заданным интервалом ΔT . Чем меньше заданная величина интервала ΔT , тем точнее определяется положение границы. Однако слишком малое значение ΔT может вызвать проблему сходимости решения задачи.

Алгоритм расчёта основан на решении дифференциальных уравнений теплопроводности в частных производных методом конечных элементов [13]. Порядок постановки и решения задачи в данной программной среде уже рассматривался в [11].

Основные допущения модели:

1. Динамика развития химической реакции окисления молибдена с ростом температуры не учитывалась, поскольку ключевое значение при этом имеет лишь факт изменения теплофизических свойств материала.

2. Зависимость тепловых характеристик материалов не учитывалась, поскольку в интервале температур 300–900 К их изменения незначительны (в пределах 10 %).

Гипотеза, объясняющая эффект сокращения ширины трека по сравнению с эффективным диаметром лазерного пучка, отводит ключевую роль промежуточному процессу окисления молибдена. Поэтому задача учитывает фазовый переход металл — оксид при температуре окисления 870 К. В таблице приведены заложенные в модель константы. В COMSOL версии 5.x граничные условия, свойства доменов и границ задаются через дополнительные субмодули или интерфейсы. Доменами в COMSOL являются физические элементы геометрии (в данном случае плёнка и подложка). Теплофизические свойства кварцевой подложки (плотность, удельная теплоёмкость, коэффициент теплопроводности) [14] задавались в модуле Materials и вызывались в интерфейсе Heat Transfer in Solids.

Задание всех необходимых разрывных коэффициентов для расчёта в области плёнки проводилось четырьмя ступенчатыми функциями в разделе Parameters. Три из них обеспечивали изменение теплофизических параметров (плотность, теплоёмкость, коэффициент теплопроводности) в момент окисления при температуре 870 К. Четвёртая функция предназначалась для симуляции теплового эффекта химической реакции окисления молибдена, который также является разрывным коэффициентом, изменяющимся в момент окисления плёнки. Здесь зависимой величиной от температуры является объёмное тепловыделение, выражаемое формулой

$$Q = H\rho, \quad (1)$$

где H — теплота образования оксида молибдена (MoO_3) из простых веществ, кДж/кг, ρ — плотность оксида молибдена, кг/м³.

Объёмное тепловыделение после начала окисления задавалось постоянным во времени, что упрощает настройки и при этом позволяет рассмотреть крайний случай, когда взаимодействие лазерного излучения с плёнкой сопровождается дополнительным непрерывным точечным источником тепла.

С целью сглаживания разрывных коэффициентов задавался интервал линеаризации функции ΔT . Предварительный эксперимент показал, что значение $\Delta T = 10$ К обеспечивает сходимость решения задачи. Функция теплового эффекта вызывалась в дополнительном интерфейсе Heat Source теплового модуля. Данный интерфейс предназначен для активации дополнительного источника тепла различной природы внутри моделируемой геометрии. Отметим, что выражение физических величин через ступенчатую функцию позволяет определить область действия необходимого интерфейса. В данном случае функция теплового эффекта задаёт работу интерфейса Heat Source, начиная лишь с температуры окисления.

Для участков плёнки, находящихся в контакте с окружающей средой (границы 5, 7), учитывался общий тепловой поток. При необходимости может быть учтён только один вид теплопередачи. Граница 6 создавалась для задания лазерного воздействия в виде гауссового закона распределения интенсивности излучения на поверхности плёнки:

$$Q(r) = A Q_0 e^{-x^2/2r^2}, \quad (2)$$

где Q_0 — интенсивность лазерного излучения в центре фокального пятна, r — радиус фокального пятна (по уровню 0,1), x — текущая координата в пределах r .

Температурная зависимость коэффициента поглощения плёнки

$$A = A_0 + \varkappa T, \quad (3)$$

где A_0 — коэффициент поглощения плёнки при $T = 300$ К ($A_0 = 0,4$), \varkappa — термооптический коэффициент плёнки, T — текущая температура.

Константы r , Q_0 и выражение (2) задавались в интерфейсе Variables модуля Definitions. Отметим, что в COMSOL версии 5.x все выражения также могут задаваться в интерфейсе Variables, а затем вызываться в соответствующем физическом модуле.

Расчёт проводился времязависимым решателем Time dependent для времени t в диапазоне 0,2–10 мкс с шагом 0,1 мкс. Выбранный временной диапазон позволяет наблюдать возникающие тепловые эффекты по мере нагревания плёнки.

Результаты и обсуждение. На рис. 2 представлены зависимости температуры плёнки от времени воздействия лазерного излучения при неизменных теплофизических параметрах, а также при пятикратном изменении удельной теплоёмкости и плотности вещества в момент окисления. При неизменных теплофизических параметрах температура растёт линейно на полном временном отрезке (график 1). Уменьшение плотности вещества в 5 раз (график 2) приводит к незначительному изменению угла наклона графика в момент окисления. Расчёты показали, что даже десятикратное изменение плотности не приводит к дальнейшему заметному увеличению угла наклона графика. Увеличение теплоёмкости (c) приводит к небольшому снижению динамики роста температуры. Так, при двукратном увеличении c максимальное значение температуры снижается на 30 К в момент $t = 10$ мкс по сравнению с линейным графиком. Пятикратное увеличение c приводит к снижению температуры до ~ 100 К (график 4). Пятикратное уменьшение теплоёмкости после окисления не приводит к существенному отличию от графика 2. Отметим, что интерес представляют такие значения теплофизических параметров, которые ускоряют динамику роста температуры, что может способствовать выявлению тепловых эффектов, отвечающих поставленной задаче. В данном случае увеличение теплоёмкости в процессе окисления замедляет динамику, а кратное снижение приводит лишь к незначительному росту температуры. Аналогичный эффект оказывает изменение плотности вещества.

На рис. 3 показаны зависимости температуры от времени воздействия лазерного излучения при различных значениях коэффициента теплопроводности (k). Уменьшение коэффициента приблизительно в 2 раза приводит к заметному нарастанию температуры в

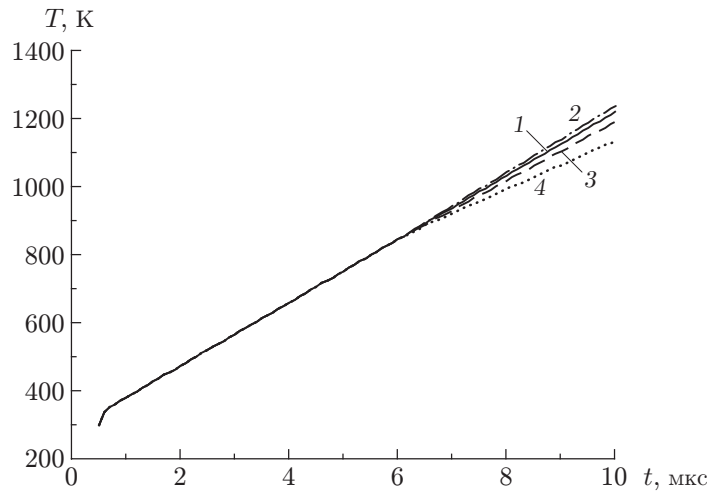


Рис. 2. Зависимости температуры плёнки от времени воздействия лазерного излучения: 1 — $(\rho, c, k, \varkappa) = \text{const}$, 2 — пятикратное уменьшение ρ , 3 — двукратное увеличение c , 4 — пятикратное увеличение c ; $x = 0$, $y = 45$ нм

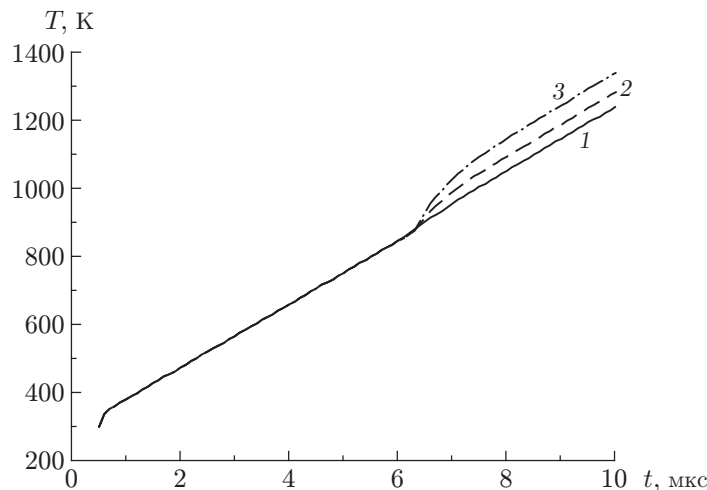


Рис. 3. Зависимости температуры плёнки от времени воздействия лазерного излучения при различных коэффициентах теплопроводности: 1 — $k_1 = 65$, 2 — $k_2 = 25$, 3 — $k_3 = 10$ Вт/(м·К); $x = 0$, $y = 45$ нм

момент окисления. После окисления график не изменяет угла наклона к оси времени. При изменении k , соответствующего оксиду молибдена (график 3), в момент окисления температура возрастает с 870 до 1000 К менее чем за 1 мкс и после завершения окисления продолжает расти линейно. Двукратное уменьшение k (график 2) вызывает менее существенный эффект роста температуры.

На рис. 4 представлены зависимости температуры плёнки от времени воздействия лазерного излучения при различном термооптическом коэффициенте, устанавливающем связь между показателем преломления вещества и температурой. На рисунке видно, что изменение термооптического коэффициента с $3,0 \cdot 10^{-5}$ до $8,0 \cdot 10^{-5}$ (графики 1, 2) приводит к приросту температуры на 80 К в момент времени 10 мкс. Дальнейший рост термооптического коэффициента до $3,0 \cdot 10^{-4}$ приводит к стремительному увеличению угла наклона графика после окисления. Максимальная температура достигает 1570 К. Ускорение роста

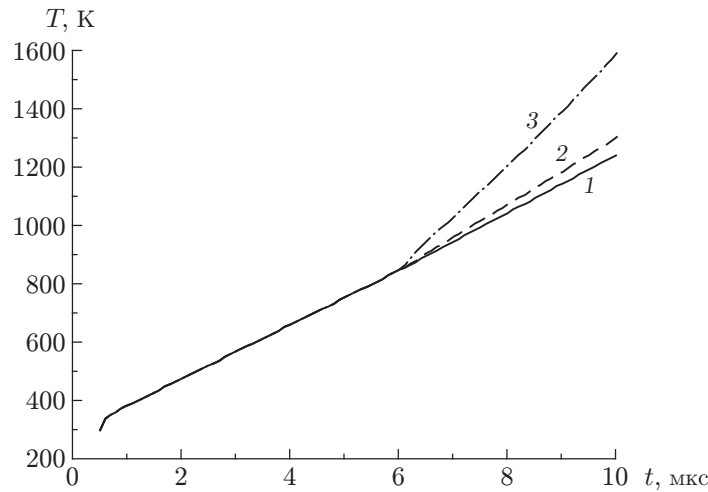


Рис. 4. Зависимости температуры плёнки от времени воздействия лазерного излучения при различных термооптических коэффициентах; 1 — $\kappa = 3 \cdot 10^{-5}$, 2 — $\kappa = 8 \cdot 10^{-5}$, 3 — $\kappa = 3 \cdot 10^{-4}$; $x = 0$, $y = 45$ нм

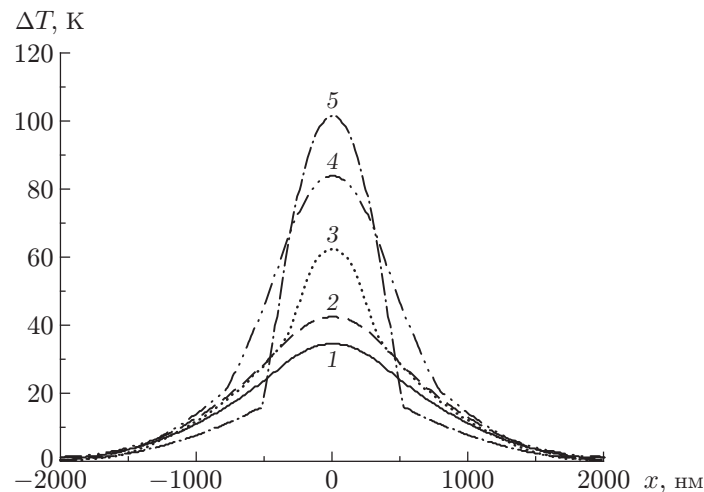


Рис. 5. Распределение температуры на поверхности плёнки: до момента окисления 1, в момент окисления: 2 — $k = 65$, 3 — $k = 25$, 4 — $k = 10$, 5 — $k = 25$ Вт/(м·К), $\kappa = 3 \cdot 10^{-4}$ Г⁻¹

температуры в момент окисления вызвано скачкообразным ростом коэффициента поглощения плёнки.

На рис. 5 приведены графики распределения температуры вдоль поверхности металлической плёнки (границы 5–7, см. рис. 1) в зависимости от коэффициентов теплопроводности (графики 1–4) и термооптического коэффициента (график 5) без учёта теплового эффекта окисления молибдена. График 1 соответствует плёнке молибдена до начала окисления. В момент окисления форма графиков изменяется. По мере увеличения коэффициента теплопроводности график всё более сужается и становится остроконечным, а температура в центральной части возрастает. При $k = 25$, соответствующем оксиду молибдена, ΔT возрастает до 65 К по сравнению с 25 К до начала окисления. При гипотетическом значении $k = 10$ ΔT достигает 105 К. При этом по мере увеличения коэффициента теплопроводности на участке $x \in (0; r)$ скорость снижения температуры также увеличивается. При $k = 65$ (график 2) температура хотя и увеличивается, однако форма кривой

не изменяется. Это означает, что двукратное снижение коэффициента теплопроводности не должно оказывать заметного влияния на ширину зоны абляции. Отметим, что изменение плотности и удельной теплоёмкости, соответствующее оксиду молибдена, согласно полученным данным (см. рис. 4) оказывает незначительное влияние на динамику температуры после окисления, которым можно пренебречь. Наблюдаемое поведение температуры при изменении коэффициента теплопроводности означает существенное уменьшение зоны интенсивного нагрева по сравнению с эффективным диаметром пучка и характеризуется усилением вертикальной составляющей теплового потока в области $x \ll r$ [11]. Очень интересен результат, полученный для изменения термооптического коэффициента. Его рост на порядок также приводит к росту температуры в центре, однако изменение формы графика проявлено слабо. Наблюдаемая область с повышенной температурой существенно шире, чем при изменении коэффициента теплопроводности, и лежит в пределах $\Delta x = 800$ нм. Пятикратное изменение (в сторону увеличения и уменьшения) удельной теплоёмкости в момент окисления не приводит к изменению распределения температуры по сравнению с графиком 1. Отсутствует эффект и от кратного изменения плотности вещества в момент окисления.

На рис. 6 представлено распределение температуры с учётом теплового эффекта химической реакции окисления молибдена. Видно, что при удельной теплоте образования (H), соответствующей химической реакции MoO_3 (график 1), распределение температуры практически не отличается от распределения, полученного без учёта теплового эффекта (график 3, см. рис. 5). Эксперименты показали, что влияние теплового эффекта реакции окисления на распределение температуры становится заметным лишь при гипотетических значениях H порядка $\sim 10^8$ кДж/кг. Дальнейшее увеличение H приводит к расширению теплового пятна и значительному росту температуры в центре (графики 2–4). Так, при $H = 5 \cdot 10^{10}$ кДж/кг прирост температуры достигает 360 К. Логично, что появление дополнительного источника тепла в зоне воздействия лазерного излучения должно сглаживать нелинейный тепловой эффект, наблюдаемый на рис. 5. Однако малые размеры области окисления приводят к небольшим значениям выделяемого тепла по абсолютной величине. Площадь термического контакта в боковом направлении в процессе выделения тепла ограничена толщиной плёнки и также незначительна. Эти два обстоятельства могут объяснить отсутствие влияния теплового эффекта реакции на распределение температуры при $H = 5000$ кДж/кг.

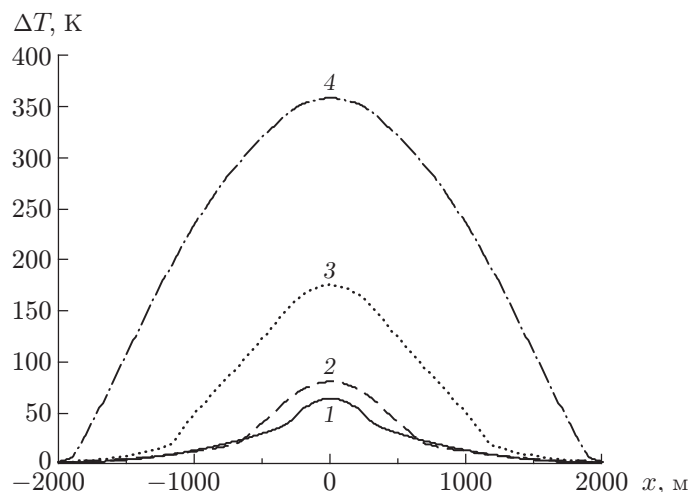


Рис. 6. Распределение температуры на поверхности плёнки в зависимости от теплового эффекта реакции окисления: 1 — $H = 5000$, 2 — $H = 5 \cdot 10^8$, 3 — $H = 5 \cdot 10^9$, 4 — $H = 5 \cdot 10^{10}$ кДж/кг

В работах [15–17] на тонких плёнках молибдена были созданы одиночные отверстия без микрозаусениц и образования расплава по краям. Чтобы понять движущие механизмы этого процесса абляции, в [16] были проведены аналитические расчёты. Выдвинутая модель предполагает, что удаление плёнки вызвано сверхбыстрым тепловым расширением во время нагрева и плавления зоны взаимодействия лазера и вещества, генерируя ударную волну, которая приводит к механическому вздутию и отслоению металлической плёнки. Однако условия эксперимента существенно отличаются от [10]. В работах [15–17] плёнки характеризуются низкой адгезией к подложке. Плотность лазерного излучения значительно меньше порога абляции.

Полученные здесь и в [10] результаты объясняют механизм образования трека в молибденовой плёнке в рамках известной тепловой модели [18]. Однако помимо испарения вещества предлагаемая гипотеза значительную роль отводит промежуточному процессу окисления молибдена. Нагрев плёнки молибдена сфокусированным лазерным излучением приводит к окислению металла с начальным образованием оксидного участка в центральной области, где интенсивность излучения наибольшая. Сокращению зоны окисления дополнительно может способствовать явление самофокусировки лазерного пучка в слое оксида, обладающем повышенным показателем преломления [19]. Считалось, что сокращение зоны абляции объясняется в основном незначительной разницей температур между точками испарения оксида и окисления молибдена ($\Delta T < 400$ К) [11]. Промежуточному окислению отводилась роль уменьшения этой разницы, поскольку температура кипения оксида молибдена намного меньше, чем металла. Однако результаты моделирования показывают, что в момент окисления происходит перераспределение температуры вдоль фокального пятна (см. рис. 5) по причине изменения коэффициента теплопроводности. Температура в центральной части возрастает. По мере удаления от центра фокального пятна температура стремительно убывает и процесс окисления замедляется. Это может быть вызвано тем, что уменьшение коэффициента теплопроводности в центральной окисленной зоне препятствует боковому распространению тепла, что косвенно подтверждается усилением вертикальной составляющей теплового потока [11]. Уменьшение зоны интенсивного нагрева также должно характеризоваться ростом горизонтальной составляющей градиента температуры в момент окисления, что показано на рис. 7. В момент уменьшения коэффициента теплопроводности со 138 до 25 Вт/(м·К) градиент температуры в любой точке фокального пятна возрастает в 4 раза (графики 1, 3). В результате на расстоянии $\Delta x > 100$ нм

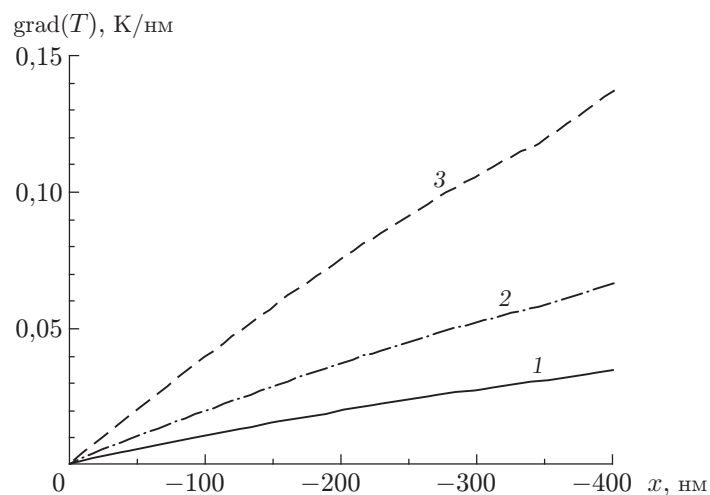


Рис. 7. Градиент температуры на поверхности плёнки вдоль радиуса фокального пятна: 1 — $k = 138$, 2 — $k = 65$, 3 — $k = 25$ Вт/(м·К)

от центра фокального пятна тепловое воздействие определяется лишь нисходящим участком гауссового распределения интенсивности излучения в пятне, что ограничивает рост температуры. Таким образом, изменение коэффициента теплопроводности в момент окисления молибдена приводит к уменьшению зоны интенсивного нагрева, в результате чего абляция плёнки наблюдается только в узкой центральной зоне.

Заключение. В данной работе представлены результаты моделирования процесса локального воздействия лазерного излучения на плёнку молибдена, нанесённую на кварцевую подложку.

Численные эксперименты показали, что при достижении температуры окисления, соответствующей пятикратному уменьшению коэффициента теплопроводности плёнки, наблюдается резкое уменьшение ширины теплового пятна и значительный рост температуры в центральной зоне воздействия излучения, что означает сокращение зоны интенсивного нагрева по сравнению с эффективным диаметром пучка. Характерное уменьшение ширины теплового пятна усиливается по мере дальнейшего уменьшения коэффициента теплопроводности, что ещё более интенсифицирует процесс образования трека в центральной области воздействия лазерного пучка. Многократное изменение удельной теплоёмкости и плотности вещества не оказывает заметного влияния на динамику роста и распределения температуры после окисления.

Значения термооптического коэффициента порядка $\sim 10^{-5}$ при окислении не приводят к существенным температурным изменениям. Тем не менее благодаря этому в момент окисления теоретически возможно дополнительное уменьшение эффективного радиуса фокального пятна, что усиливает наблюдаемый эффект. Однако даже при величине порядка $\sim 10^{-4}$ после окисления существенного уменьшения ширины теплового пятна не наблюдается. Дальнейшее исследование влияния термооптического коэффициента затруднительно, поскольку требует дополнительного учёта динамических и нестабильных оптических эффектов, происходящих в тонкой плёнке.

Тепловой эффект химической реакции окисления молибдена не оказывает влияния на распределение температуры, что, по всей видимости, вызвано незначительным выделением тепла по абсолютной величине и малой площадью термического контакта области окисления с молибденом вдоль поверхности плёнки.

Поиск других металлов, обладающих схожим эффектом абляции под действием лазерного излучения, является важным элементом развития лазерных методов формирования микрорельефа и контактных масок. При этом целесообразно ориентироваться на соотношение коэффициента теплопроводности в паре металл — оксид, поскольку согласно полученным данным именно этот параметр ответственен за изменение формы распределения температуры в момент окисления, что приводит к сокращению ширины трека при воздействии лазерного пучка.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания «Кристаллография и фотоника» РАН (соглашение № 007-ГЗ/43363/26).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Guo C. F., Cao S., Jiang P. et al. Grayscale photomask fabricated by laser direct writing in metallic nano-films // Opt. Express. 2009. **17**, N 22. P. 19981–19987. DOI: 10.1364/OE.17.019981.
2. Полещук А. Г., Корольков В. П., Вейко В. П. и др. Лазерные технологии в микрооптике. Ч. 2. Изготовление элементов с трёхмерным микрорельефом // Автометрия. 2018. **54**, № 2. С. 3–19. DOI: 10.15372/AUT20180201.
3. Qin L., Huang Y., Xia F. et al. 5 nm nanogap electrodes and arrays by super-resolution laser lithography // Nano Lett. 2020. **20**, N 7. P. 4916–4923. DOI: 10.1021/acs.nanolett.0c00978.

4. **Cai J., Lv C., Watanabe A.** Laser direct writing and selective metallization of metallic circuits for integrated wireless devices // *ACS Appl. Mat. & Interfaces*. 2018. **10**, N 1. P. 915–924. DOI: 10.1021/acsami.7b16558.
5. **Wang L., Ma L., Zhao Q. et al.** Internal nanocavity based high-resolution and stable structural colours fabricated by laser printing // *Opt. Express*. 2021. **29**, N 5. P. 7428–7434. DOI: 10.1364/OE.418103.
6. **Zhang J., Guo C., Wang Y. et al.** Micro-optical elements fabricated by metal-transparent-metallic-oxides grayscale photomasks // *Appl. Opt.* 2012. **51**, N 27. P. 6606–6611. DOI: 10.1364/AO.51.006606.
7. **Dong Y., Sakata H., Molian P.** Femtosecond pulsed laser ablation of diamond-like carbon films on silicon // *Appl. Surface Sci.* 2005. **252**. P. 352–357. DOI: 10.1016/j.apsusc.2005.01.008.
8. **Park M., Chon B. H., Kim H. S. et al.** Ultrafast laser ablation of Indium tin oxide thin films for organic light-emitting diode application // *Opt. and Lasers in Eng.* 2006. **44**, N 2. P. 138–146. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2005.03.009.
9. **Wang S., Zhou Z., Li B. et al.** Progresses on new generation laser direct writing technique // *Mat. Today Nano*. 2021. **16**. P. 100142. DOI: 10.1016/j.mtnano.2021.100142.
10. **Волков А. В., Моисеев О. Ю., Полетаев С. Д.** Высокора разрешающая лазерная запись контактных масок на плёнках молибдена для изготовления элементов дифракционной оптики // *Компьютерная оптика*. 2013. **37**, № 2. С. 220–225.
11. **Казанский Н. Л., Полетаев С. Д.** Численное моделирование процесса абляции тонких плёнок молибдена под действием лазерного излучения // *ЖТФ*. 2016. **86**, № 9. С. 1–6.
12. **Вейко В. П., Корольков В. П., Полецук А. Г. и др.** Исследование пространственного разрешения лазерной термохимической технологии записи дифракционных микроструктур // *Квантовая электроника*. 2011. **41**, № 7. С. 631–636.
13. **Ши Д.** Численные методы в задачах теплообмена. М.: Мир, 1988. 543 с.
14. **Физические величины: Справочник** /Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
15. **Bartl D., Michalowski A., Hafner M. et al.** Time-resolved study of back side ablated Molybdenum thin films by ultrashort laser pulses // *Appl. Phys. A*. 2013. **44**. P. 227–233. DOI: 10.1007/s00339-012-7118-9.
16. **Domke M., Nobile L., Rapp S. et al.** Understanding thin film laser ablation: The role of the effective penetration depth and the film thickness // *Phys. Procedia*. 2014. **56**. P. 1007–1014. DOI: 10.1016/j.phpro.2014.08.012.
17. **Gupta P. D., O'Connor G. M.** Comparison of ablation mechanisms at low fluence for ultrashort and short-pulse laser exposure of very thin Molybdenum films on glass // *Appl. Opt.* 2016. **55**, N 9. P. 2117–2125. DOI: 10.1364/AO.55.002117.
18. **Анисимов С. И., Имас Я. А., Романов Г. С., Ходыко Ю. В.** Действие излучения большой мощности на металлы. М.: Наука, 1970. 272 с.
19. **Либенсон М. Н.** Лазерно-индуцированные оптические и термические процессы в конденсированных средах и их взаимное влияние. СПб.: Наука, 2007. 423 с.

Поступила в редакцию 16.06.2022

После доработки 24.06.2022

Принята к публикации 30.06.2022