

О механизме лазерной сверхдифракционной обработки тонкой плёнки молибдена

С. Д. Полетаев

Институт систем обработки изображений Российской академии наук – филиал Федерального научно-исследовательского центра «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук, Самара, Россия

Путём численного моделирования исследовано влияние теплофизических свойств плёнки молибдена в процессе лазерной абляции на ширину формирующегося 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 изменение плотности, удельной теплоёмкости и тепловой эффект химической реакции окисления молибдена в процессе окисления плёнки не оказывают существенного влияния на распределение температуры в зоне воздействия лазерного пучка.

Ключевые слова: Оптика, COMSOL, Оптический элемент, Лазерная абляция, Фототермический эффект.

Цитирование: Полетаев, С. Д. О механизме лазерной сверхдифракционной обработки тонкой плёнки молибдена / С. Д. Полетаев // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 329–340.

Введение

В настоящее время прямая лазерная запись широко применяется для создания различных изделий микро- и нанотехнологий, таких как фотошаблоны для литографии [1], интегральные схемы [2], микрооптические устройства [3]. 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 велико для изготовления таких микроструктур вследствие дифракционного предела.

Преодолеть существующие ограничения возможно за счет поиска условий нелинейного взаимодействия лазера и материала, позволяющего избирательно использовать максимум гауссового распределения интенсивности излучения в фокальном пятне [4]. Ранее было экспериментально показано, что в этом отношении могут быть перспективны тонкие плёнки

молибдена. В работе [5] была исследована лазерная абляция молибденовых плёнок толщиной менее 50 нм при интенсивности излучения 1 - 10 МВт/см². Особенность результата заключалась в трехкратном уменьшении зоны абляции по сравнению с исходным диаметром фокального пятна (0,8 мкм). Было предположено, что этот эффект связан с промежуточным окислением металла [6]. Согласно ранее полученным результатам моделирования образование оксида в центральной зоне воздействия лазерного пучка приводит к значительному повышению температуры в области воздействия фокального пятна. Модель учитывала изменение теплофизические параметров, соответствующее переходу от молибдена к его оксиду, однако подробно их влияние на распределение температуры в зоне воздействия лазерного пучка не рассматривалось. Было предположено, 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 настоящей 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 ~10 МВт/см².

1. Метод и постановка задачи

На рис. 1 показана моделируемая система, представляющая собой фрагмент подложки плавленого кварца, покрытой плёнкой металла. Граница б соответствует участку, подвергаемому воздействию круглого пятна лазерного излучения с гауссовым профилем интенсивности относительно начала координат с характеристиками, соответствующими станции лазерной записи CLWS-200 [6]. 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 × 600 нм и 4000 × 35 нм соответственно. В рамках 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.

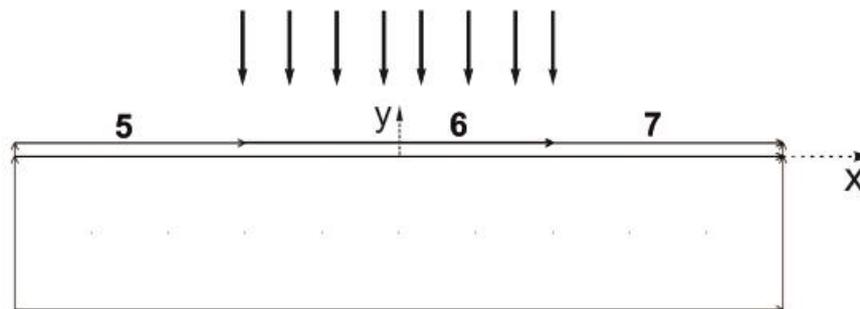


Рис. 1. Моделируемая система

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. Данный модуль используется для моделирования теплопередачи за счет 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 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. Порядок постановки и решения задачи в данной программной среде уже рассматривался.

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 характеристики материалов не учитывалось, поскольку в интервале температур 300 - 900 К их изменения несущественны (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 1 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.

Таблица 1. 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 α , К ⁻¹	$3,0 \cdot 10^{-5}$
Теплота образования оксида молибдена MoO_3 (H), кДж/кг	5000

Задание всех необходимых разрывных коэффициентов для расчёта в области плёнки проводилось четырьмя ступенчатыми функциями в разделе Parametrs. 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:

$$Q = H \cdot \rho,$$

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, лишь начиная 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:

$$Q(r)=A \cdot Q_0 \cdot \exp(-x^2/2r^2),$$

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 пленки:

$$A = A_0 + \alpha T,$$

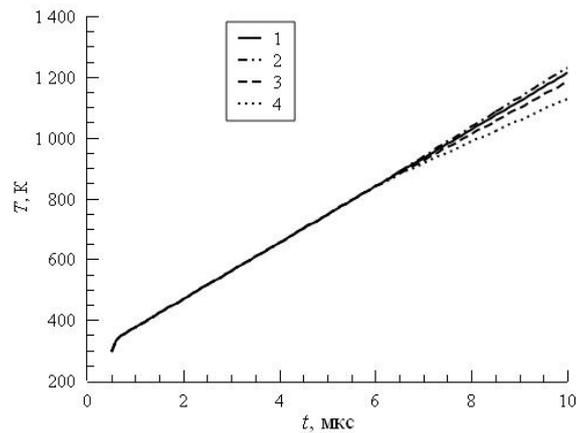
где A_0 - коэффициент поглощения плёнки при $T = 300$ К ($A_0 = 0,4$), α - термооптический коэффициент пленки, T - текущая температура.

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.

2. Результаты и обсуждение

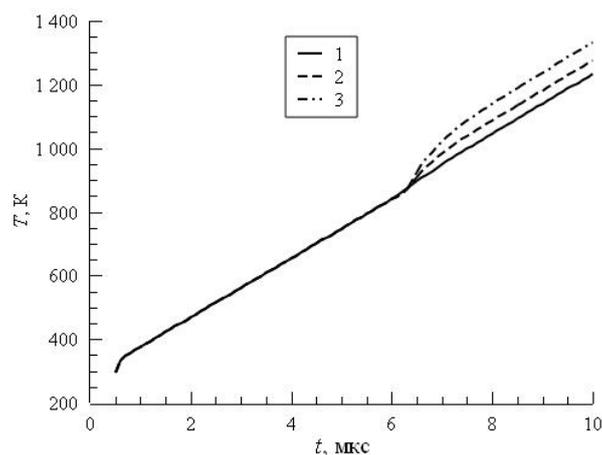
На рис. 2 представлена зависимость температуры плёнки от времени воздействия лазерного излучения при неизменных теплофизических параметрах, а также при пятикратном изменении удельной теплоёмкости и плотности вещества в момент окисления. При неизменных теплофизических параметрах температура растёт линейно 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 почти 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.



1 - $(\rho, c, k, \alpha) = \text{const}$, 2 - пятикратное уменьшение ρ ,
 3 - двукратное увеличение c , 4 - пятикратное увеличение c

Рис. 2. Зависимость температуры плёнки от времен воздействия лазерного излучения; $x = 0$,
 $y = 45 \text{ нм}$

На рис. 3 показана зависимость температуры от времени воздействия лазерного излучения при различных значениях коэффициента теплопроводности (k). Уменьшение коэффициента приблизительно в 2 раза приводит к заметному нарастанию температуры в 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 температура продолжает расти линейно. Двукратное уменьшение k (график 2) вызывает менее существенный эффект роста температуры.



1 - $k_1 = 65$, 2 - $k_2 = 25$, $k_3 = 10 \text{ Вт/(м·К)}$

Рис. 3. Зависимость температуры плёнки от времени воздействия лазерного излучения при
 различном коэффициенте теплопроводности; $x = 0$, $y = 45 \text{ нм}$

На рис. 4 представлена зависимость температуры плёнки от времени воздействия лазерного излучения при различном термооптическом коэффициенте, устанавливающим связь между показателем преломления вещества и температурой. Из рисунка 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 температуры в момент окисления вызвано скачкообразным ростом коэффициента поглощения плёнки.

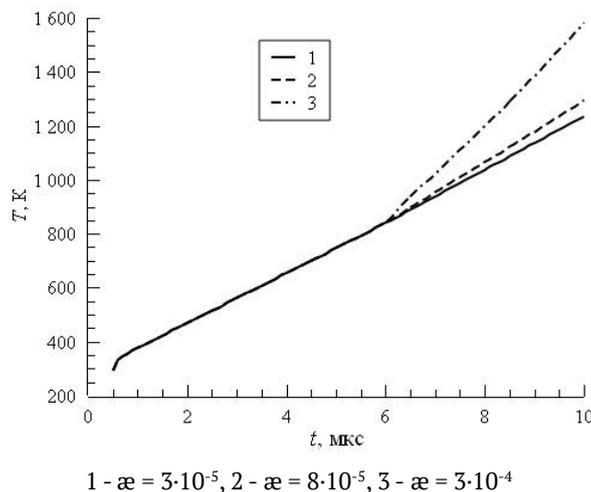
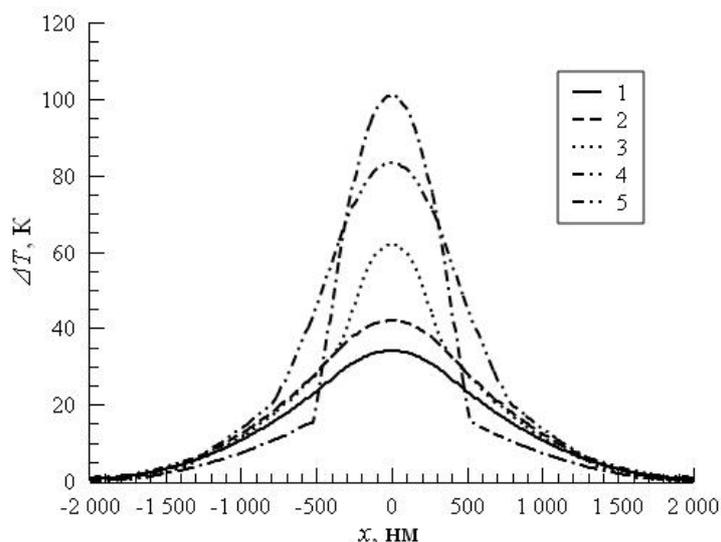


Рис. 4. Зависимость температуры плёнки от времени воздействия лазерного излучения при различном термооптическом коэффициенте; $x = 0$, $y = 45$ нм

На рис. 5 приведены графики распределения температуры вдоль поверхности металлической плёнки (границы 5-7, рисунок 1) в зависимости от коэффициента 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 $k = 25$, соответствующего 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 (рисунок 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 $x \ll r$ [6]. Весьма 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.

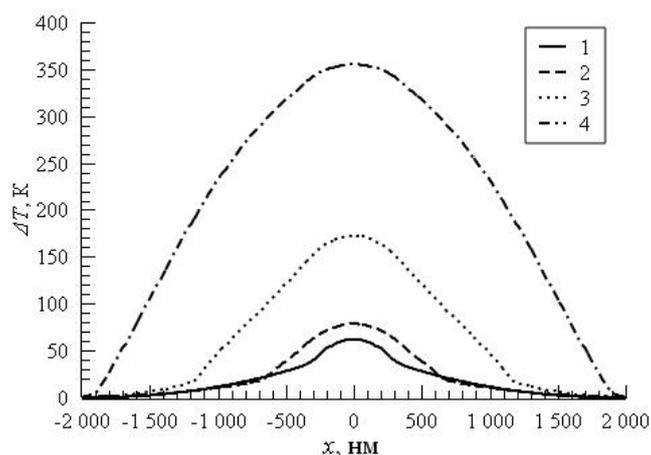


1 - до момента окисления и в момент окисления:

2 - $k = 65$, 3 - $k = 25$, 4 - $k = 10$, 5 - $k = 25$ Вт/(м·К), $\alpha = 3 \cdot 10^{-4}$ T⁻¹

Рис. 5. Распределение температуры на поверхности плёнки

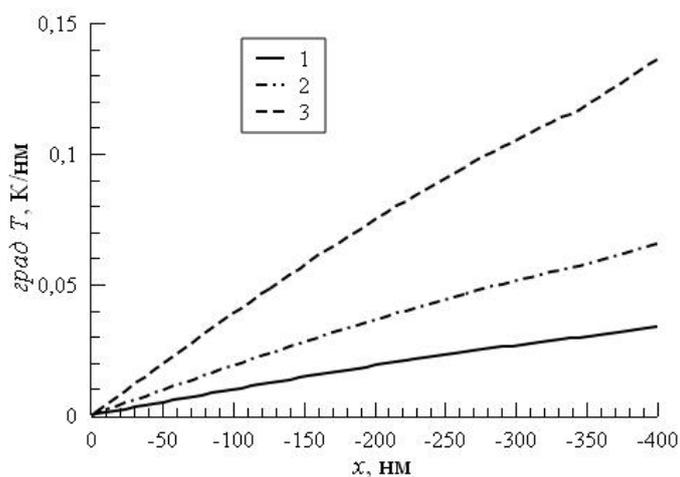
На рис. 6 представлены распределения температуры с учётом теплового эффекта химической реакции окисления молибдена. Видно, что при удельной теплоте образования (Н), соответствующей химической реакции оксида молибдена MoO_3 (график 1), распределение температуры практически не отличается от распределения, полученного без учёта теплового эффекта (график 3 рисунка 5). Эксперименты показали, что влияние теплового эффекта реакции окисления на распределение температуры становится заметным лишь при гипотетических значениях Н порядка $\sim 10^8$ кДж/кг. Дальнейшее увеличение Н приводит к расширению теплового пятна и значительному росту температуры в центре (графики 2-4). Так при $N = 5 \cdot 10^{10}$ 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 $N = 5000$ кДж/кг.



1 - $H = 5000$, 2 - $H = 5 \cdot 10^8$, 3 - $H = 5 \cdot 10^9$, 4 - $H = 5 \cdot 10^{10}$ кДж/кг

Рис. 6. Распределение температуры на поверхности плёнки в зависимости от теплового эффекта реакции окисления

Полученные здесь и ранее результаты объясняют механизм образования трека в молибденовой плёнке в рамках известной тепловой модели [7]. 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. Считалось, что сокращение зоны абляции объясняется, в основном, незначительной разницей температур между точками испарения оксида и окисления молибдена ($\Delta T < 400\text{K}$) [6]. 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 (рисунок 5) по причине изменения коэффициента теплопроводности. Температура в центральной части возрастает. По мере удаления от центра фокального пятна температура стремительно убывает и процесс окисления ограничивается. 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 [6]. Уменьшение зоны интенсивного нагрева также должно характеризоваться ростом горизонтальной составляющей градиента температуры в момент окисления, что показывает рис. 7.



1 - $k = 138$, 2 - $k = 65$, 3 - $k = 25$ Вт/(м·К)

Рис. 7. Градиент температуры на поверхности плёнки вдоль радиуса фокального пятна:

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 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 работе представлены результаты моделирования процесса локального воздействия лазерного излучения на пленку молибдена, нанесенную 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.

Благодарность

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

Список источников

- [1] **Полещук, А. Г.** Лазерные технологии в микрооптике. ч. 2. Изготовление элементов с трёхмерным микрорельефом / А. Г. Полещук, В. П. Корольков, В. П. Вейко, Р. А. Заколдаев, М. М. Сергеев // Автометрия. — 2018. — Том 54. — № 2. — С. 3–19.
- [2] **Qin, L.** 5 nm Nanogap Electrodes and Arrays by Super-resolution Laser Lithography / L. Qin, Y. Huang, F. Xia, L. Wang, J. Ning, H. Chen, X. Wang, W. Zhang, Y. Peng, Q. Liu // Nano Letters. — 2020. — Vol 20. — № 7. — P. 4916–4923.
- [3] **Wang, L.** Internal nanocavity based high-resolution and stable structural colours fabricated by laser printing / L. Wang, L. Ma, F. Xia, Q. Zhao, S. Wang, X. Wang, C. Zhang, W. Zhang, X. Wang, Q. Liu // Nano Letters. — 2021. — Vol 29. — № 5. — P. 7428–4934.
- [4] **Zhang, J.** Micro-optical elements fabricated by metal-transparent-metallic-oxides grayscale photomasks / J. Zhang, J. Guo, Y. Wang, J. Miao, Y. Tian, Q. Liu // Applied Optics. — 2012. — Vol 51. — № 27. — P. 6606–6611.
- [5] **Волков, А. В.** Высокора разрешающая лазерная запись контактных масок на плёнках молибдена для изготовления элементов дифракционной оптики / А. В. Волков, О. Ю. Моисеев, С. Д. Полетаев // Компьютерная оптика. — 2013. — Том 37. — № 2. — С. 220–225.
- [6] **Казанский, Н. Л.** Численное моделирование процесса абляции тонких пленок молибдена под действием лазерного излучения / Н. Л. Казанский, С. Д. Полетаев // Журнал технической физики. — 2016. — Том 86. — № 9. — С. 1–6.
- [7] **Анисимов, С. И.** Действие излучения большой мощности на металлы / С. И. Анисимов, Я. А. Имас, Г. С. Романов, Ю. В. Ходыко — М.: Наука, 1970. — 272 с.

On the mechanism of laser superdiffraction processing of a thin molybdenum film

S. D. Poletayev

IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, Samara, Russia

The influence of the thermophysical properties of the molybdenum film during laser ablation on the width of the forming track is investigated by numerical simulation. In accordance with the data obtained, the hypothesis explaining the reduction of the track width in the ablation zone of the film in comparison with the effective diameter of the laser beam was refined. It is shown that a specific change in the thermal conductivity coefficient of a substance at the time of oxidation has a significant effect on the distribution of the temperature field, expressed in a narrowing of the characteristic of the temperature distribution over the surface of the film, which was not previously considered. It is established that changes in the density, specific heat capacity and thermal effect of the chemical reaction of molybdenum oxidation during the oxidation of the film do not significantly affect the temperature distribution in the zone of exposure to the laser beam.

Keywords: Optics, COMSOL, Optical element, Laser ablation, Photothermal effect.