

ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 535.211, 535.217

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО ФОТОТЕРМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В ПРОЦЕССЕ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ ОКСИДНЫХ ПЛЁНОК С РАЗЛИЧНЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

© С. Д. Полетаев, Г. В. Успенъев

*Институт систем обработки изображений, НИЦ «Курчатовский институт»,
443001, г. Самара, ул. Молодогвардейская 151
E-mail: sergpolet@gmail.com*

Проведено исследование нелинейного фототермического эффекта, возникающего в процессе локальной лазерной абляции плёнок оксидов металлов с различной теплопроводностью. Показано, что ширина треков монотонно уменьшается при изменении коэффициента теплопроводности в пределах от 25 до 1 Вт/(м·К). Установлено, что умеренное уменьшение теплопроводности плёнки не приводит к значительному сокращению ширины трека. Сделан вывод о совместном влиянии на минимальную ширину трека коэффициента теплопроводности и фактора теплового разгона, который вносит дополнительную нелинейность в процесс нагрева оксидной плёнки.

Ключевые слова: лазерная абляция, дифракционный оптический элемент, поверхностные периодические микроструктуры, наностолбики, нелинейный фототермический эффект, разрешающая способность.

DOI: 10.15372/AUT20240611

EDN: YBPOXE

Введение. Прямая лазерная запись является простым и точным литографическим методом изготовления микроструктур широкого спектра, таких как фотошаблоны, используемые в фотолитографии для изготовления чипов [1], интегральные схемы [2], микрооптические устройства [3], различные поверхностные микроструктуры [4–7]. Метод основан на регистрации элементов топологического рисунка под действием сфокусированного лазерного излучения. Элементы регистрируются чаще всего путём локального окисления или удаления (абляции) вещества.

Лазерная запись характеризуется отсутствием масок, простотой обработки, высокой скоростью и большой площадью обработки [8, 9]. Для реализации всех этих преимуществ метода разработаны и применяются станции прямой лазерной записи. Сочетание в них цифрового управления и идентификации изображений позволяет создавать разнообразные и сложные микроструктуры.

Однако разрешение изготовления элементов в этом случае ограничено величиной порядка λ/NA (где λ — длина волны лазерного излучения, NA — числовая апертура выходного объектива), определяющей диаметр лазерного пятна в области фокусировки. С учётом преимуществ прямой лазерной записи перед литографическими методами преодоление дифракционного предела становится актуальной задачей, решение которой значительно расширяет горизонт применения данного метода. В последнее время появились работы, предлагающие повысить разрешение на базе нового принципа, называемого нелинейным фототермическим эффектом (далее — фототермический эффект) [10]. В его основу заложено предположение, что гауссов профиль интенсивности лазерного излучения позволяет

создавать условия избирательного воздействия на акцепторный материал. Подбирая условия воздействия лазерного излучения (мощность, длительность импульса, скорость сканирования), становится возможным формирование элементов с размерами, существенно меньшими эффективного диаметра фокального пятна, в том числе превышающими дифракционный предел.

Фототермический эффект ранее наблюдался на некоторых материалах. В [11] получены периодические наноотверстия и треки в плёнке титана толщиной 40 нм на стеклянной подложке при мощности лазерного излучения более 10 мВт и длительности импульса 200 нс. Лазерная система имела длину волны 533 нм и выходной объектив с $NA = 0,9$. При определённой дозе излучения температура превышала порог абляции плёнки титана только в центре сфокусированного лазерного пучка, что приводило к образованию отверстий и треков шириной 90–100 нм.

В [12] использована прямая лазерная запись для разработки нового метода изготовления различных масок в оттенках серого, основанного на принципе, в котором лазер облучает металлическую плёнку (олово, индий, сурьму) на стеклянной подложке и образует металлопрозрачные оксиды металлов. Хотя металлы обычно непрозрачны, их оксиды часто прозрачны, и прозрачность связана с воздействием лазерной энергии на металлическую плёнку. По этому принципу могут быть изготовлены различные сложные маски и узоры в оттенках серого. Группа исследователей [12] использует лазер с длиной волны 532 нм для прямой записи ультрадисперсной кристаллической плёнки олова толщиной 20 нм. Изображение головы волка в оттенках серого было изготовлено с разрешением пикселя около 200 нм.

В [13] под действием непрерывного лазерного излучения с длиной волны 532 нм и эффективным диаметром пучка 0,8 мкм были сформированы треки шириной 200–250 нм на плёнках молибдена толщиной 20–35 нм путём абляции. Полученный результат также превышает дифракционный предел для указанной длины волны.

Для дальнейшего поиска материалов, обладающих исследуемым свойством, была выдвинута гипотеза о возможной связи минимального размера обработанной области с коэффициентом теплопроводности материала плёнки [14]. Для плёнок толщиной 35 нм было проведено моделирование, которое показало, что с уменьшением коэффициента теплопроводности плёнки тепло концентрируется на всё меньшем участке области воздействия лазерного излучения. Это выражается в увеличении разницы температур между любым участком теплового пятна и его центром. На основе этого было выдвинуто предположение об уменьшении минимального размера элемента вместе с уменьшением теплопроводности материала. В представленной работе с целью проверки выдвинутой гипотезы экспериментально исследуется нелинейный фототермический эффект на оксидных плёнках с коэффициентом теплопроводности (k) от 1 до 65 Вт/(м·К). В соответствии с этим были выбраны плёнки оксида цинка (ZnO), оксида молибдена (MoO_3), диоксида титана (TiO_2) и диоксида циркония (ZrO_2).

Постановка задачи исследования. Когда пучок света проходит через линзу объектива, изображение представляет собой дифракционную картину Фраунгофера, а не идеально сфокусированное пятно в соответствии с принципом визуализации Аббе, основанным на критерии Рэлея. Как было показано выше, минимальный размер пятна в области фокусировки определяется длиной волны и числовой апертурой объектива. В традиционной системе лазерной записи с гауссовым распределением интенсивности излучения в пучке размер элемента, сформированного в акцепторном материале, будет равен размеру пятна. В случае фототермического эффекта наблюдается нелинейное взаимодействие, при котором размер элемента получается значительно меньше. В работе [14] мы показали, что уменьшение теплопроводности плёнки усиливает нелинейный процесс в материале,

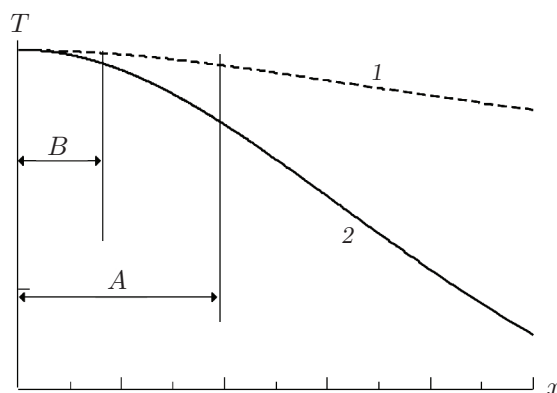


Рис. 1. Распределение температуры по поверхности плёнки в зависимости от коэффициента теплопроводности: 1 — k_1 , 2 — k_2 (A , B — полуширина треков для различных значений k , $k_1 > k_2$)

приводя к сокращению ширины теплового пятна (рис. 1). Моделирование воздействия лазерного излучения на плёнку проводилось в программной среде COMSOL путём решения дифференциального уравнения теплопроводности двумерного вида совместно с уравнением плотности теплового потока (граничное условие второго рода), задающего условие теплопередачи:

$$\rho C \frac{dT}{dt} = k \left(\frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{d^2 T}{dz^2} \right), \quad (1)$$

$$\mathbf{q} = -k \cdot \text{grad } T. \quad (1a)$$

Выбор граничного условия второго рода определялся конкретным условием задачи, которое заключалось в нагревании плёнки потоком лазерного излучения. В результате проведённого моделирования выдвинуто предположение, что уменьшение k материала должно последовательно приводить к уменьшению минимального размера элемента в процессе лазерной абляции. Разница в полуширине трека условно обозначена размерами A , B на рис. 1. С точки зрения влияния теплопроводности на формирование трека (элемента) представляет интерес исследование ранее не упоминавшихся материалов с различными тепловыми свойствами. К ним относятся оксиды цинка, молибдена, титана и циркония.

Подготовка образцов и метод исследования. Плёнки оксидов цинка, титана и циркония наносились на стеклянные подложки магнетронным ВЧ-распылением оксидных мишеней с частотой источника 13,56 МГц. Процесс проводился в среде Ag/O_2 с содержанием кислорода 10 % при температуре 100 °С. Плёнки оксида молибдена изготавливались путём магнетронного распыления молибдена в среде Ag на постоянном токе с последующим окислением полученной плёнки на нагретой плитке при температуре около 500 °С в воздушной атмосфере. Толщина плёнок во всех случаях составляла около 40 нм. Размер подложек $30 \times 30 \text{ мм}^2$.

Запись треков проводилась на круговой станции лазерной записи CLWS-300 (г. Новосибирск). Лазерный пучок с длиной волны 532 нм и максимальной мощностью 100 мВт от непрерывного лазера фокусировался на подложке, вращающейся со скоростью 10 с^{-1} . Фокусирующий объектив имеет числовую апертуру $NA = 0,3$, что обеспечивает эффективный диаметр пучка 1,8 мкм. В процессе записи каждого последующего трека лазерный пучок перемещался в радиальном направлении вдоль вращающейся подложки. В результате получены группы кольцевых треков на радиусах от 2 до 10 мм, в каждой из которых

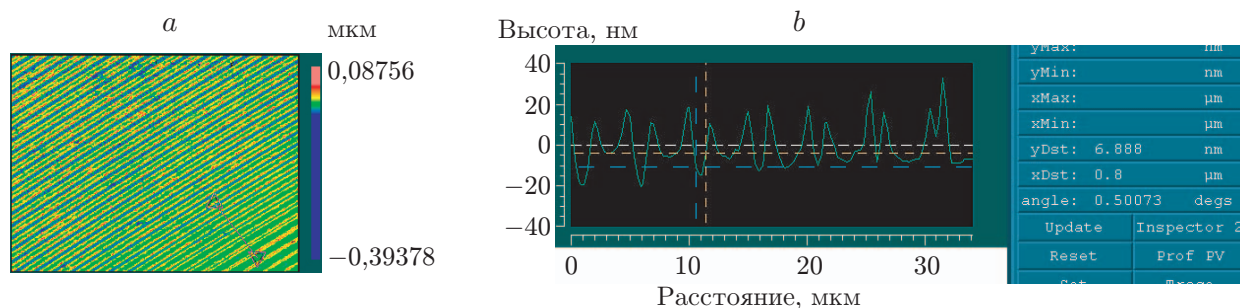


Рис. 2. Интерферометрическое изображение микроструктуры на плёнке оксида молибдена: *a* — вид сверху; *b* — профиль микрорельефа в области пороговой дозы излучения при мощности около 60 мВт (радиус записи 3 мм)

мощность лазера изменялась от 1 до 100 мВт с шагом 1 мВт по мере увеличения радиуса. Управление пучком осуществлялось в тестовом режиме в соответствии с параметрами, заданными в программе. Подложка крепилась на вращающемся столике вакуумным присосом путём откачки воздуха через отверстия.

Микрорельеф контролировался на интерферометре Zygo 7300 и растровом электронном микроскопе (РЭМ) Supra 25 [15].

Эксперимент. На рис. 2 представлен результат обработки плёнки оксида молибдена. Во всех случаях мощность излучения указывается для треков, находящихся в центре микрфотографии, а ширина трека измерялась приблизительно по полувысоте [11]. Ширина трека или период решётки указывается в таблице на рис. 2, *b*, 4, *b*, 5, *b* справа от микрорельефа в строке “xDst” и соответствует проекции расстояния между двумя маркерами на фотографии микрорельефа. Характерный минимальный размер трека составляет около 800 нм (см. рис. 2, *b*). Ширина трека при мощности лазера выше 90 % максимальной соответствует эффективному диаметру. Такой же относительный результат на плёнке оксида молибдена получен нами ранее и на другой установке [14]. В данном случае представляет особый интерес динамика развития трека. При интенсивностях излучения, близких к пороговому значению абляции, сначала формируются микроламели высотой около 40 нм (см. рис. 2, *b*). Затем они расширяются, а в их центре начинает формироваться углубление, которое переходит в трек по мере увеличения мощности излучения. Боковые остатки ламелей при этом образуют зону термического воздействия в виде микрозаусенцев вокруг треков. Общая ширина треков вместе с микрозаусенцами составляет порядка 3,5 мкм, что делает невозможным формирование решётки с меньшим периодом. Интересно, что аналогичный результат по морфологии треков получен при исследовании фототермического эффекта в процессе локальной лазерной абляции плёнок молибдена толщиной 35 нм [13], который связывался с промежуточным окислением металлической плёнки. Возможно, что уменьшение толщины оксидной плёнки устранил микрозаусенцы, как это наблюдалось в случае с плёнкой молибдена.

На рис. 3 представлено интерферометрическое изображение микрорельефа на плёнке оксида цинка. Видно, что воздействие лазерного пучка приводит в основном к взрыхлению плёнки без заметного формирования трека. Несколько лучше качество трека в области, где доза излучения лишь немного превышает порог абляции (правая часть рис. 3, *a*), но и в этом случае трек сильно загрязнён продуктами взрыхления. Такой результат хорошо объясним в рамках изложенной нами логики [14]. Высокая теплопроводность плёнки не позволяет сконцентрировать тепло в центральной части области воздействия лазерного пятна. В результате более равномерного прогрева плёнки приложенной интенсивности

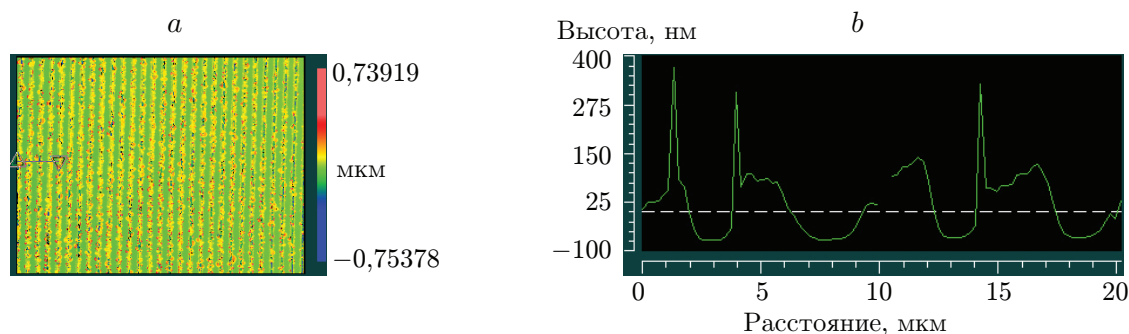


Рис. 3. Интерферометрическое изображение микроструктуры на плёнке оксида цинка: *a* — вид сверху; *b* — профиль (радиус записи 3 мм)

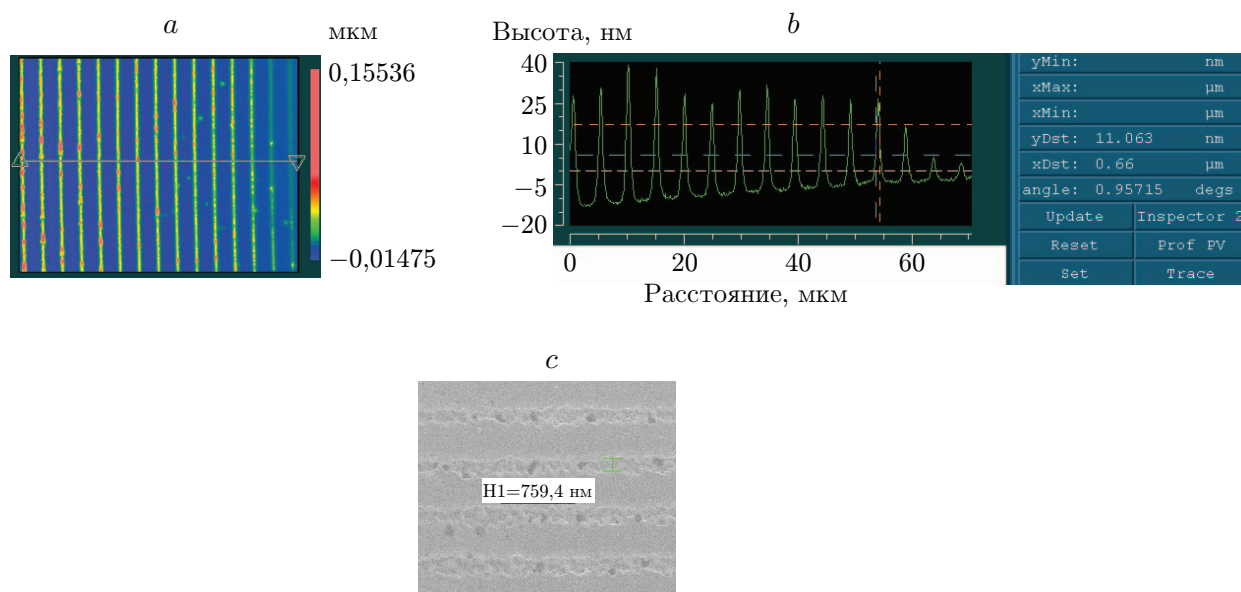


Рис. 4. Инвертированное интерферометрическое изображение микроструктуры на плёнке оксида титана: *a* — вид сверху; *b* — профиль в области пороговой дозы излучения (мощность ~ 40 мВт); *c* — РЭМ-изображение (радиус записи 3 мм)

излучения недостаточно для удаления материала. Ширина области взрыхления приблизительно равна эффективному диаметру лазерного пятна. Можно предположить, что дальнейшее увеличение интенсивности излучения привело бы к формированию трека той же ширины. Интересно, что в области формирования трека его глубина достигает 400 нм (см. рис. 2, *b*).

На рис. 4, *a*, *b* представлено инвертированное интерферометрическое изображение микро рельефа в плёнке оксида титана. Для подтверждения абляции внутри трека на рис. 4, *c* приведено РЭМ-изображение. Суммируя данные с микрофотографий, можно заключить, что минимальный размер трека составляет 700–750 нм. Такой результат близок к минимальному размеру трека на плёнках оксида молибдена, однако на плёнке оксида титана образование микрозаусенцев не наблюдается. Высота микро рельефа составляет около 30 нм.

На рис. 5 представлено инвертированное интерферометрическое изображение микро рельефа в плёнке оксида циркония. Характерный минимальный размер трека составляет

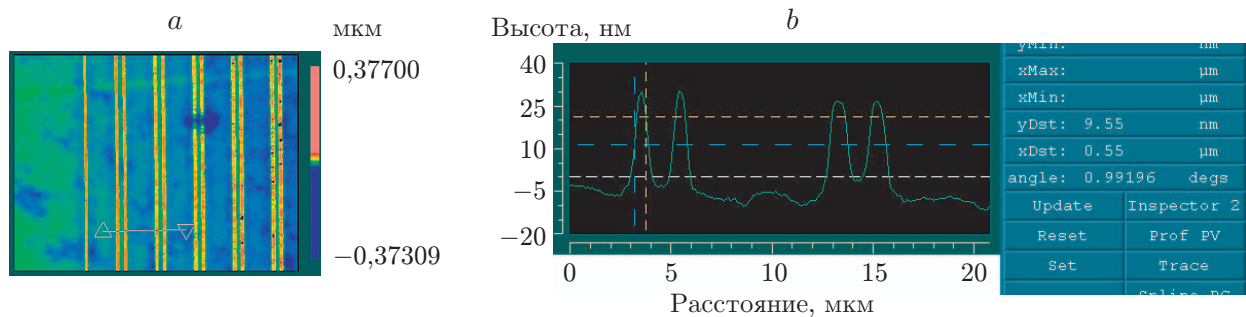


Рис. 5. Инвертированное интерферометрическое изображение микроструктуры на плёнке оксида циркония: *a* — вид сверху; *b* — профиль в области пороговой дозы излучения при мощности ~ 28 мВт (радиус записи 3 мм)

550 нм, высота микрорельефа — около 40 нм. Из рис. 5, *b* видно, что треки с периодом 2 мкм разделяются.

Из приведённых данных видно, что уменьшение k плёнки от 25 Вт/(м·К) (оксид молибдена) к 1 Вт/(м·К) (оксид циркония) приводит к сокращению ширины трека в 1,5 раза (от 800 до 550 нм). Однако сравнение оксида молибдена с оксидом титана показывает лишь незначительное снижение ширины трека. Таким образом, выдвинутая нами ранее гипотеза хорошо показывает себя на практике при сравнении материалов с крайними значениями k из ряда значений. Однако этого нельзя сказать в случае умеренного уменьшения теплопроводности плёнок, начиная с высоких значений k . В [16] разработана модель так называемого теплового разгона при многоимпульсной абляции полупрозрачной керамики, в частности ZrO_2 . Модель была призвана объяснить ранее наблюдавшийся экспериментальный факт абляции полупрозрачной керамики под действием наносекундного лазерного излучения с субпороговой дозой. Расчёты показали, что поглощение керамикой излучения изменяется пропорционально двум факторам: накоплению тепла и выраженной температурной зависимости оптического поглощения керамики в области воздействия пучка, что по мере нагрева вызывает тепловой выброс (резкий рост температуры, приводящий к удалению материала). Заложенная в модель зависимость коэффициента поглощения плёнки от температуры имела логарифмический характер в соответствии с более ранними исследованиями [17]. Последнее в сочетании с накопительным эффектом приводит к стремительному росту температуры и удалению плёнки, несмотря на недостаточную энергию фотонов в излучении по сравнению с шириной запрещённой зоны материала. Похожая модель, в которой ключевая роль также отводилась температурной зависимости коэффициента поглощения плёнки, представлена нами в [18]. Основное отличие этой модели заключалось в том, что по мере роста оптического поглощения плёнки с ростом температуры рассматривалось дополнительное изменение этого параметра, приписываемое образованию новой фазы. Существование такой зависимости хорошо объясняет рассматриваемый фототермический эффект. Как показано в [19] для оксида циркония, увеличение температуры с 300 до 1500 К приводит к росту коэффициента оптического поглощения на порядок. При таких условиях начальная неравномерность распределения температуры, обусловленная гауссовым распределением интенсивности излучения в пучке, многократно усиливается, поскольку в центральной зоне воздействия начальная температура выше, чем на краю. Температурная нелинейность возникает в материале ещё до наступления фазового превращения (удаление, окисление). Уменьшение значения k материала ещё больше усиливает эффект, сужая область накопления тепла. Сокращение зоны интенсивного нагрева в наибольшей степени характеризуется горизонтальной составляющей градиента температуры (рис. 6, *a*), поскольку изменение градиента пропорционально разнице температур в соседних точках.

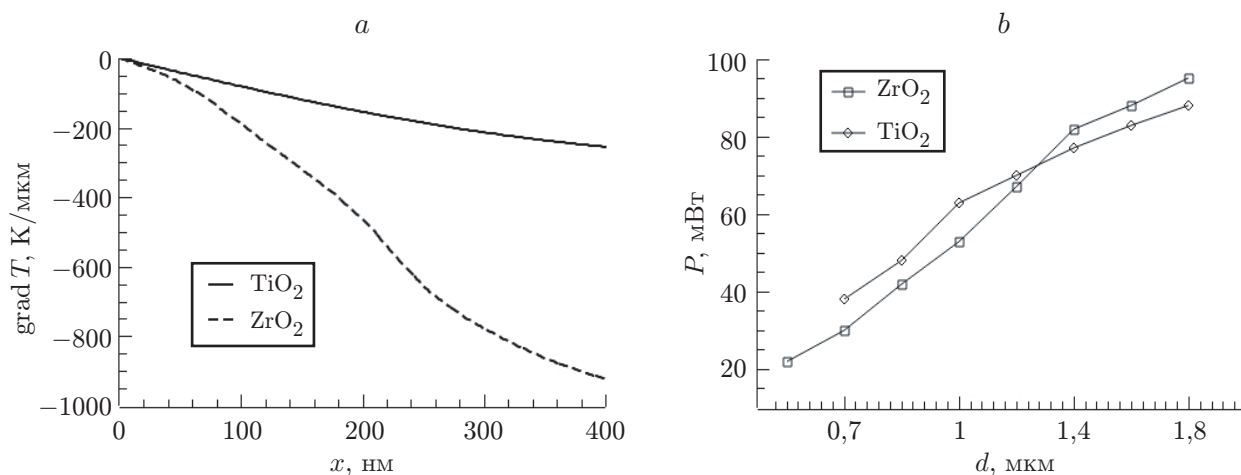


Рис. 6. Распределение температурного градиента (a) и зависимость ширины трека от мощности излучения (b) для плёнок оксидов титана и циркония

Графики температурного градиента получены на основе данных о распределении температуры, представленных в [14]. Из рисунка видно, что уменьшение теплопроводности в 5 раз приводит к значительному росту градиента. На участке, равном эффективному радиусу пятна, соотношение величины достигает 3,5 раза. В точке $x = 400$ нм величина градиента составляет 250 К/мкм для диоксида титана и 900 К/мкм — для диоксида циркония (значения приведены по модулю). Такая разница вполне объясняет наблюдаемое уменьшение минимальной ширины трека с 750 до 550 нм. В то же время близкий экспериментальный результат, полученный для оксидов молибдена и титана, можно объяснить недостаточным проявлением поглощающих свойств TiO_2 . В случае высокой теплопроводности возникающее рассеяние тепла в материале вполне может приводить к результату, полученному для оксида цинка (см. рис. 3).

Следует отметить, что количество треков слабо зависит от линейной скорости (радиуса) сканирования. Так, увеличение радиуса записи от 2 до 10 мм на плёнке оксида циркония приводит к уменьшению количества сформированных треков лишь с 78 до 76. В остальных случаях количество треков в массиве сокращается не более чем на 4. При этом их минимальная ширина остаётся неизменной. Последнее утверждение справедливо и для плёнок оксидов титана и молибдена. В ряду $\text{MoO}_3 - \text{TiO}_2 - \text{ZrO}_2$ количество записанных треков в группе на минимальном радиусе составляет 45, 61 и 78 соответственно, что объясняется монотонным уменьшением теплопроводности. Ещё одной особенностью формирования треков является слабая зависимость их глубины от мощности излучения, что отличается от данных, полученных для импульсного наносекундного лазера [10]. В нашем случае глубина увеличивается только на нескольких первых треках, когда мощность излучения меняется не более чем на 3–5 мВт. Это можно объяснить тем, что на небольшой числовой апертуре выходного объектива (равной 0,3) достигается значительная глубина фокусировки, в результате чего интенсивность излучения по глубине порядка 50 нм распределена относительно равномерно и этого достаточно для равномерной обработки материала. Однако это может быть связано также с тепловым разгоном, приобретающим лавинообразный характер по толщине плёнки.

На рис. 6, b представлена зависимость ширины трека от мощности излучения для плёнок оксидов циркония и титана. Ширина трека, близкая к диаметру пучка, достигается на уровне мощности 90–95 % от максимальной. Важно, что ширина трека остаётся неизменной в пределах изменения мощности на 2–5 мВт, что в сочетании со слабой зависимостью количества треков от радиуса позволяет достаточно легко настроить процесс

на необходимую ширину трека и период. Это справедливо, по крайней мере, для размера поля микроструктур до 20–25 мм.

Заключение. В работе проведено комплексное экспериментальное исследование нелинейного фототермического эффекта в процессе локальной лазерной абляции плёнок оксидов металлов с различной теплопроводностью.

На плёнках оксида цинка в области воздействия излучения наблюдалось лишь взрыхление материала, что связано с высокой теплопроводностью, ограничивающей рост температуры. При этом ширина области взрыхления соответствует эффективному диаметру пучка. Интенсивности излучения лазера в области воздействия оказалось недостаточно для формирования сплошного трека. Для этого требуется большая мощность. Такое поведение плёнки соответствует ранее выдвинутой гипотезе о связи коэффициента теплопроводности с минимальной шириной трека. Фрагментарные треки наблюдались с интенсивностью излучения, близкой к пороговой. На основе полученных здесь и ранее [14] данных можно предположить, что диэлектрические плёнки с высокой теплопроводностью требуют тонкой настройки параметров излучения в области порога абляции для формирования узкого трека, что может быть реализуемо в условиях импульсного наносекундного излучения.

Для плёнок оксидов молибдена, титана и циркония наблюдается сокращение минимальной ширины трека с 800 до 550 нм по мере уменьшения теплопроводности. Такой результат соответствует расчётным данным по распределению температурного градиента на расстоянии, равном эффективному диаметру пятна в области фокусировки. Дополнительным фактором, усиливающим тепловую нелинейность, может быть тепловой разгон в материале, обусловленный температурной зависимостью коэффициента поглощения.

Треки в плёнках оксида молибдена толщиной 45 нм характеризуются образованием выраженных микрозаусенцев, что ограничивает предельное разрешение микроструктур.

Полученный наилучший относительный результат (3,5-кратное уменьшение) существенно отстаёт от результатов в некоторых других работах, проводимых с импульсными наносекундными лазерами [11]. Это может быть связано с возможностью более точной настройки дозы излучения за счёт дополнительной регулировки длительности импульса.

Полученные экспериментальные результаты могут быть основой для изготовления поверхностных периодических структур с повышенным разрешением, играющих ключевую роль в изменении отражающих, поглощающих и излучающих свойств покрытий [6, 7]. Такие микроструктуры находят применение в фотоэлектрике и оптоэлектронном детектировании.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Legeay G., Castel X., Benzerga R. et al. Low-cost photomask fabrication using laser ablation // Journ. Mater. Proc. Technol. 2015. **216**. P. 71–78. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.08.024.
2. Cai J., Lv C., Watanabe A. Laser Direct Writing and Selective Metallization of Metallic Circuits for Integrated Wireless Devices // ACS Appl. Mater. & Interfaces. 2018. **10**, Iss. 1. P. 915–924. DOI: 10.1021/acsami.7b16558.
3. Zhang J., Guo C., Wang Y. et al. Micro-optical elements fabricated by metal-transparent-metallic-oxides grayscale photomasks // Appl. Opt. 2012. **51**, Iss. 27. P. 6606–6611. DOI: 10.1364/AO.51.006606.

4. **Zhang W., Shi Z., Yang X. et al.** Laser induced nano-patterning with atomic-scale thickness on an InAs/GaAs surface // *Semiconductor Sci. and Technol.* 2018. **33**, N 11. 115021. DOI: 10.1088/1361-6641/aae352.
5. **Zhang J., Guo C., Zhang H., Liu Q.** One-step fabrication of micro/nanotunnels in metal interlayers // *Nanoscale.* 2013. **5**, Iss. 18. P. 8351–8354. DOI: 10.1039/C3NR01677C.
6. **Wu J., Huang Y., Shang T. et al.** Femtosecond laser fabrication of silicon surface microstructures for enhanced infrared radiation under electric drive // *Opt. Mater.* 2023. **145**. 114453. DOI: 10.1016/j.optmat.2023.114453.
7. **Кузьмин Е. В., Поляков Д. С., Самохвалов А. А., Шандыбина Г. Д.** Микроструктурирование поверхности кремния при однократном облучении сдвоенным фемтосекундным лазерным импульсом // *Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики.* 2019. **19**, № 3. С. 417–425. DOI: 10.17586/2226-1494-2019-19-3-417-425.
8. **Коронкевич В. П., Корольков В. П., Полещук А. Г.** Лазерные технологии в дифракционной оптике // *Автометрия.* 1998. № 6. С. 5–26.
9. **Yang G., Shen Y.** Laser direct writing system and its lithography properties // *Proc. SPIE.* 1998. **3550**. DOI: 10.1117/12.317917.
10. **Wang S., Zhou Z., Li B. et al.** Progresses on new generation laser direct writing technique // *Mater. Today Nano.* 2021. **16**. 100142. DOI: 10.1016/j.mtnano.2021.100142.
11. **Wang Y., Wang R., Guo C. et al.** Path-directed and maskless fabrication of ordered TiO₂ nanoribbons // *Nanoscale.* 2012. **4**, Iss. 5. P. 1545–1548. DOI: 10.1039/C2NR11822J.
12. **Guo C. F., Zhang J., Miao J. et al.** MTMO grayscale photomask // *Opt. Exp.* 2010. **18**, Iss. 3. P. 2621–2631. DOI: 10.1364/OE.18.002621.
13. **Волков А. В., Моисеев О. Ю., Полетаев С. Д.** Высокоразрешающая лазерная запись контактных масок на плёнках молибдена для изготовления элементов дифракционной оптики // *Компьютерная оптика.* 2013. **37**, № 2. С. 220–225.
14. **Полетаев С. Д.** Численное и экспериментальное исследования фототермического эффекта в тонких плёнках оксида молибдена при лазерной абляции // *Автометрия.* 2023. **59**, № 3. С. 43–51. DOI: 10.15372/AUT20230306.
15. **Kazanskiy N. L., Skidanov R. V.** Technological line for creation and research of diffractive optical elements // *Proc. SPIE.* 2018. **11146**. 111460W. DOI: 10.1117/12.2527274.
16. **Cha D., Axinte D.** Transient thermal model of nanosecond pulsed laser ablation: Effect of heat accumulation during processing of semi-transparent ceramics // *Int. Journ. Heat and Mass Transfer.* 2021. **173**. 121227. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121227.
17. **Bude J., Guss G., Matthews M., Spaeth M. L.** The effect of lattice temperature on surface damage in fused silica optics // *Proc. SPIE.* 2007. **6720**. 672009. DOI: 10.1117/12.752989.
18. **Казанский Н. Л., Полетаев С. Д.** Численное моделирование процесса абляции тонких плёнок молибдена под действием лазерного излучения // *Журнал технической физики.* 2016. **86**, вып. 9. С. 1–6.
19. **Carr C. W., Bude J. D., DeMange P.** Laser-supported solid-state absorption fronts in silica // *Phys. Rev. B.* 2010. **82**, Iss. 18. DOI: 10.1103/PhysRevB.82.184304.

Поступила в редакцию 29.03.2024

После доработки 17.04.2024

Принята к публикации 18.04.2024