

## 10. Прямая лазерная запись высокоапертурных синтезированных голограмм: материалы и методы

*В. П. Корольков, Р. К. Насыров, А. Г. Седухин, Р. В. Шиманский, Д. А. Белоусов, Р. И. Куц*  
Институт автоматки и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук,  
Новосибирск, Россия

Работа посвящена технологиям прямой лазерной записи дифракционных структур на металлических пленках подгрупп титана и хрома, позволяющим изготавливать микроструктуры с периодом до 1 мкм при размере пятна 0,7 мкм. Пространственное разрешение термохимической записи на металлических пленках может быть значительно улучшено за счет сквозного окисления, которое резко увеличивает отрицательную обратную связь при поглощении света. Изучение лазерной записи на пленках циркония и титана продемонстрировало их перспективу в технологии создания компьютерно-синтезированных голограмм. Реактивное ионное травление пленок титана через лазерно-индуцированную оксидную маску может быть использовано для изготовления бинарных фазовых структур. Использование данной технологии должно позволить создавать дифракционные сферические эталоны с апертурой до  $f/0,75$ .

*Ключевые слова:* Синтезированные голограммы, Термохимическая лазерная запись, Металлические пленки, Дифракционные оптические элементы, Оксидная маска.

*Цитирование:* Корольков, В. П. Прямая лазерная запись высокоапертурных синтезированных голограмм: материалы и методы / В. П. Корольков, Р. К. Насыров, А. Г. Седухин, Р. В. Шиманский, Д. А. Белоусов, Р. И. Куц // HOLOEXPO 2019 : XVI международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. — С. 54–59.

### Введение

В настоящее время применение дифракционной оптики ограничено ее относительно низкой оптической силой. Преимуществом такой оптики служит то, что она представляет собой плоскую пластину с микрорельефом, в то время как классическая оптика состоит из нескольких линз со сферическими поверхностями. Однако, при достаточно большом количестве линз можно обеспечить очень высокую светосилу. Светосила синтезированных голограмм (СГ) технологически ограничена минимальным периодом структуры. В настоящее время с достаточной точностью можно изготавливать структуры с периодом 2–3 мкм. Это соответствует углам дифракции 12–18° для длины волны 632,8 нм, используемой, как правило, для интерферометрического контроля. При таких малых периодах уже необходимо использовать точную теорию дифракции. Компьютерное моделирование в рамках скалярной и точной теории показывает расхождение  $\approx \lambda/100$  при периоде 3 мкм и  $\approx \lambda/50$  для 2 мкм [1]. Кроме того, значительно возрастает роль ошибок изготовления. Ряд ошибок, таких как нарушение скважности и наклон стенок дифракционных зон не влияют на качество волнового фронта в рамках скалярной теории, но начинают давать ощутимый вклад в рамках точной теории дифракции.

Конечной целью данной работы было создание СГ с апертурой до  $f/0,75$ . Такая апертура соответствует наиболее светосильным эталонным объективам для интерферометрии (TS).

Это позволит решить задачу изготовления дифракционных аналогов рефракционных объективов и сделать их более доступными. Для этих целей необходимо с высокой точностью создавать микроструктуры с периодом вплоть до 1,1 мкм. Настоящая работа посвящена исследованиям лазерной записи на пленках металлов из групп титана и хрома. Задачей исследования было нахождение металла, обеспечивающего реализацию режима сквозного окисления тонкой пленки с исходным пропусканием порядка 1–10 % в широком диапазоне скоростей сканирования лазерного пучка, который присущ лазерным записывающим системам с круговым сканированием. Они наиболее приспособлены для задач изготовления осесимметричных дифракционных оптических элементов. Сквозное окисление должно существенно поднимать пространственное разрешение из-за обратной связи вследствие падения поглощения энергии лазерного пучка после просветления пленки в центральной зоне гауссова распределения интенсивности. Однако, сквозное окисление требует времени экспозиции порядка 1 мкс и более, что ограничивает изначально скорость сканирования лазерного пучка. Однако, увеличение времени сканирующей лазерной записи компенсируется уменьшением числа технологических операций и погрешностей.

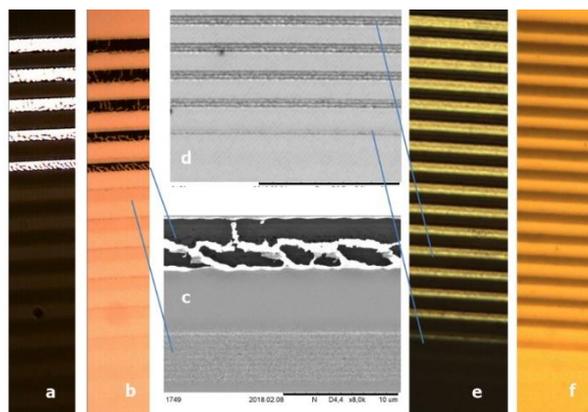
Выбор металлов из указанных подгрупп был сделан на основе анализа их различных физико-химических свойств исходя из их высокой твердости, важной для технологического маскирующего покрытия, низкой температуропроводностью и высокой температурой плавления. Пленкам металлов подгруппы титана также свойственна выраженная склонность к образованию оксидной пленки [2], в силу того, что эти металлы являются пиррофорными.

Пространственное разрешение (ПР) лазерной записи должно возрастать при использовании пленки металла с минимальной температуропроводностью, которая минимальна для подгруппы титана и, в частности, для самого титана. Температуропроводность для всей подгруппы хрома в 2–7 раз выше. С другой стороны, металлы из этой группы в основном лидируют по твердости. Кроме этого, хром является наиболее подходящим материалом для жидкостного химического травления, в том числе селективного по отношению к его оксиду.

Эксперименты по лазерной записи в данной работе проводились на круговой лазерной записывающей системе CLWS-300IAE сфокусированным до диаметра 700 нм пучком DPSS с длиной волны 532 нм [3]. Скорость сканирования пучка в этой системе может изменяться от сотен микрометров до метров в секунду, в зависимости от радиальной координаты записывающего пучка. Это дает возможность исследовать различные режимы записи.

### **1. Подгруппа хрома**

Эксперименты проводились с пленками Cr ( $T = 6,8 \%$ ,  $H = 42$  нм) и Mo ( $T = 3 \%$ ,  $H = 20$  нм), напыленными на стеклянную подложку. На рисунке 1 показаны образцы тестовой решетки, записанные на обеих пленках. Каждая полоса решеток записывалась с различным шагом несколькими проходами лазерного пучка со смещением 0,25 мкм между соседними проходами. При этом, поведение пленок хрома и молибдена было очень похожим. При высокой мощно-



a, b, c — молибден: шаг сканирования 0,5 мкм; d, e, f — хром: шаг сканирования 0,25 мкм

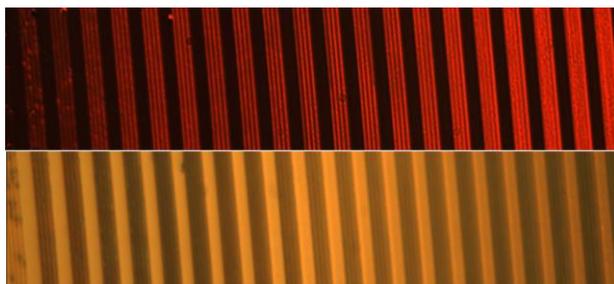
Рис. 1. Тестовые решетки, записанные при скорости сканирования 113 мм/с

сти пленка испаряется (светлая область при пропускании (рисунки 1a и 1e) и слабо отражающая черная область при отражении (рисунки 1b и 1f)). После снижения мощности окисленная пленка становится немного более прозрачной, чем окружающая неэкспонированная область). В отраженном свете открытая область имеет немного меньшее отражение, чем неэкспонированная область. Некоторое увеличение пропускания после прекращения повреждения пленки указывает не только на окисление поверхности, но и в объеме. То есть Cr и Mo не обеспечивают сквозное окисление и могут использоваться только с селективным жидкостным травлением. Поверхности Mo и Cr поверхности всегда имеют тонкий собственный оксид. Когда поверхность металла пассивируется этим оксидом, дальнейшее окисление практически прекращается при комнатной температуре. Лазерный нагрев частично преодолевает этот барьер. Тем не менее, химическое травление металлической пленки, поверхность которой в некоторых местах покрыта толстым оксидом и в других местах, покрытых тонким слоем, требуется найти травитель, селективный к металлу и оксиду. Это было сделано для пленки Cr, экспонированной лазерным пучком [4], но пока не еще сделано для молибденовой пленки, по нашим сведениям. Это возможно связано с тем, что молибден химически более устойчив, чем хром.

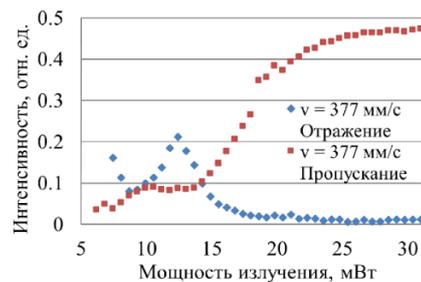
## 2. Подгруппа титана

Основное внимание в этой подгруппе титана было уделено титану и цирконию, как наиболее доступным из данной подгруппы.

На рисунке 2 показана оптическая микрофотография на пропускание (сверху) и отражение (снизу) для тестовых решеток с периодом 1 мкм, записанных при разных мощностях (рост мощности справа налево) по пленке титана с пропусканием 4 %, напыленной на кварцевую подложку. Запись велась при скорости 63 мм/с. Фотографии на пропускание сделаны в красном свете, так как технология предполагается к использованию для создания синтезированных голограмм для интерферометрии. Из рисунка видно, что линии в центре изображения хорошо разрешаются в режиме пропускания. Диапазон мощностей для максимального пространственного разрешения может быть определен на отражение, так как в этом месте

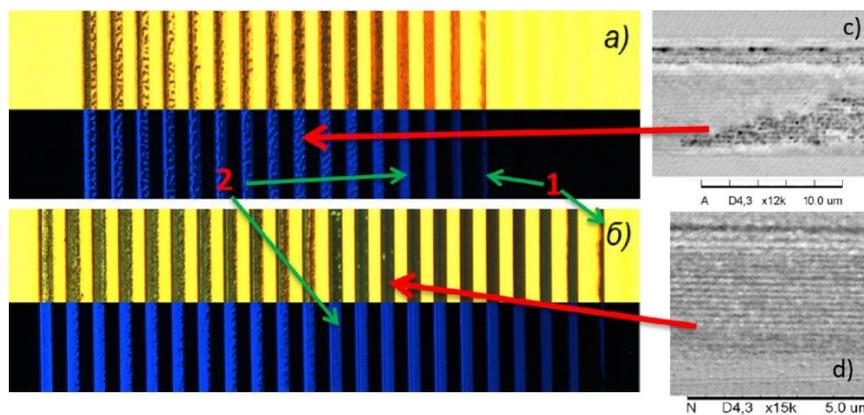


а) микрофотографии решеток пропускание в красном свете и отражение в белом свете



б) зависимость пропускания и отражения от мощности пучка

Рис. 2. Тестовые решетки, записанные на пленке титана



а — шаг сканирования 0,5 мкм; б — шаг сканирования 0,2 мкм; в — дефект структуры; д — наноструктура с периодом 300 нм.

Рис. 3. Микроизображения тестовых решеток, записанных на пленках циркония

отражение увеличивается по сравнению с соседними областями. Соответствующий график взаимосвязи пропускания и отражения при изменении мощности записывающего пучка показан на рисунке 2б. Область, достаточная для поставленной задачи пространственного разрешения примерно соответствует полке на графике пропускания и области между двумя экстремумами на графике отражения.

Исследование прямой лазерной записи методами оптической микроскопии на пленках циркония показало результаты в чем-то подобные титану, но тем не менее с рядом существенных отличий. На рисунке 3 показаны микроизображения (полученные с помощью СЭМ и оптической микроскопии) тестовой решетки, записанной на пленке Zr с пропусканием 3 %.

Видно, что существует, по меньшей мере, три режима процесса записи. Первый деструктивный режим проявляется при записи с высокой мощностью, чему соответствуют самые левые полосы. Как на отражение, так и на пропускание регистрируется крупнозернистая структура (рисунок 3с), которая при усреднении по некоторому участку дает нечеткие пики на графиках сечения, по которым сложно определять реальное значение пропускания/отражения пика. Второй режим — случай однородных полос — соответствует среднему диапазону мощности, увеличивающемуся с уменьшением шага сканирования. При этом отсутствует какая-

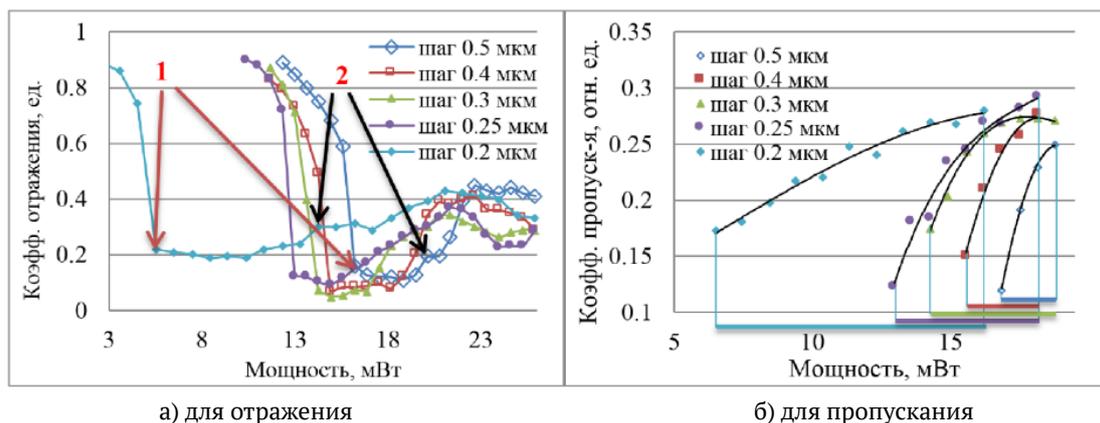


Рис. 4. Зависимость отражения/пропускания структуры от мощности записывающего излучения для разных шагов между треками при заливке полосы и диапазоны по мощности для каждой кривой

либо значительная зернистость. Ошибка регистрации реального значения пропускания/отражения в таком режиме минимальна. Третий режим — режим низких мощностей излучения. Он характеризуется меньшим значением отражения и ничтожно малым ( $\approx 1\%$ ) значением пропускания. Поэтому данный режим не интересен с точки зрения использования в производстве ДОЭ, работающих на пропускание.

Все три режима отчетливо видны на графиках зависимостей отражения и пропускания от мощности пучка при различных шагах записи (рисунок 4): нижняя седловина каждой зависимости соответствует режиму равномерной записи т. к. полосы при этом режиме записи на микрофотографиях на отражение выглядят более черными, чем остальные.

Для тестов с шагом 0,2 и 0,5 мкм на рисунке 4а отмечены две точки — границы режима сверхразрешения. Первая точка отвечает пропаданию режима при низкой мощности записи, вторая — появлению режима со стороны высоких мощностей. Контроль именно этих точек дает на практике возможность детектировать нужный режим и далее находиться в нем при производстве ДОЭ. Таким образом, можно сделать грубую оценку значения мощности лазера, при которой процесс окисления будет протекать в необходимом режиме сверхразрешения. Если перед записью ДОЭ предварительно нанести на пленку тестовые структуры и оценить по графику отражения значения мощности, при которой появляется и исчезает искомый режим, то взяв середину этого диапазона можно вести дальнейшую запись в нужном режиме. При этом необходимо также учитывать поправки из-за радиальной зависимости линейной скорости.

На рисунке 4б показаны кривые пропускания структуры от мощности при различных шагах сканирования. Диапазон мощности каждой кривой выбран для получения однородных полос на отражение и пропускание. Из приведенного графика видно, что самый большой диапазон по мощности соответствует кривой с минимальным шагом сканирования (0,2 мкм). Это обстоятельство дает в процессе записи микроструктур свободу в выборе мощности ( $\approx 7\text{--}5$  мВт) и уменьшает шанс выйти из режима при записи с мощностью, соответствующей

середине диапазона. Режим равномерной заливки интересен на практике, т. к. при такой записи есть широкий диапазон мощности (для каждого шага сканирования диапазон разный), внутри которого, как и отражение, так и пропускание структуры меняются слабо. Помимо этого, более высокое увеличение этих полос (рисунок 3d.) показало наличие структуры с периодом, равным шагу сканирования, так называемому режиму сверхразрешения.

### Заключение

Исследована возможность достижения режима прямой лазерной записи в режиме сквозного окисления для задач формирования дифракционных структур на пленках хрома, молибдена, циркония и титана. Пленки хрома и молибдена не позволили получить такой режим. Определен диапазон мощности лазерного пучка и скорости сканирования для которых режим сквозного окисления реализуется на пленках циркония и титана.

Прямая лазерная запись микроструктур на пленке циркония толщиной 80 нм, напыленной на кварцевую подложку, выявила три режима процесса формирования микроструктуры, один из которых — так называемый режим сверхразрешения — формирование структур с периодом, равным радиальному шагу записи (200–500 нм). По результатам измерения отражения и пропускания экспонированных пленок определен способ детектирования необходимого режима записи по отражению, что важно для практической реализации в технологии производства ДОЭ.

Показано, что и титан и хром обеспечивают пространственное разрешение необходимое для записи дифракционных сферических эталонов с апертурой до  $f/0,75$  для рабочей длины волны 632,8 нм. На следующем этапе исследований будет проведена запись экспериментальных образцов с использованием традиционной термохимической технологии записи на хrome и новой технологии записи сквозным окислением пленок металлов титановой группы.

### Благодарность

Данная работа поддержана грантом РФФИ № 17-19-01721.

### Список источников

- [1] **Peterhänsel, S.** Phase errors in high line density CGH used for aspheric testing: beyond scalar approximation / S. Peterhänsel, C. Pruss, W. Osten // Opt. Exp. — 2013. — № 21. — P. 11638–11651
- [2] **Kiper, R.** Chemistry and toxicology. Databases: Physicochemical properties of substance / URL: <http://chemister.ru/Database/search-en.php>
- [3] **Шиманский, Р. В.** Динамическая коррекция координаты лазерного пучка при записи крупногабаритных дифракционных элементов для контроля асферических зеркал / Р. В. Шиманский, А. Г. Полещук, В. П. Корольков, В. В. Черкашин // Автометрия. — 2017. — Том 53. — № 3. — С. 64–73
- [4] **Veyko, V. P.** Local Laser Oxidation of Thin Metal Films: Ultra-resolution in Theory and in Practice / V. P. Veyko, E. A. Shakhno, A. G. Poleshchuk, V. P. Korolkov, V. Matyzhonok // JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering — 2008. — Vol. 3. — № 3 — P. 201–205.