

33. «Сухой» метод изготовления компьютерно- синтезированных голограмм на основе прямой лазерной записи на пленках титана

*Д. А. Белоусов, В. П. Корольков, Р. К. Насыров, А. Г. Седухин, В. Н. Хомутов,
Р. В. Шиманский, Р. И. Куц, А. И. Малышев*

Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии
наук, Новосибирск, Россия

В работе описан метод изготовления компьютерно-синтезированных голограмм, при котором топология оксидной маски, сформированной прямой лазерной записью на тонкой пленке титана, преобразуется в бинарный фазовый рельеф с использованием «сухих» процессов — реактивного ионного травления титана и термического отжига. Фазовый микрорельеф элементов, изготовленных с помощью описанного метода, представляет собой протравленные в материале кварцевой подложки канавки, между которыми располагаются выступы, покрытые оксидом. Представлены результаты экспериментального и теоретического исследования дифракционных структур, изготовленных по предлагаемой технологии с целью оптимизации их характеристик при использовании для формирования волновых фронтов в интерферометрических измерениях формы сферических и асферических поверхностей.

Ключевые слова: Компьютерно-синтезированные голограммы, Лазерная термохимическая технология, Прямая лазерная запись, Тонкие плёнки металлов, Реактивное ионное травление, Дифракционная эффективность.

Цитирование: Белоусов, Д. А. «Сухой» метод изготовления компьютерно-синтезированных голограмм на основе прямой лазерной записи на пленках титана / Д. А. Белоусов, В. П. Корольков, Р. К. Насыров, А. Г. Седухин, В. Н. Хомутов, Р. В. Шиманский, Р. И. Куц, А. И. Малышев // HOLOEXPO 2020 : XVII международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. — С. 198–204.

Введение

Компьютерно-синтезированные голограммы (КСГ) с фазовым или амплитудным микрорельефом широко применяются для задач формирования эталонных волновых фронтов в интерферометрических измерениях контроля качества сферических и асферических поверхностей [1, 2]. По сравнению с рефракционными объективами КСГ при меньшей стоимости позволяют более точно генерировать волновой фронт с заданными параметрами. Преобразование исходного волнового фронта в волновой фронт с расчётными параметрами при использовании КСГ осуществляется за счёт дифракции падающего излучения на квазипериодической структуре микрорельефа голограммного элемента. К наиболее удобным и дешёвым, с точки зрения изготовления, следует отнести амплитудные КСГ и КСГ с бинарно-фазовой структурой.

Одним из методов изготовления прецизионных амплитудных КСГ является термохимическая технология прямой лазерной записи на тонких пленках хрома с последующим прояв-

лением образованного «скрытого» изображения в селективном травителе [3]. Данная технология основана на том, что лазерное облучение плёнки хрома, нанесенной на поверхность стеклянной подложки, за счёт термохимических процессов приводит к формированию тонкого поверхностного слоя окисла поверх металлической плёнки. Таким образом, лазерная запись рисунка по всей площади будущей КСГ позволяет создать так называемое «скрытое» изображение. При последующей обработке в селективном травителе слой окисла служит в роли защитной маски, а неокислённый хром удаляется с кварцевой подложки, проявляя на её поверхности записанную дифракционную структуру. Критической стадией данной технологии является этап жидкостного травления. Технологические ошибки, возникающие на данном этапе, снижают выход годных элементов. В связи с этим разработка методов позволяющих отказаться от жидкостного проявления «скрытого» изображения при изготовлении КСГ с помощью термохимической прямой лазерной записи на плёнках металлов является актуальной задачей.

1. «Сухой» метод изготовления компьютерно-синтезированных голограмм

В настоящее время различными авторами активно исследуется применение плёнок титана как материала для безрезистной термохимической лазерной записи поверхностных микро-структур [4–8]. В основном, это связано с тем, что при локализованном лазерном нагреве плёнок Ti возможно реализовать режим сквозного окисления, недоступный для пленок хрома. Помимо этого, использование титана позволяет реализовать полностью «сухой» метод формирования топологической структуры КСГ [9], отказавшись от жидкостного травления записанного рисунка. Технологические этапы «сухого» метода изготовления компьютерно-синтезированных голограмм на основе безрезистного процесса прямой лазерной записи на пленках Ti представлены на рисунке 1. При данной технологии, после напыления с помощью магнетронно-распылительной системы пленки титана на кварцевую подложку осуществляется её отжиг в вакууме при температуре 300 °С в течение 2 часов. Процедура отжига позволяет практически полностью устранить образование трещин, которые в противном случае в наших экспериментах были ярко выражены на записанном рисунке при лазерно-индуцированном окислении плёнок титана. После отжига на поверхности металлической плёнки осуществляется лазерная запись «скрытого» изображение, дальнейшее проявление которого выполняется с помощью реактивного ионного травления в смеси CF_4 и O_2 . Затем образец снова помещается в печь для термического отжига, но уже в воздушной атмосфере, что позволяет добиться сквозного окисления металла, который остался под оксидной маской. Таким образом, данная технология позволяет формировать фазовую структуру, которая представляет собой протравленные в материале кварцевой подложки канавки, между которыми располагаются выступы, покрытые оксидом. В том случае, если фазовая глубина сформированного микро-рельефа КСГ не соответствует расчётной, её можно увеличить путём повторной протравки канавок с помощью реактивного ионного травления.

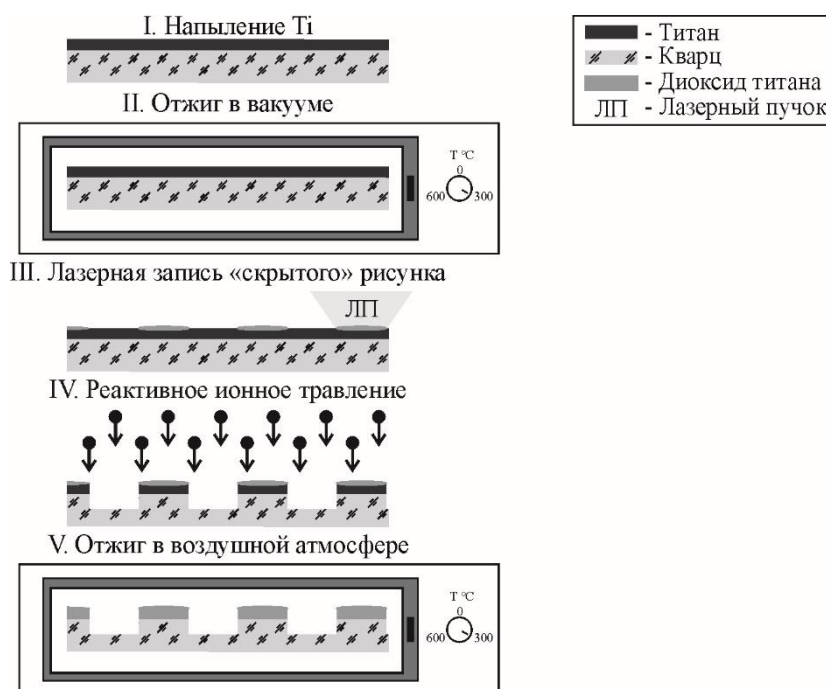


Рис. 1. Технологические этапы «сухого» метода изготовления компьютерно-синтезированных голограмм на основе прямой лазерной записи на пленках титана

На рисунке 2 показан первый тестовый образец дифракционного элемента, записанного на пленке титана, на различных этапах процесса изготовления. На периферии элемента при периоде структуры 1,35 мкм максимально достигнутая при однократном проходе излучения дифракционная эффективность (ДЭ) первого дифракционного порядка на длине волны 632,8 нм составила 17% при общем пропускании структуры 74%. На рисунке 2в видно, что центральная область изготовленного элемента окислилась не полностью. Это вероятно связано с выбранными нами параметрами на этапе термического отжига элемента в воздушной атмосфере, который осуществлялся в течение 2 часов при температуре 300 °С. На наш взгляд, это может быть исправлено путём повышения температуры термического отжига титана в воздушной атмосфере до 800 °С и увеличения времени обработки [10].

Так как представленный образец дифракционной линзы является первым, изготовленным по вышеописанной технологии, очевидно, что не на всех технологических этапах были подобраны оптимальные параметры. Однако по результатам экспериментальной апробации уже сейчас можно сделать вывод о том, что данный метод может применяться для формирования микрорельефа КСГ с бинарно-фазовой структурой.

2. Компенсация искажений, вносимых высокоапертурными КСГ в интерферограммы

Для интерферометрического контроля качества поверхности высокоапертурных оптических элементов в данной работе рассматривается схема стандартного интерферометра Физо, в которой для формирования эталонного волнового фронта используется высокоапертурная КСГ (рисунок 3а). В такой схеме излучение лазерного источника дважды проходит через бинарно-

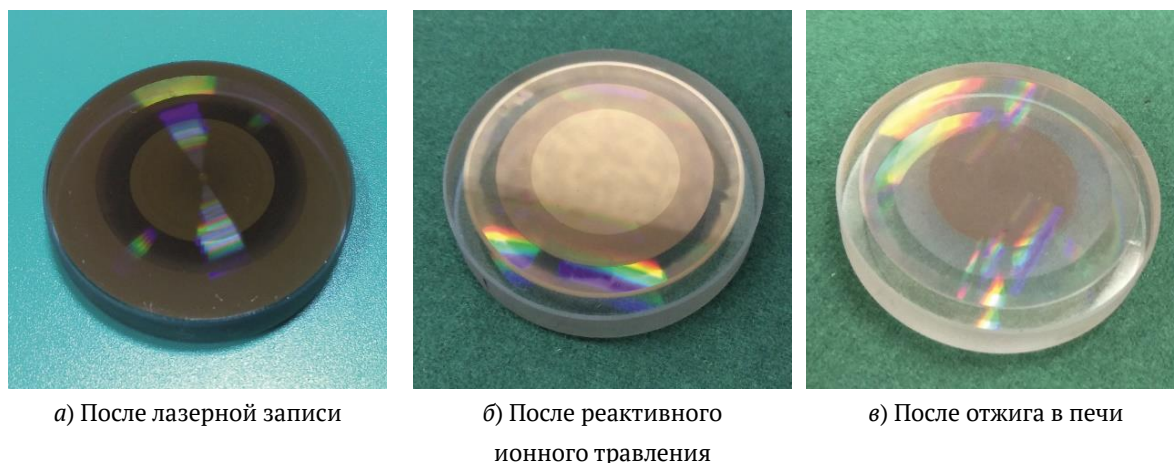


Рис. 2. Фотографии первого образца тестовой дифракционной линзы, записанной на пленке титана, на различных этапах полностью «сухой» технологии

фазовую структуру КСГ. При этом ширина зон по площади голограммы различна и, как правило, зоны с минимальным размером располагаются на периферии КСГ, а их размер может достигать величины сопоставимой с длиной волны используемого для интерференционного контроля источника лазерного излучения. Следует отметить, что Френелевские потери и дифракционная эффективность элемента в рабочем порядке дифракции зависят от периода структуры и ориентации плоскости поляризации излучения по отношению к направлению чередования штрихов КСГ. Эти факторы являются причиной амплитудных искажений, которые проявляются в неравномерном контрасте полос регистрируемой интерференционной картины, что в свою очередь, влияет на точность осуществляемых измерений [9].

В рамках данной работы было проведено моделирование использования КСГ изготовленных с помощью полностью «сухой» технологии в интерференционной схеме Физо с двойным проходом излучения через структуру голограммы (рисунки 3б и 3в). Для моделирования использовались программные продукты MATLAB [11] и Grating Diffraction Calculator (GD-Calc) [12]. При расчётах предполагалось, что КСГ работает в первом дифракционном порядке, а потери излучения при отражении от поверхности исследуемого элемента отсутствуют. Так как стандартной для интерферометрии является длина волны He-Ne лазера — расчёт дифракционной эффективности осуществлялся для источника с длиной волны $\lambda = 633$ нм. Высота оксидных выступов TiO_2 в модели составляла 100 нм, а глубина канавки сформированной в материале подложки 445 нм. Коэффициенты преломления для диоксида титана n_2 и кварцевой подложки n_3 были взяты из открытых источников и составляли 2,1302 [13] и 1,4570 [14] соответственно.

Карты дифракционной эффективности, полученные для двойного прохода дифрагированного в рабочий порядок КСГ излучения, в зависимости от периода структуры d и коэффициента заполнения b/d , где b — ширина канавки, сформированной в кварцевой подложке (рисунки 3б), представлены на рисунке 4а (для ТЕ-поляризации) и рисунке 4б (для ТМ-поляризации). Полученные результаты показывают, что для высокоапертурных КСГ, локаль-

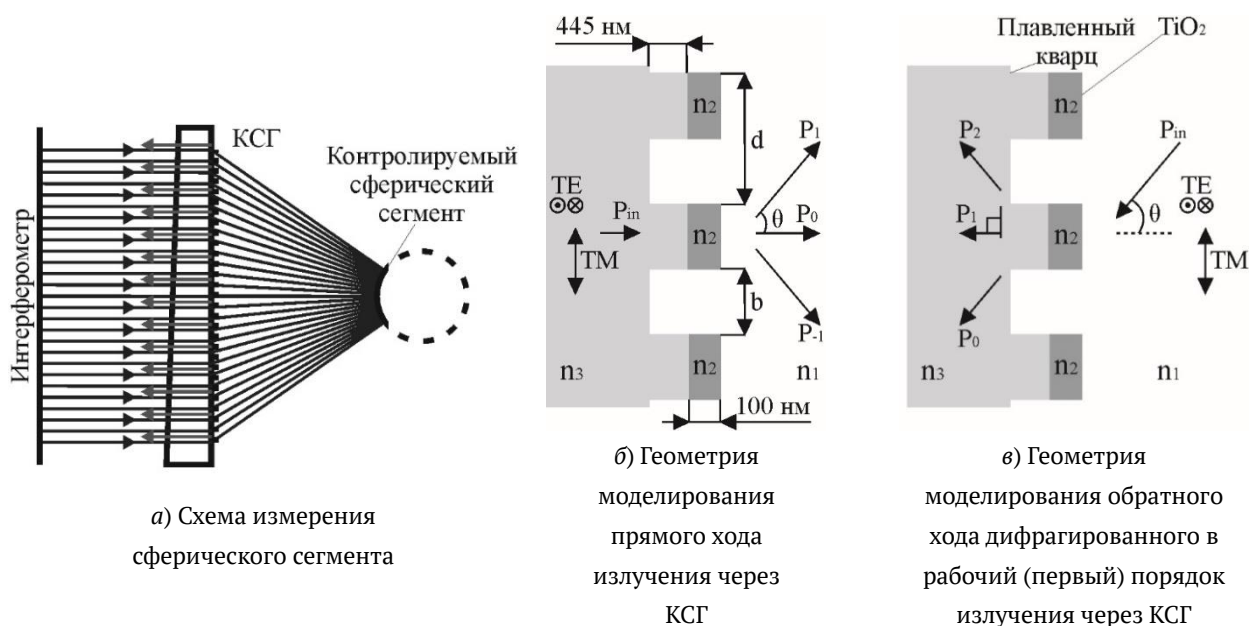


Рис. 3. Контроль формы поверхности в схеме интерферометра Физо

ный период которых приближается к удвоенной длине волны лазерного источника, используемого в интерференционной системе, с целью получения равномерного контраста картины интерференционных полос необходимо осуществлять компьютерное кодирование коэффициента заполнения дифракционных зон записываемой КСГ в зависимости от их локального периода и локальной поляризации лазерного пучка. Это относится не только к КСГ, изготовленным с использованием полностью «сухой» технологии, но и к любым бинарно-фазовым КСГ предназначенным для работы в схеме интерферометра Физо с двойным проходом излучения через их структуру [9].

Интересно отметить, что для моделируемой структуры в диапазоне периодов $0,9-1,2 \text{ мкм}$ для обоих типов поляризации падающего излучения наблюдается отчётливый минимум ДЭ, положение которого зависит коэффициента заполнения дифракционных зон b . Так как период КСГ, используемых для интерферометрического контроля качества формы поверхности меняется плавно, при записи элементов с субмикронными периодами наличие такой области падения ДЭ необходимо учитывать с целью получения равномерного контраста картины интерференционных полос. При необходимости можно добиться сдвига положения области минимума ДЭ, например, подбирая толщину исходного слоя титана, изменяя, таким образом, соотношения глубины канавки сформированной в кварце и высоту диоксида титана покрывающего её выступы.

Заключение

В рамках данной работы показано, что использование плёнок титана позволяет для безрезистивной технологии прямой лазерной записи реализовать полностью «сухой» метод формирования КСГ с бинарно-фазовым микрорельефом. При описанном методе проявление «скрытого» изображения, сформированного при локальной лазерной обработке тонкой пленки ти-

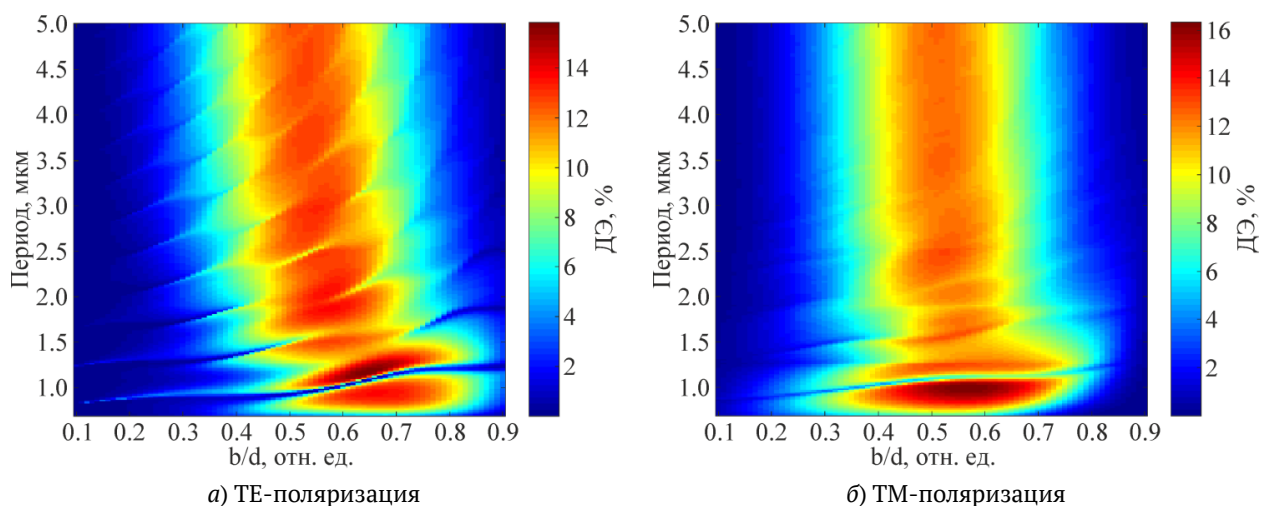


Рис. 4. Карты дифракционной эффективности, полученные при моделировании двойного прохода дифрагированного в рабочий порядок излучения через периодическую структуру КСГ

тана, осуществляется с использованием реактивного ионного травления титана и последующего термического отжига в воздухе, что позволяет отказаться от операции жидкостного травления, снижающего выход годных элементов.

С использованием полностью «сухого» метода был изготовлен первый тестовый образец дифракционной линзы. В центральной области тестового элемента не удалось добиться сквозного окисления плёнки титана. На наш взгляд, это может быть исправлено путём повышения температуры термического отжига титана в воздушной атмосфере до 800 °С и увеличения времени обработки. Реализовать это планируется в дальнейших исследованиях. На периферии элемента, где было достигнуто сквозное окисление плёнки титана, при периоде структуры 1,35 мкм максимально полученная при однократном проходе излучения дифракционная эффективность в первом порядке дифракции на длине волны 632,8 нм составила 17% при общем пропускании структуры 74%.

Проведённое моделирование показало, что при использовании высокоапертурных КСГ, изготовленных по предлагаемой технологии, для формирования эталонных волновых фронтов в интерферометрических измерениях с целью получения равномерного контраста картины интерференционных полос необходимо управлять коэффициентом заполнения дифракционных зон записываемой КСГ в зависимости от их локального периода и локальной поляризации лазерного пучка. Особенно это важно при изготовлении элементов, период которых в локальных областях приближается к величине близкой к удвоенной длине волны лазерного источника, используемого в интерференционной схеме измерения. Следует отметить, что это относится не только к КСГ изготовленным с использованием полностью «сухой» технологии, но и к любым бинарно-фазовым КСГ предназначенным для работы в схеме интерферометра Физо с двойным проходом излучения через их структуру.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17-19-01721-П с использованием оборудования ЦКП «Спектроскопия и оптика» ИАиЭ СО РАН.

Список источников

- [1] **Kim, T.** Null test for a highly paraboloidal mirror / T. Kim, J. H. Burge, Y. Lee, S. Kim // Applied optics. — 2004. — Vol. 43. — № 18. — P. 3614–3618.
- [2] **Poleshchuk, A. G.** Combined computer-generated hologram for testing steep aspheric surfaces / A. G. Poleshchuk, R. K. Nasyrov, J. M. Asfour // Optics Express. — 2009. — Vol. 17. — № 7. — P. 5420–5425.
- [3] **Коронкевич, В. П.** Лазерная термохимическая технология синтеза дифракционных оптических элементов на пленках хрома / В. П. Коронкевич, А. Г. Полешук, Е. Г. Чурин, Ю. И. Юрлов // Квантовая электроника. — 1985. — Том 12. — № 4. — С. 755–761.
- [4] **Gorbunov, A. A.** Lateral self-limitation in the laser-induced oxidation of ultrathin metal films / A. A. Gorbunov, H. Eichler, W. Pompe, B. Huey // Applied physics letters. — 1996. — Vol. 69. — № 19. — P. 2816–2818.
- [5] **Wang, Y.** TiO₂ micro-devices fabricated by laser direct writing / Y. Wang, J. Miao, Y. Tian, C. Guo, J. Zhang, T. Ren, Q. Liu // Optics express. — 2011. — Vol. 19. — № 18. — P. 17390–17395.
- [6] **Шахно, Е. А.** Особенности лазерного окисления тонких пленок титана / Е. А. Шахно, Д. А. Синев, А. М. Кулажкин // Оптический журнал. — 2014. — Том 81. — № 5. — С. 93–98.
- [7] **Достовалов, А. В.** Исследование формирования термохимических лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур на пленках Cr, Ti, Ni и NiCr фемтосекундным излучением / А. В. Достовалов, В. П. Корольков, В. С. Терентьев, К. А. Окотруб, Ф. Н. Дульцев, С. А. Бабин // Квантовая электроника. — 2017. — Том 47. — № 7. — С. 631–637.
- [8] **Xia, F.** Mechanism of pulsed-laser-induced oxidation of titanium films / F. Xia, L. Jiao, D. Wu, S. Li, K. Zhang, W. Kong, M. Yun, Q. Liu, X. Zhang // Optical Materials Express. — 2019. — Vol. 9. — № 10. — P. 4097–4103.
- [9] **Корольков, В. П.** Новые методы изготовления высокоапертурных компьютерно-синтезированных голограмм для формирования эталонных волновых фронтов в интерферометрии / В. П. Корольков, Р. К. Насыров, А. Г. Седухин, Д. А. Белоусов, Р. И. Куц // Автометрия. — 2020. — Том 56. — № 2. — С. 42–54.
- [10] **Sartale, S. D.** Influence of Ti film thickness and oxidation temperature on TiO₂ thin film formation via thermal oxidation of sputtered Ti film / S. D. Sartale, A. A. Ansari, S. J. Rezvani // Materials science in semiconductor processing. — 2013. — Vol. 16. — № 6. — P. 2005–2012.
- [11] MATLAB / URL: www.mathworks.com/products/matlab.html.
- [12] Grating Diffraction Calculator (GD-Calc) / URL: kjinovation.com/.
- [13] Коэффициенты преломления диоксида титана / URL: refractiveindex.info/?shelf=main&book=TiO2&page=Sarkar.
- [14] Коэффициенты преломления плавленого кварца / URL: refractiveindex.info/?shelf=glass&book=fused_silica&page=Malitson.