

## ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЕ ФОРМИРОВАНИЕ LCVD-МЕТОДОМ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ МИКРОСТРУКТУР НА ОБРАТНОЙ СТОРОНЕ ОБЛУЧАЕМОЙ ПОДЛОЖКИ

М. В. КУЗНЕЦОВ

*Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Новосибирск, Россия  
E-mail: say1945@mail.ru*

Представлены результаты экспериментальной проверки теоретической модели, характеризующей процессы одностадийного лазерного интерференционного химического осаждения из парогазовой фазы тонкопленочных периодических микро- и наноструктур на подложке без использования фотолитографических масок. Использованное экспериментальное оборудование содержит лазер YAG:Nd<sup>3+</sup>; вакуумную камеру для осаждения структур в парах летучего карбонила металла, имеющую прозрачное окно для ввода в камеру лазерного излучения; оптико-механическое устройство для формирования методом деления фронта двух когерентных пучков и создания картины двухлучевой интерференции на поверхности стеклянной прозрачной подложки, расположенной в камере. В качестве типичного металлоорганического соединения использован декакарбонил дирения. В соответствии с исследуемой моделью критическим моментом является протекание пиролитического процесса преимущественно в монослое молекул карбонила, адсорбированных на поверхности прозрачной, т.е. непоглощающей излучение подложки. Получено лучшее, по сравнению с проекционной фотолитографией и прямым лазерным рисованием, разрешение периодического топологического рисунка в результате применения двухлучевой интерференции.

**Ключевые слова:** *двухлучевая интерференция, карбонилы, лазерно-химическое осаждение, адсорбированные слои, дифракционная решетка, субмикронные периодические структуры.*

В современной технике при создании различных устройств, имеющих микронные размеры, возникает проблема формирования отдельных элементов на определенном участке поверхности подложки с высокой (до нанометровой) точностью расположения элементов относительно друг друга.

Технологические аспекты микро- и нанoeлектроники рассматриваются в работе [1]. В настоящее время при создании микроустройств применяются методы оптической, электронной и ионно-лучевой литографии. Для этих методов характерна многостадийность. При оптическом экспонировании в связи с дифракционным пределом для обеспечения малых размеров элементов изображения необходимо излучение с малой длиной волны, поэтому используется ультрафиолетовое или мягкое рентгеновское излучение, что требует создания уникальных излучателей и элементов оптических систем. Известны более простые — лазерные — методы получения микроструктур на тонких пленках, при этом изображение маски проецируется с необходимым рисунком [2, 3].

Одним из способов преодоления дифракционного предела при формировании структур с размерами элементов меньше длины волны является метод оптической интерференционной фотографии. При использовании этого метода интерференционная картина на фоторезисте формируется без применения фокусирующих объективов при наложении двух когерентных пучков излучения. В работах [4—8] представлены результаты теоретического анализа и экспериментов по разработке методов двухлучевой интерференционной фотографии с получением одно- и двумерных периодических структур типа решеток.

В настоящей статье представлены результаты экспериментальной проверки теоретической модели, характеризующей процессы одностадийного лазерного интерференционного химического осаждения из парогазовой фазы тонкопленочных периодических микро- и наноструктур на подложке (метод LCVD) без использования фотолитографических масок.

Рассматриваемые в данной статье методы получения рисунков на подложках основаны на интерференционном формировании экспонирующей картины двумя лазерными пучками. Субмикронные металлические структуры образуются на подложке в результате действия механизма лазерного пиролиза паров металлоорганических соединений при использовании наносекундных лазерных импульсов. Формированию металлических пленок наносекундным лазерным осаждением из парогазовой среды летучих металлоорганических соединений посвящен ряд публикаций [9—15]. Актуальность исследований по двухлучевому интерференционному пиролизу заключается в возможности создания одностадийной технологии получения на подложках металлических периодических структур с микро- и наноразрешением.

В случае двухлучевой интерференции плоских когерентных волн с линейной поляризацией, интенсивностью  $I$  и углами падения  $\pm\Theta$  пространственная картина распределения интенсивности определяется формулой [16]

$$I(x) = 2I[1 + \cos(2kx \sin \Theta)] = 4I \cos^2(kx \sin \Theta),$$

где  $x$  — координата;  $k = 2\pi n / \lambda_0$  — волновое число, здесь  $\lambda_0$  — длина волны излучения в вакууме,  $n$  — показатель преломления среды.

Угол  $\Theta$  определяет периодичность  $\Lambda$  интерференционной картины на подложке [7]:

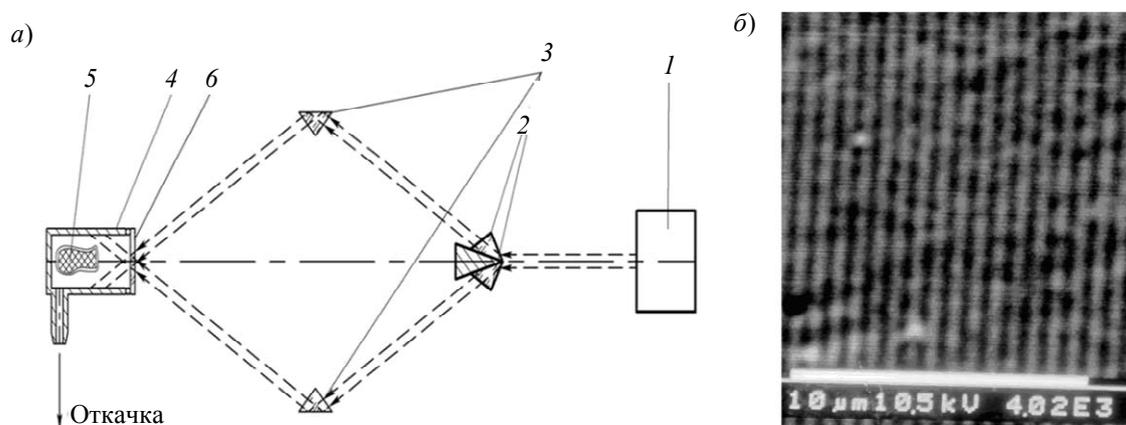
$$\Lambda = \frac{\lambda_0}{2n \sin \Theta}.$$

При формировании интерференционной картины на подложке в камере, заполненной парами реагента и имеющей прозрачные окна для ввода излучения, известной проблемой является загрязнение окон с внутренней стороны непрозрачными продуктами лазерного пиролиза, возникающими синхронно с получением тонкой пленки на подложке. При двухлучевой интерференции интенсивность излучения в области окон меньше интенсивности на подложке в 4 раза, что соответственно уменьшает скорость загрязнения окон, однако проблема этим полностью не решается. В настоящей работе исследована возможность осаждения металлического слоя на обратной стороне подложки, при этом излучение проходит сквозь подложку, и интерференционное поле формируется внутри нее; подложка может быть использована в качестве прозрачного окна камеры с парами реагента.

Рассматриваемый способ формирования структуры на обратной стороне подложки накладывает ограничение на максимальную толщину поглощающей излучение осаждаемой пленки. Однако существуют способы, когда это ограничение не препятствует получению структур, в частности при формировании структур с нанометровыми размерами элементов. При нанометровых толщинах пленки поглощение падающего излучения в растущем слое незначительно сказывается на интенсивности интерференционной картины, а тепловое распределение при этом соответствует интерференционному.

В ходе исследования использовался импульсный режим облучения подложки с длительностью импульсов порядка наносекунд [15].

Функциональная схема экспериментального стенда показана на рисунке, *a*. В качестве основы стенда применена оптическая плита, на которой установлен YAG:Nd<sup>3+</sup>-лазер „Brilliant“ 1, используемый в режиме формирования второй гармоники на длине волны 532 нм; частота повторения импульсов 50 Гц, длительность импульса 6 нс.



Четыре призмы 2, 3 из стекла К8 расположены на плите. Лазерный луч при помощи первых по ходу луча двух призм делится по фронту на две части, а затем сводится в одну точку призмами 3. Пройдя систему из четырех призм, свет попадает в вакуумную камеру 4; атмосферный воздух из камеры откачивался через штуцер с помощью механического форвакуумного насоса до достижения давления  $\sim 100$  Па. Измерения давления в камере проводились при помощи термопарной лампы ПМТ-2 и вакуумметра ВИТ-2. Во внутренний объем камеры помещена капсула 5, изготовленная из металлической фольги и содержащая порошок декакарбонила дирения, летучего при температуре порядка десятков градусов и пиролизически разлагающегося на поверхности подложки с образованием металла и газообразных продуктов при температурах порядка сотен градусов; объем порошка  $2 \text{ мм}^3$ . Расчетное парциальное давление паров в рабочем диапазоне температур камеры  $50 - 70$  °C составляло порядка 10 Па. Фронтальная часть камеры закрыта стеклянной пластиной, которая выполняет функцию „окна“ 6 камеры; внутренняя поверхность окна является поверхностью осаждения пленки.

В результате диссоциации молекул карбонила, находящихся в адсорбированном состоянии на поверхности стеклянной подложки, в областях интерференционных максимумов на подложке на ее второй по ходу луча стороне, обращенной в вакуумную камеру с парами летучего реагента, формируется периодический рисунок из полосок металла рения; толщина слоя металла приблизительно 100 нм (см. рисунок, *б*). Результат получен при  $\Theta=22^\circ$  и длительности цикла облучения подложки 180 с.

Период сформированной структуры 800 нм, ширина полоски 350 нм; структура получена в одностадийном лазерно-интерференционном технологическом процессе. Перспективным направлением исследований является получение структур с меньшим периодом за счет использования излучения с меньшей длиной волны и увеличения угла падения излучения на подложку.

Таким образом, представлены результаты экспериментального исследования процессов одностадийного лазерного интерференционного химического осаждения из парогазовой фазы тонкопленочных периодических микро- и наноструктур на подложке без использования фотолитографических масок. Получены рисунки типа тонкопленочных дифракционных решеток при интерференционном формировании оптической картины на подложке.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Косцов Э. Г. Состояние и перспективы микро- и нанoeлектроники //Автометрия. 2009. Т. 45, № 3.

2. Вейко В. П., Либенсон М. Н. Проекционный способ обработки материалов излучением ОКГ // Физика и химия обработки материалов. 1968. № 4. С. 44—50.
3. Вейко В. П. Лазерная обработка пленочных элементов. Л.: Машиностроение, 1986. 248 с.
4. Won-Tien Tsang, Shyh Wang. Simultaneous exposure and development technique for making grating on positive photoresist // Applied Physics Letters. 1974. Vol. 24, N 4.
5. Won-Tien Tsang, Shyh Wang. Grating masks suitable for ion-beam machining and chemical etching // Applied Physics Letters. 1974. Vol. 25, N 7.
6. Won-Tien Tsang, Shyh Wang. Microfabrication of two-dimensional periodic arrays by laser beam interferometric technique // Applied Physics Letters. 1975. Vol. 27, N 2.
7. Smith H. I. Low cost nanolithography with nanoaccuracy // Physica E. 2001. Vol. 11. P. 104—109.
8. Brueck S. R. J. Optical and interferometric lithography — nanotechnology enablers // Proc. of the IEEE. 2005. Vol. 93, N 10. P. 1704—1721.
9. А.с. 1331369 СССР, МКИ Н 01 L 21/312, G 03 F 1/00. Способ локального нанесения покрытия на подложку / В. В. Чесноков, С. В. Земсков, И. К. Изуменов // Открытия. Изобретения. Бюл. № 30. 1987.
10. Чесноков В. В., Резникова Е. Ф. Прямое рисование на подложках металлических структур с использованием азотного лазера // Тез. докл. Всесоюзн. конф. ВУФ-91, 28—30 мая 1991 г., Томск. М., 1991. С.137—138.
11. Чесноков Д. В. Разработка и исследование наносекундной лазерной микротехнологии формирования оптоэлектронных структур: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2000.
12. Чесноков Д. В. Лазерное пиролитическое осаждение пленок металлов на прозрачных подложках // Сб. трудов VII Междунар. конф. „Прикладная оптика — 2006“, 16—20 окт. 2006 г., Санкт-Петербург. СПб: Оптическое общество им. Д. С. Рождественского, 2006. Т. 2. С. 125—129.
13. Чесноков В. В., Чесноков Д. В. Лазерный интерференционный метод термохимического формирования регулярных наноструктур на подложках // Тез. докл. Рос. конф. и школы по актуальным проблемам полупроводниковой нанофотозлектроники „Фотоника—2011“, 22—26 авг. 2011 г., Новосибирск. Новосибирск: ИФП СО РАН, 2011. С. 80.
14. Chesnokov D. V., Chesnokov V. V. Pyrolytic deposition of metal films on substrates in conditions of the open atmosphere initiated by nanosecond laser irradiation // Proc. of the 5th Intern. Conf. on Actual Problems of Electron. Instrum. Eng., APEIE-2000, 26—29 sept. 2000, Novosibirsk. Novosibirsk: NSTU, 2000. P. 42—46.
15. Чесноков В. В., Чесноков Д. В., Резникова Е. Ф. Лазерные наносекундные микротехнологии. Новосибирск: СГГА, 2003. 300 с.
16. Ахманов С. А., Никитин С. Ю. Физическая оптика. М.: Изд-во МГУ, 1998. 656 с.

**Сведения об авторе**

**Максим Викторович Кузнецов**

— Сибирский государственный университет геосистем и технологий;  
кафедра физики; техник; E-mail: say1945@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
физики

Поступила в редакцию  
04.09.15 г.

**Ссылка для цитирования:** Кузнецов М. В. Интерференционное формирование LCVD-методом тонкопленочных микроструктур на обратной стороне облучаемой подложки // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 1. С. 85—89.

**FORMATION OF THIN-FILM MICRO-PATTERNS  
ON THE REVERSE SIDE OF IRRADIATED SUBSTRATE  
BY THE INTERFERENCE LCVD TECHNIQUE**

**M. V. Kuznetsov**

*Siberian State University of Geosystems and Technologies,  
630108, Novosibirsk, Russia  
E-mail: say1945@mail.ru*

One-stage laser interferential chemical deposition of thin film periodical micro- and nanostructures from vapor phase without application of photolithography masks is studied experimentally. The experimental setup includes YAG:Nd<sup>3+</sup> laser, vacuum chamber for process of structure deposition from volatile metal's carbonyl vapor with transparent window for inletting laser irradiation into the chamber, optical-mechanical set to split the initial front into two coherent beams forming two-beam interference pattern on surface of transparent substrate. Dirhenium decacarbonyl is used as typical metalorganic compound.

Results of the experiments are used to test a theoretical model describing the process of one-stage laser interferential chemical deposition from vapor phase; in accordance with the model, the critical point is shown to be the pyrolysis process taking place mainly in the monolayer of carbonyl molecules adsorbed on the surface of transparent substrate. Application of two-beam interference is reported to provide a higher resolution of periodic topological pattern than projection photolithography and direct laser drawing.

**Keywords:** two-beam interference, carbonyls, laser chemical deposition, adsorbed layers, diffraction grating, submicron periodical structures.

**Data on author**

**Maksim V. Kuznetsov** — Siberian State University of Geosystems and Technologies; Department of Physics; Technician; E-mail: say1945@mail.ru

**For citation:** Kuznetsov M. V. Formation of thin-film micro-patterns on the reverse side of irradiated substrate by the interference LCVD technique // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie. 2016. Vol. 59, N 1. P. 85—89 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-1-85-89