

Лазерная запись силицидных структур на плёнках Ti с покровным слоем Si

Д. А. Белоусов, Р. И. Куц, В. П. Корольков

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

В работе представлены результаты исследования термохимической технологии лазерной записи масок на плёнках титана с тонким покровным слоем кремния. Слой Si выполняет три функции: защищает плёнку титана от медленного окисления в воздухе, увеличивает поглощение лазерного излучения, участвует в реакции образования химически стойкого силицида. Предлагаемая технология позволяет увеличить скорость и диапазон мощности лазерной записи дифракционных структур по сравнению с записью на однослойных плёнках титана. Предложено объяснение обнаруженного эффекта аномального фазового сдвига между выступами и канавками записанных отражательных решёток, зависящего от скорости сканирования пучка и толщины слоя Si.

Ключевые слова: Термохимическая технология, Прямая лазерная запись, Тонкие плёнки металлов, Покровный слой, Коэффициент поглощения, Дифракционная оптика.

Цитирование: Белоусов, Д. А. Лазерная запись силицидных структур на плёнках Ti с покровным слоем Si / Д. А. Белоусов, Р. И. Куц, В. П. Корольков // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 318–323.

Введение

В настоящее время элементы дифракционной оптики и нанофотоники, представляющие собой оптические подложки с микро- и нанорельефом поверхности широко используются в различных промышленных и научных приложениях. Одним из методов формирования поверхностного рельефа рабочей структуры данных элементов является термохимическая лазерная технология, которая основана на локальном окислении тонкой металлической пленки (за счет ее локального нагрева под действием лазера) с последующим травлением неокисленного участка. В качестве регистрирующего материала для данной технологии, как правило, используют пленки хрома, но могут применяться и другие металлические пленочные покрытия. В частности, в настоящее время активно исследуется использование пленок титана [1, 2]. Однако существенным недостатком титановых пленок для лазерной записи является нестабильность их характеристик из-за постепенного окисления при хранении. Для решения этой проблемы, поверх плёнки титана можно напылять тонкий покровный слой другого материала, например кремния [3, 4]. Однако в таком случае помимо защитной функции покровный слой кремния при нагреве сфокусированным лазерным пучком также участвует в термохимической реакции и, в частности, стимулирует образование силицида титана на границе кремний-титан [4]. В докладе представлены результаты исследования термохимической технологии формирования силицидных масок на плёнках титана методом термохимической лазерной записи на двухслойных плёнках кремний/титан (Si/Ti).

Термохимическая лазерная запись на плёнках Ti с покровным слоем

Si

Толщина покровного слоя кремния имеет важное значение при термохимической лазерной записи на двухслойных плёнках Si/Ti [3, 4]. Например, при толщине слоя Si ~5 нм отражение двухслойной пленки будет минимально на длине волны 405 нм, а при толщине ~10 нм на длине волны 532 нм [4].

В данной работе для записи тестовых структур на плёнках Si/Ti использовались установка ХУ-лазерной нанолитографии (длина волны лазерного записывающего пучка $\lambda = 405$ нм) [5] и круговая лазерная записывающая система ($\lambda = 532$ нм) [6]. Для экспериментов были изготовлены образцы однослойной плёнки Ti (Образец #1) и двухслойных плёнок Si/Ti (Образец #2 и Образец #3). Для двухслойных плёнок Si/Ti толщина покровного слоя кремния подбиралась с целью увеличения поглощения на соответствующей длине волны лазерного записывающего пучка (405 нм и 532 нм). На рис. 1 представлены спектры отражения полученных образцов (на всех образцах толщина слоя Ti составляет 50 нм). Поглощение излучения для образцов Si/Ti на длинах волн 405 нм (Образец #2) и 532 нм (Образец #3) по сравнению с плёнкой Ti было увеличено в ~1,3 и ~1,7 раза соответственно.

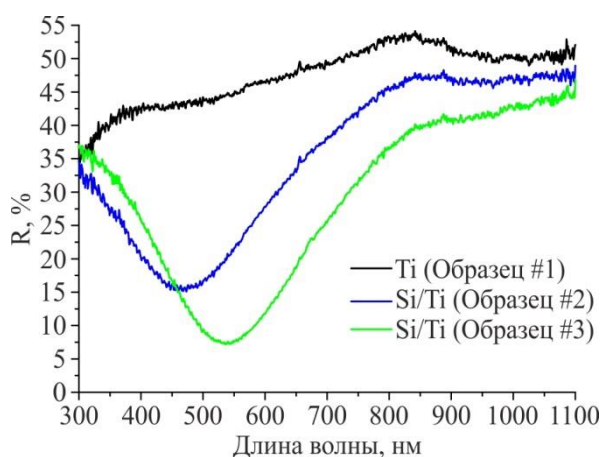
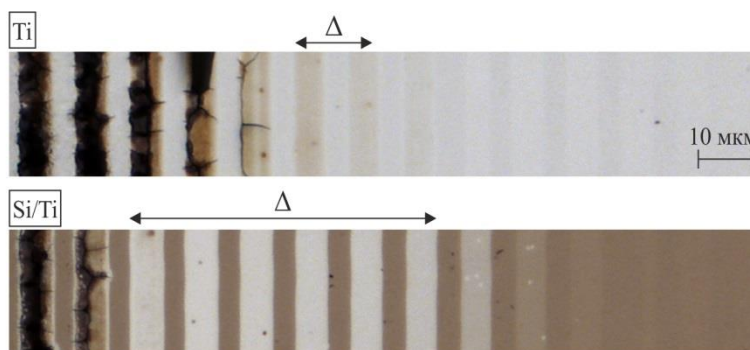
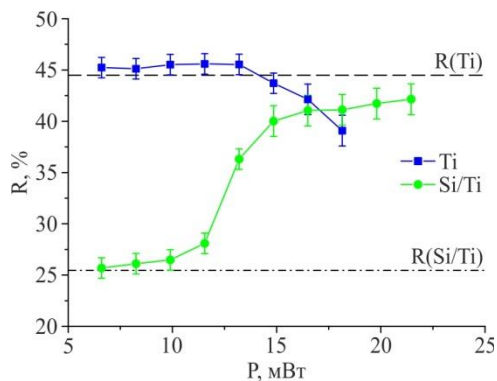


Рис. 1. Спектры отражения исследуемых образцов плёнок Ti и Si/Ti



а) Микроизображения на отражение тестовых структур, записанных с различной мощностью при прямой лазерной записи на плёнке Ti (сверху) и двухслойной плёнке Si/Ti (снизу)



б) Изменение отражения (на длине волны 532 нм) модифицированных участков плёнок Ti и Si/Ti

Рис. 2. Запись тестовых структур на плёнках Ti и Si/Ti (длина волны лазера 405 нм)

На рис. 2а представлены микроизображения в отражённом свете экспонированных участков плёнки Ti (Образец #1) и двухслойной пленки Si/Ti (Образец #2). Данные эксперименты проводились на установке XY-лазерной литографии (параметры записи: диаметр лазерного пучка ~700 нм (FWHM); скорость сканирования (V) 1,6 мм/с; режим записи – импульсный; длина импульсов ~2 нс; пространственный период импульсов 250 нм). Отдельные полосы на рис. 2а были сформированы путём записи группы треков. Каждая группа треков записывалась при определенном значении мощности лазерного пучка (P) с шагом сканирования между отдельными треками равным 250 нм. Такой шаг обеспечивал частичное наложение лазерного записывающего пучка на уже модифицированные участки облучённой плёнки. Группы треков записывались с периодом 10 мкм относительно друг друга. На рис. 2б показаны зависимости изменения отражения от экспонированных участков на исследуемых образцах. На рис. 2а видно, что диапазон мощности термохимической лазерной записи (Δ) для плёнки Si/Ti существенно увеличен по сравнению с записью на однослойной плёнке Ti.

Использование покровного слоя кремния, также позволяет увеличить скорость лазерной записи. Например, при толщине пленки Ti ~ 60 нм максимальная скорость сканирования при лазерной записи составляет ~ 200 мм/с [7]. При этом экспериментальные результаты лазерной записи на плёнке Si/Ti (Образец #3) на круговой лазерной записывающей системе показали возможность увеличения скорости сканирования как минимум до 600 мм/с [4]. И можно предположить, что данная скорость записи не является предельной. Было получено, что термохимическое лазерное воздействие на плёнку Si/Ti приводит к образованию в экспонированных участках силицида титана, оксида титана в форме рутила и возможно оксида кремния [4]. На интерферометре белого света (WLI) были получены оптически измеренной глубины профиля (ОИГП) тестовых структур, сформированных на пленках Si/Ti, в зависимости от мощности и скорости сканирования лазерного записывающего пучка (рис. 3). По полученным данным видно, что при лазерной записи на Образце #3 наблюдается увеличение оптически измеренной глубины профиля тестовых структур до ~150 нм, в то время как их физическая глубина, измеренная на атомно-силовом микроскопе, не превышала 25 нм. Данный эффект можно объяснить тем, что электрические и оптические свойства силицида титана близки к свойствам металлов. В связи с этим при отражении от него света возникает значительный фазовый сдвиг по отношению к участкам неэкспонированного слоя кремния. Также можно отметить, что с уменьшением скорости записи оптически измеренная фазовая глубина структур увеличивалась. При этом при лазерной записи на Образце #2, толщина покровного слоя Si на котором тоньше в ~2 раза по сравнению с Образцом #3, существенного увеличения параметра ОИГП не наблюдалось. Таким образом, полученные результаты показывают, что обнаруженный эффект зависит как от скорости записи, так и от толщины покровного слоя кремния.

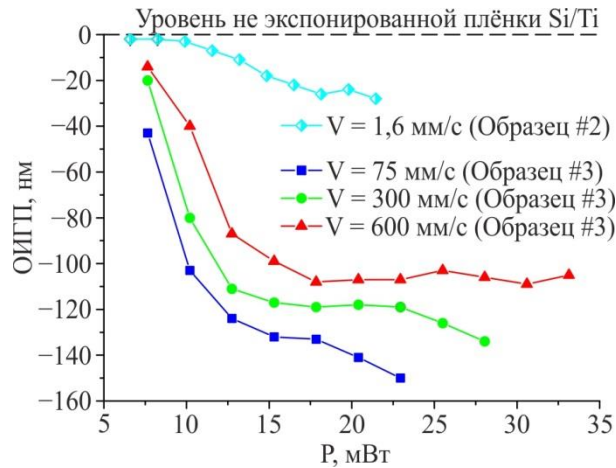


Рис. 3. Оптически измеренная глубина профиля тестовых структур (длина волны лазерного записывающего пучка 532 нм).

Заключение

Проведено исследование термохимической технологии прямой лазерной записи на плёнках Ti с покровным слоем Si. Полученные результаты показывают, что использование антиотражающего слоя кремния позволяет увеличить скорость термохимической лазерной записи на пленке Ti не менее чем до 600 мм/с. При этом существенно увеличивается диапазон мощности термохимической лазерной записи по сравнению с записью на однослойной плёнке Ti. При одноэтапной технологии прямой лазерной записи на двухслойной плёнке Si/Ti обнаружен эффект аномального фазового сдвига между выступами и канавками записанных отражательных решёток, который зависит от скорости сканирования лазерного записывающего пучка и толщины покровного слоя Si. Данный эффект может быть использован для одноэтапной технологии лазерной записи отражательных дифракционных оптических элементов (ДОЭ). Для этого толщину покровного слоя Si нужно оптимизировать не с целью увеличения поглощения на длине волны записывающего пучка, а из условия получения оптической глубины профиля, равной четверти рабочей длины волны ДОЭ.

При термохимической лазерной записи на двухслойных плёнках Si/Ti покровный слой кремния также участвует в термохимической реакции и приводит к образованию в экспонированных участках силицида титана и, возможно, оксида кремния. Проявление химически стойкого силицида титана, путём травления неэкспонированного слоя Si, с последующим селективным травлением неэкспонированной титановой пленки может сделать возможным формирование силицидных или силицидно-титановых масок на подложке из плавленого кварца. Дальнейшее реактивное ионное травление подложки из плавленого кварца через сформированную силицидно-титановую маску (например, в смеси CF_4 и H_2 [8]) может быть использовано для изготовления ДОЭ с фазовой структурой микрорельефа. Соотношение скоростей травления $SiO_2:TiSi_2$ может достигать 40:1 [8]. Это выше селективности стандартной хромовой технологии, для которой соответствующее соотношение скоростей травления $SiO_2:Cr$ составляет ~30:1.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 22-79-00049 с использованием оборудования ЦКП «Спектроскопия и оптика» ИАиЭ СО РАН и ЦКП «Высокие технологии и аналитика наносистем» НГУ.

Список источников

- [1] **Shakhno, E. A.** Features of laser oxidation of thin films of titanium / E. A. Shakhno, D. A. Sinev, A. M. Kulazhkin // *Journal of Optical Technology*. — 2014. — Vol 81. — № 5. — P. 298–302.
- [2] **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.
- [3] **Korolkov, V. P.** Usage of dry processes for the formation of diffractive structures on Ti and Ti/Si films / V. P. Korolkov, R. I. Kuts, A. I. Malyshev, D. A. Belousov, A. E. Matochkin // *SPIE Conference Proceeding*. — 2021. — Vol. 11873. — P. 1187307. — DOI: 10.1117/12.2597162.
- [4] **Belousov, D. A.** Direct Laser Writing of Diffractive Structures on Bi-Layer Si/Ti Films Coated on Fused Silica Substrates / D. A. Belousov, R. I. Kuts, K. A. Okotrub, V. P. Korolkov // *Photonics*. — 2023. — Vol. 10. — № 7. — P. 771.
- [5] **Корольков, В. П.** Оптимизация оптического канала X-Y лазерного нанолитографа для записи на фото- и термочувствительных материалах / В. П. Корольков, А. Г. Седухин, А. Е. Качкин, А. Е. Елисафенко // *Интерэкспо Гео-Сибирь. Национальная конференция с международным участием "СИБОПТИКА-2019"*. — 2019. — Том 8. — С. 28–33.
- [6] **Poleshchuk, A. G.** Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure / A. G. Poleshchuk, E. G. Churin, V. P. Koronkevich, V. P. Korolkov, A. A. Kharissov, V. V. Cherkashin, V. P. Kiryanov, A. V. Kiryanov, S. A. Kokarev, A. G. Verhoglyad // *Applied Optics*. — 1999. — Vol 38. — № 8. — P. 1295–1301.
- [7] **Korolkov, V. P.** Increasing the spatial resolution of direct laser writing of diffractive structures on thin films of titanium group metals / V. P. Korolkov, A. G. Sedukhin, D. A. Belousov, R. V. Shimansky, V. N. Khomutov, S. L. Mikerin, E. V. Spesivtsev, R. I. Kuts // *SPIE Conference Proceeding*. — 2019. — Vol. 11030. — P. 110300A. — DOI: 10.1117/12.2520978.
- [8] **Jaso, M. A.** Etch Selectivity of Silicon Dioxide over Titanium Silicide Using CF_4/H_2 Reactive Ion Etching / M. A. Jaso, S. W. Robey, G. S. Oehrlein // *Journal of the Electrochemical Society*. — 1989. — Vol 136. — № 12. — P. 3812.

Laser Writing of Silicide Structures on Ti Films with Capping Layer of Si

D. A. Belousov, R. I. Kuts, V. P. Korolkov

Institute of Automation and Electrometry of the SB RAS, Novosibirsk, Russia

The paper presents the results of development of thermochemical technology for forming masks on titanium films by stimulating the formation reaction of titanium silicide during the heating of a capping layer of silicon on titanium using a focused laser beam. The Si layer serves three functions: it protects the titanium film from slow oxidation in the air, enhances absorption of laser irradiation,

and participates in the formation of chemically stable silicide. The proposed technology enables an increase in speed and power range of laser writing of diffractive structures compared to writing on Ti films. The study discovered an effect that increases the phase changes between grooves and ridges of the written reflection gratings, depending on the beam scanning speed and the Si layer thickness.

Keywords: Thermochemical laser technology, Direct laser writing, Thin metal films, Capping layer, Absorption coefficient, Diffractive optics.