

# Оптимизация параметров двухслойной плёнки $Si/Ti$ для термохимической лазерной записи дифракционных структур

Д.А. Белоусов  
Институт автоматики и  
электрометрии СО РАН  
Новосибирск, Россия  
belousovda@iae.nsk.su

Р.И. Куц  
Институт автоматики и  
электрометрии СО РАН  
Новосибирск, Россия  
r.i.kuts@mail.ru

В.П. Корольков  
Институт автоматики и  
электрометрии СО РАН  
Новосибирск, Россия  
victork@iae.nsk.su

**Аннотация** — В работе представлены результаты оптимизации толщины антиотражающего слоя  $Si$ , напыляемого на плёнку  $Ti$ . Показано, что использование антиотражающего слоя кремния позволяет, помимо защиты металлической плёнки от окисления в воздушной атмосфере, существенно повысить поглощение лазерного излучения на длинах волн 375 нм, 405 нм и 532 нм для задач термохимической лазерной записи на двухслойных плёнках  $Si/Ti$  дифракционных структур.

**Ключевые слова** — дифракционная оптика, термохимическая технология, прямая лазерная запись, тонкие плёнки металлов, многослойные плёнки, антиотражающие покрытия

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время тонкие плёнки титана активно исследуются с целью их использования для формирования поверхностных дифракционных структур методами термохимической лазерной записи [1-5]. Одной из причин интереса к данному материалу является тот факт, что в отличие от стандартных для термохимической технологии плёнок хрома, использование титана позволяет при локальном лазерном нагреве реализовать режим сквозного окисления металлической плёнки. Также можно отметить, что для плёнок титана был разработан полностью «сухой» метод формирования поверхностных дифракционных структур, который позволяет отказаться в технологическом процессе от жидкостного травления рисунка, записанного лазерным пучком [6]. Однако, одной из проблем при использовании плёнок титана является постепенное окисление металла в воздушной атмосфере. Это приводит к нестабильности параметров металлической плёнки, как с точки зрения лазерной записи, так и с точки зрения ухудшения контраста сформированных дифракционных структур. В ИАиЭ СО РАН было предложено для защиты плёнки титана от окисления в воздушной атмосфере напылять тонкий поверхностный слой кремния [7]. Помимо защитных функций напыляемый поверхностный слой кремния может служить в качестве антиотражающего покрытия, увеличивая поглощение излучения на длине волны лазерного записывающего пучка. В данной работе представлены результаты определения оптимальной толщины антиотражающего слоя  $Si$ , напыляемого на плёнку  $Ti$ , с целью повышения поглощения лазерного излучения на длине волны лазерных записывающих систем, используемых в ИАиЭ для записи дифракционных структур.

## 2. ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВУХСЛОЙНОЙ ПЛЁНКИ $Si/Ti$

Оптимизация толщины поверхностного слоя  $Si$ , напыляемого на плёнку  $Ti$ , осуществлялась путём определения максимального коэффициента поглощения ( $A$ ) излучения двухслойной регистрирующей среды  $Si/Ti$  на длинах волн записывающего пучка трёх лазерных записывающих систем:  $DWL66+$  ( $\lambda = 375$  нм) [8]; стенд для лазерной литографии ( $X-Y$  ЛНЛ) [9] ( $\lambda = 405$  нм); круговая лазерная записывающая система (КЛЗС) [10] ( $\lambda = 532$  нм). Для моделирования спектральных характеристик двухслойной плёнки был использован общедоступный калькулятор спектров «[www.filmetrics.com](http://www.filmetrics.com)». Результаты моделирования показали (рис. 1), что для толщин плёнки  $Ti$  выше 20–25 нм оптимальная толщина поверхностного антиотражающего слоя  $Si$  для всех моделируемых длин волн не изменяется и составляет 3 нм (для  $\lambda = 375$  нм), 5 нм (для  $\lambda = 405$  нм) и 13 нм (для  $\lambda = 532$  нм). Проведённое экспериментальное исследование подтвердило, что при данных толщинах поверхностный слой  $Si$  защищает плёнку  $Ti$  от окисления в воздушной атмосфере при комнатной температуре, однако позволяет осуществлять термохимическое окисление металлической плёнки при локализованном лазерном нагреве.

Использование антиотражающего покрытия  $Si$  при толщине плёнки  $Ti \geq 30$  нм для всех исследуемых длин волн позволяет добиться увеличения коэффициента поглощения ( $A$ ) более чем в 1,5 раза по сравнению с обычной плёнкой  $Ti$  (рис. 2). Наибольшее увеличение коэффициента поглощения может быть получено на длине волны 532 нм, для которой величина  $A$  может быть увеличена до  $\sim 2$  раз. На рис. 3 показано, что на длине волны 532 нм достигается также и максимальный контраст записи на отражение (отношение коэффициентов отражения ( $R$ ) плёнки  $Ti$  к плёнке  $Si/Ti$ ). При толщине плёнки  $Ti = 70$  нм увеличение контраста составляет до  $\sim 26$  раз. При этом на длине волны 375 нм можно добиться увеличения контраста записи на отражение всего в  $\sim 3,2$  раза, а на длине волны 405 нм в  $\sim 8,9$  раз. Следует отметить, что для данных длин волн напыляемая плёнка  $Si$  достаточно тонкая. Чем тоньше поверхностная плёнка  $Si$ , тем меньше при лазерном термохимическом нагреве она препятствует диффузии кислорода к металлической плёнке, необходимого для процесса её окисления. Однако неоднородность при напылении таких тонких плёнок может не позволить достичь предельных теоретических значений вышеописанных параметров.

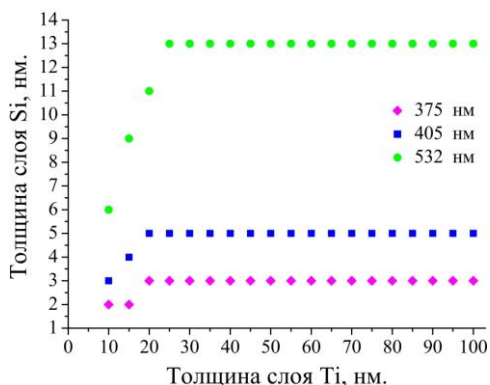


Рис. 1. Оптимизация толщины отдельных слоёв двухслойной металлосодержащей регистрирующей среды  $Si/Ti$

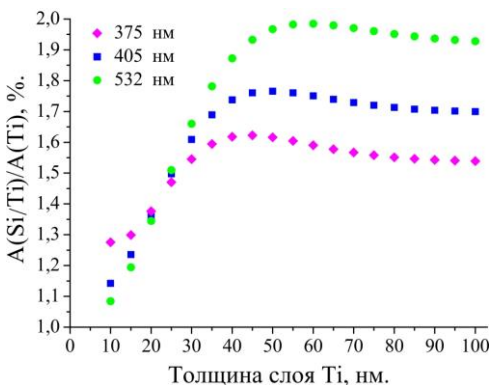


Рис. 2. Отношение коэффициента поглощения двухслойной плёнки  $Si/Ti$  к коэффициенту поглощения плёнки титана

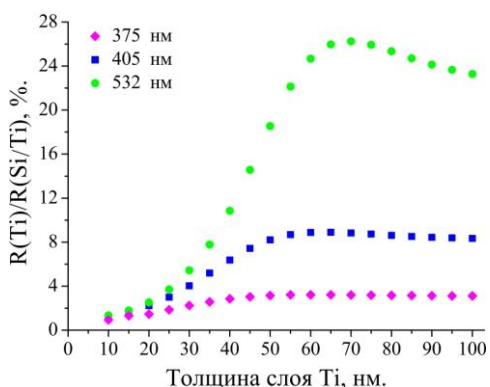


Рис. 3. Отношение коэффициента отражения плёнки титана к коэффициенту отражения двухслойной плёнки  $Si/Ti$

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённого исследования можно отметить, что при термохимической лазерной записи на двухслойной плёнке  $Si/Ti$  с использованием лазерных записывающих систем с длинами волн 375 нм, 405 нм и 532 нм, толщина поверхностного антиотражающего слоя кремния не превышает 3 нм, 5 нм и 13 нм соответственно. При таких толщинах слой кремния выполняет защитную функцию, препятствуя окислению плёнки титана в воздушной атмосфере при комнатной температуре, но при локализованном лазерном нагреве позволяет осуществлять термохимическое окисление металлической плёнки. Кроме того полученные результаты показывают, что использование кремния в качестве антиотражающего покрытия позволяет существенно увеличить поглощение в двухслойной плёнке  $Si/Ti$  по сравнению с обычной плёнкой  $Ti$ . При этом максимальное увеличение поглощения наблюдается для длины волны 532 нм (до  $\sim 2$  раз). В свою очередь, на длинах волн 375 нм и 405 нм увеличения поглощения излучения может составлять до

$\sim 1,62$  и  $1,76$  раза соответственно. Также наблюдается увеличение контраста лазерной записи на отражение от  $\sim 3,2$  раз (для длины волны 375 нм) до  $\sim 26$  раз (для длины волны 532 нм). Полученные результаты показывают перспективность исследований в области лазерной записи дифракционных структур на двухслойных плёнках  $Si/Ti$ .

### БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-79-00049).

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Wang, Y.  $TiO_2$  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. DOI: 10.1364/OE.19.017390.
- [2] Шахно, Е.А. Особенности лазерного окисления тонких пленок титана / Е.А. Шахно, Д.А. Синев, А.М. Кулажкин // Оптический журнал. – 2014. – Т. 81, №. 5. – С. 93–98.
- [3] 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. – Т. 47, №. 7. – С. 631–637.
- [4] 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. DOI: 10.1364/OME.9.004097.
- [5] 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. Kutz // Holography: Advances and Modern Trends VI. – International Society for Optics and Photonics. 2019. – Vol. 11030. – P. 11030A. – DOI: 10.1117/12.2520978.
- [6] 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.
- [7] Korolkov, V.P. Usage of dry processes for the formation of diffractive structures on Ti and Ti/Si films / V.P. Korolkov, R.I. Kutz, A.I. Malyshev, D.A. Belousov, A.E. Matochkin // Optical Fabrication, Testing, and Metrology VII. – SPIE, 2021. – Vol. 11873. – P. 1187307. – DOI: 10.1117/12.2597162.
- [8] Heidelberg instruments Web Site [Electronic resource]. — Access mode: <https://heidelberg-instruments.com/product/dwl-66-laser-lithography-system/> (04.11.2022)
- [9] IAE SB RAS Shared Equipment Center Web Site [Electronic resource]. — Access mode: <https://www.iae.nsk.su/ru/collab-center> (04.11.2022)
- [10] Koronkevich, V.P. Fabrication of kinoform optical elements / V.P. Koronkevich, V.P. Kirynov, V.P. Kokoulin, A.G. Poleschuk // Optik. – 1984. – Vol. 67(3). – P. 257–266.