

Оптический журнал

Оптическое материаловедение и технология
Optical materials and technology

DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-10-108-115

УДК (681.7.064.454+544.774):621.373.826

Нанесение просветляющего лазерного покрытия силикатным золь-гель методом

ЕЛЕНА ИННОКЕНТЬЕВНА ИСТОМИНА¹, ВИКТОР НИКОЛАЕВИЧ ФЕДОСЕЕВ²✉,
ВЕРОНИКА ВЛАДИМИРОВНА ВЫСОЦКАЯ³, ВАЛЕРИЙ ГРИГОРЬЕВИЧ ЖУПАНОВ⁴

НИИ НПО «ЛУЧ», Подольск, Россия

¹IstominaEl@sialuch.ru <https://orcid.org/0000-0002-6729-247X>

²FedoseevVN@sialuch.ru <https://orcid.org/0000-0002-1231-0087>

³VysotskaiaVV@sialuch.ru <https://orcid.org/0000-0002-0860-068X>

⁴ZhupanovVG@sialuch.ru <https://orcid.org/0000-0003-0117-5761>

Аннотация

Предмет исследования. Просветляющие SiO_2 -покрытия на кварцевых подложках для мощных импульсных лазеров в ближнем инфракрасном диапазоне. **Цель работы.** Отработка технологии нанесения просветляющих лазерных покрытий на кварцевые подложки по силикатному золь-гель методу. **Метод.** В основе применённого золь-гель метода лежит известный Штобер-процесс, позволяющий получать однородные сферические наночастицы двуокиси кремния контролируемого размера в коллоидном растворе золя. Золь готовился на основе тетраэтоксисилана, этилового спирта и водного раствора аммиака. Нанесение покрытия осуществлялось методом погружения образцов и извлечения с контролируемой скоростью. **Основные результаты.** Описаны основные параметры приготовления золя, режимы нанесения покрытия и термической обработки. Работоспособность технологии проиллюстрирована достижением высоких характеристик на образцах покрытий — коэффициентов пропускания и поглощения, порога лазерного разрушения, полученных измерением. Толщина покрытия и показатель преломления определялись анализом спектров пропускания, а пористость плёнки рассчитывалась по формуле Лоренца–Лоренца. **Практическая значимость.** Просветляющие лазерные покрытия на кварцевых подложках, наносимые силикатным золь-гель методом, обеспечивают высокие лучевую прочность и пропускание, позволяют упростить и удешевить технологическое оборудование, а также могут наноситься на обе поверхности оптических элементов одновременно, включая неплоские поверхности с высокой кривизной.

Ключевые слова: просветляющее лазерное покрытие, золь-гель, Штобер-процесс, кремнезём, показатель преломления, пористая плёнка, порог лазерного разрушения, нанесение методом погружения

Ссылка для цитирования: Истомина Е.И., Федосеев В.Н., Высоцкая В.В., Жупанов В.Г. Нанесение просветляющего лазерного покрытия силикатным золь-гель методом // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 10. С. 108–115. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-10-108-115>

Коды OCIS: 310.1210, 310.3840, 160.6060, 140.3330.

Antireflective laser coating depositing by silicate sol-gel method

ELENA ISTOMINA¹, VICTOR FEDOSEEV²✉, VERONIKA VYSOTSKAYA³, VALERII ZHUPANOV⁴

Luch JSC, Podolsk, Russia

¹IstominaEl@sialuch.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6729-247X>

²FedoseevVN@sialuch.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1231-0087>

³VysotskaiaVV@sialuch.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0860-068X>

⁴ZhupanovVG@sialuch.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0117-5761>

Abstract

Subject of study. Antireflection SiO_2 coatings on fused silica substrates for high-power pulsed lasers in the near infrared range. **Aim of study.** Elaboration of technology for depositing antireflection laser coatings on fused silica substrates using the silicate sol-gel method. **Method.** The applied sol-gel method is based on the well-known Stöber process, which makes it possible to obtain homogeneous spherical silicon dioxide nanoparticles of a controlled size in a colloidal sol solution. The sol was prepared on the basis of tetraethoxysilane, ethyl alcohol, and aqueous solution of ammonia. The coating was applied by immersing the samples and extracting them at a controlled speed. **Main results.** The main parameters of the sol preparation, the application and heat treatment processes are described. The efficiency of the technology is demonstrated by achievement of high characteristics on the coating samples — the transmission and absorption coefficients, the laser-induced damage threshold obtained by measurements. The coating thickness and refractive index were determined by analyzing the transmission spectra, and the film porosity was calculated using the Lorentz–Lorenz formula. **Practical significance.** Laser antireflection coatings on fused silica substrates deposited by the silicate sol-gel method provide higher laser-induced damage threshold and transmission, allow to simplify and cheapen manufacturing equipment, and also they can be applied simultaneously to both surfaces of the optical elements, including non-flat surfaces with a large curvature.

Keywords: antireflection laser coating, sol-gel, Stöber process, silica, refractive index, porous film, laser-induced damage threshold, dip-coating

For citation: Istomina E.I., Fedoseev V.N., Vysotskaya V.V., Zhupanov V.G. Antireflective laser coating depositing by silica sol-gel method [In Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2023. V. 90. № 10. P. 108–115. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-10-108-115>

OCIS codes: 310.1210, 310.3840, 160.6060, 140.3330.

ВВЕДЕНИЕ

Просветляющие (antireflective AR) покрытия находят широкое применение в окнах, линзах и других оптических элементах лазерных систем [1, 2]. Как правило, такие покрытия выполняют в виде многослойных тонких плёнок из диэлектрических материалов. Расчёт спектральных характеристик покрытий обычно проводят на основе метода характеристических матриц [2, 3], часто в численном виде с применением специализированного программного обеспечения типа Optilayer, TFCalc и т.д.

В простейшем случае могут применяться однослойные четвертьволновые AR-покрытия

с показателем преломления материала плёнки, удовлетворяющим соотношению [1]:

$$n_f = \sqrt{n_s}, \quad (1)$$

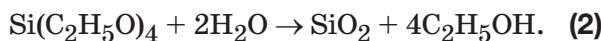
где n_s — показатель преломления подложки.

Предполагается, что внешней средой является воздух или вакуум. Известная проблема заключается в том, что сложно подобрать материал плёнки, удовлетворяющий данному условию. Решение этой задачи сегодня хорошо известно — это применение пористого материала в качестве плёнки. Наиболее простой способ получения пористой плёнки — это осуществление золь-гель процесса. Китайские

исследователи, применяя такой процесс, получили показатель преломления $n_f = 1,07$ [4].

На Лыткаринском заводе оптического стекла отработана технология нанесения двухслойного просветляющего покрытия в двух спектральных диапазонах 490–610 нм и 720–910 нм на крупногабаритные стёкла методом золь-гель [5]. Золь готовится на основе пентахлорида тантала и тетраэтоксисилана. Однако требования к пропусканию излучения и лучевой прочности были относительно невелики.

На импульсной лазерной установке NIF (National Ignition Facility — национальная установка поджига, США) мегаджоульного класса широко применяются просветляющие покрытия из пористой плёнки SiO_2 , наносимой методом золь-гель [6]. При этом используется так называемый Штобер-процесс (Stöber), позволяющий получать однородные сферические наночастицы двуокиси кремния контролируемого размера в коллоидном растворе золя [7]. Прекурсором является тетраэтоксисилан (ТЭОС $\text{Si}(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_4$), который взаимодействует с водой в спиртовом растворе в присутствии основного катализатора (NH_3). Происходят достаточно сложные реакции гидролиза и конденсации, которые в конечном итоге можно описать следующим образом:



Для полного завершения реакции мольное соотношение H_2O :ТЭОС должно составлять 2:1, а для формирования SiO_2 -частиц золя катализ должен быть основным.

Целью данной работы являлась отработка технологии нанесения просветляющих лазерных покрытий на кварцевые подложки по силикатному золь-гель методу. Для достижения указанной цели экспериментально подбирались режимы приготовления золя и нанесения покрытия. Работоспособность технологии проиллюстрирована достижением высоких характеристик покрытия на кварцевых образцах.

ДОПУСТИМЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛЁНКИ

Выполнение условия (1) позволяет достичь полного пропускания излучения для четвертьвол-

новой (q_w — quarter wavelength) оптической толщины плёнки. Однако на практике обычно задаётся пороговое значение пропускания, скажем, $T \geq 99,9\%$. В этом случае показатель преломления плёнки и её толщина формируют некоторую непрерывную область, в пределах которой достигается заданное пропускание. На рис. 1 показаны результаты численного расчёта такой области для кварцевой подложки и рабочей длины волны $\lambda_0 = 1054$ нм. Расчёт проводился с помощью открытой программы Multidiel [8].

Область значений толщины плёнки и показателя её преломления, где коэффициент пропускания больше 99,9%, выделена цветом. Условие (1) выполняется при следующих значениях: $d_{qw} = 218,8$ нм, $n_f = 1,204$, показанных перекрестием на графике.

Для четвертьвольновых плёнок при нормальном падении излучения в воздухе коэффициент отражения R может быть рассчитан по формуле [6]:

$$R = \left(\frac{n_s - n_f^2}{n_s + n_f^2} \right)^2. \quad (3)$$

Решение уравнения (3) относительно показателя преломления плёнки n_f даёт два значения,

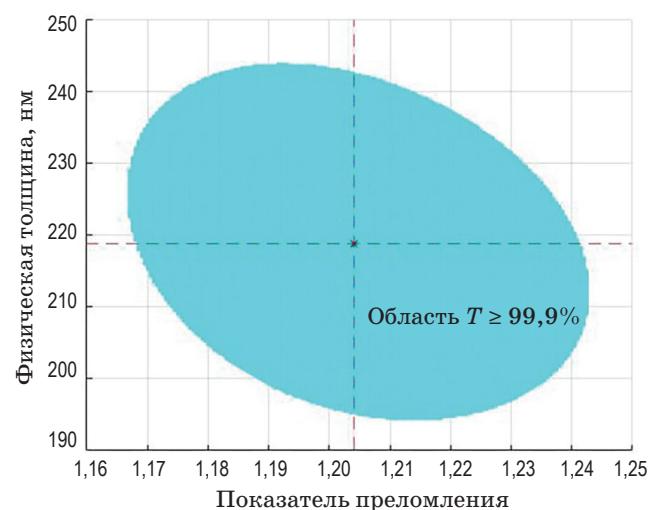


Рис. 1. Область значений толщины плёнки и показателя преломления для достижения коэффициента пропускания $T \geq 99,9\%$

Fig. 1. Range of film thickness and refractive index values for achievement of transmittance $T \geq 99.9\%$

между которыми будет пониженное отражение

$$n_{f1} = \sqrt{\frac{1-\sqrt{R}}{1+\sqrt{R}}} \sqrt{n_s}, \quad (4)$$

$$n_{f2} = \sqrt{\frac{1+\sqrt{R}}{1-\sqrt{R}}} \sqrt{n_s}, \quad (5)$$

Расчёт по двум последним формулам для $R = 1 - T = 0,001$ показывает, что $n_{f1} = 1,167$; $n_{f2} = 1,243$. Указанные два значения соответствуют левой и правой границам области допустимых значений, показанной на рис. 1.

ПРИГОТОВЛЕНИЕ ЗОЛЯ И НАНЕСЕНИЕ ПОКРЫТИЯ

Золь оксида кремния получали гидролизом тетраэтоксисилана (ТЭОС) в присутствии аммиака (водный раствор 25%). В качестве растворителя использовали этиловый спирт (96%). В качестве модификатора золя использовали полиэтиленгликоль (ПЭГ 200).

Синтез проводили при комнатной температуре в следующей последовательности. Сначала растворяли ТЭОС в этиловом спирте, затем к спиртовому раствору ТЭОС добавляли водный раствор аммиака. Приготовленный золь оставляли вызревать в закрытом контейнере при комнатной температуре в течение 120 ч. После чего к золю добавляли ПЭГ и оставляли вызревать ещё на 36 ч в закрытом контейнере. В результате был получен 9% золь, готовый к использованию.

Покрытие наносилось на отполированные кварцевые образцы диаметром 50 мм. Перед нанесением покрытия подложки травились в серной кислоте, мылись спиртом.

Покрытие наносилось методом погружения в раствор золя с последующим извлечением с контролируемой скоростью (60 ± 5) мм/мин, для чего использовался шаговый двигатель. Таким образом, покрытие наносилось с обеих сторон образцов. Для увеличения адгезии покрытия к кварцу и увеличения твёрдости покрытия осуществлялась температурная обработка образцов в сушильном шкафу. Режим тепловой обработки включал плавный нагрев до температуры (250 ± 5) °C, изотермическую выдержку в течение 60 мин и медленное охлаждение.

Следует отметить, что на американской установке NIF методом погружения наносилось AR-покрытие на линзы, а при нанесении покрытия на плоские детали с высокой лучевой прочностью применялась центрифуга [9].

Покрытия наносились на четыре образца, которые прошли следующее число циклов «погружение в золь – извлечение – сушка»: образец № 1 — 1 цикл; образец № 2 — 2 цикла; образец № 3 — 3 цикла; образец № 4 — 4 полных цикла «погружение–сушка». Несколько циклов обработки было произведено с целью получения покрытий нужной толщины. Предварительно образцы подвергались традиционной шлифовке и полировке свободным абразивом.

ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

Лучевая прочность покрытий образцов определялась на стенде контроля лучевой стойкости оптических покрытий. Измерения производились в пяти точках по диаметру образца. Расстояния между точками измерений были одинаковыми, а перемещения осуществлялись с помощью моторизованного столика. Излучение импульсного лазера с длиной волны излучения 1064 нм фокусировалось на образце в пятно диаметром 0,6 мм по уровню $1/e^2$. Режим испытаний — «С на 1» (см. ГОСТ Р 58370-2019 «Лазеры и лазерное оборудование. Методы определения порога лазерного разрушения. Определение порогового значения»). В качестве порога лазерного разрушения принималось минимальное значение из пяти измерений по диаметру. Результаты испытаний представлены в табл. 1.

Из таблицы видно, что величина лучевой прочности практически не зависит от толщины покрытия и составляет $(29,6 \pm 2,4)$ Дж/см².

Измерение поглощения излучения в плёнке проводилось на другом специализированном стенде. Однако методика измерений

Таблица 1. Результаты измерения порога лазерного разрушения ПЛР

Table 1. Measurement results of laser-induced damage threshold LIDT

Номер образца	1	2	3	4	Среднее значение
ПЛР, Дж/см ²	31,4	29,2	30,5	27,2	29,6

на кварце имеет низкую чувствительность. Соответственно, погрешность измерений достаточно велика. Тем не менее, можно говорить о том, что поглощение излучения на длине волны 1064 нм в покрытиях на образцах № 1–4 составило менее 15 ppm.

Измерение спектра пропускания образцов проводилось на спектрофотометре Agilent Cary 7000. Погрешность измерений $\pm 0,1\%$. Результаты измерений коэффициента пропускания для двух граней образцов показаны на рис. 2. Номера кривых соответствуют номерам образцов.

Рабочая длина волны отмечена вертикальной пунктирной линией. Локальное снижение пропускания для всех образцов в области 942 нм связано с поглощением парами воды. Из рисунка легко заметить, что лишь образец № 3 имеет требуемую толщину плёнки и, соответственно, высокое пропускание на рабочей длине волны. График зависимости коэффициента пропускания для образца № 3 в диапазоне 1000–1100 нм показан на рис. 3. При этом производился пересчёт на одну грань образца.

График представлен в укрупнённом виде, на котором видны осцилляции коэффициента пропускания T на уровне 0,003%, обусловленные шумом измерений (кривая 1). Кривая 2 получена усреднением эксперименталь-

ных данных скользящим окном длиной 10 нм. Измерения проводились в центре образца. Указанные осцилляции коэффициента пропускания на уровне 0,003% относятся только к обработке результатов. Величина осцилляций коэффициента пропускания связана с погрешностью измерений.

Коэффициент пропускания на рабочей длине волны составил 99,938%. Вместе с тем, из рисунка видно, что максимум пропускания, соответствующий четвертьволновой толщине, наблюдается на длине волны 1038 нм (кривая 2). Коэффициенты пропускания и отражения при этом равны следующим значениям: $T_{qw} = 99,9425\%$, $R_{qw} = 0,0575\%$. Расчёт по формуле (5) даёт, что показатель преломления пористой плёнки составил $n_f = 1,233$. Физическая толщина четвертьволновой плёнки равна $1038/(4 \cdot 1,233) = 210,5$ нм.

Пористость плёнки ε может быть оценена по формуле Лоренца–Лоренца [10]:

$$\varepsilon = 1 - \frac{(n_f^2 - 1)/(n_f^2 + 2)}{(n_s^2 - 1)/(n_s^2 + 2)}. \quad (6)$$

Расчёт по указанной формуле даёт $\varepsilon = 0,45$.

Поскольку площадка для измерений на спектрофотометре составляла около 5 мм в диа-

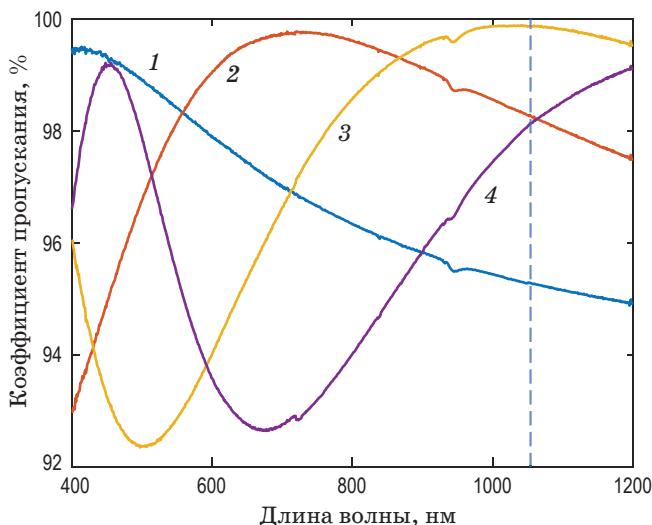


Рис. 2. Спектры пропускания для четырёх образцов (две грани). Номера кривых соответствуют номерам образцов

Fig. 2. Transmission spectrum for four samples (two sides). The numbers of the curves correspond to the sample numbers

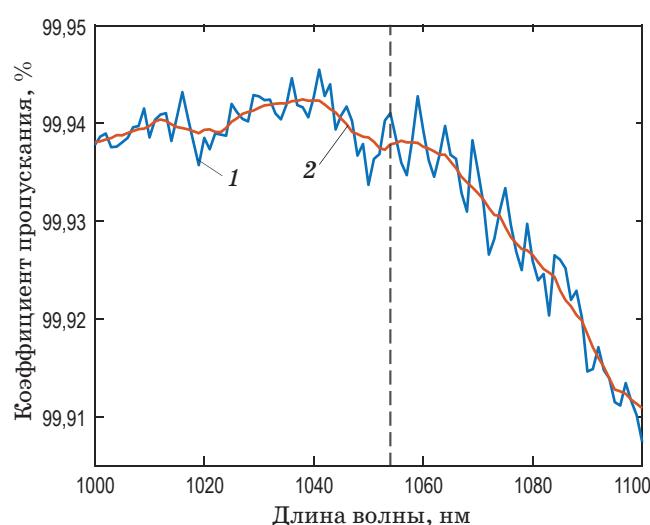


Рис. 3. Спектр пропускания образца № 3 (одна грань). Кривая 1 соответствует измерениям, кривая 2 получена усреднением

Fig. 3. Transmission spectrum of sample No. 3 (one side). The curve 1 corresponds to the measurements, the curve 2 is obtained by averaging

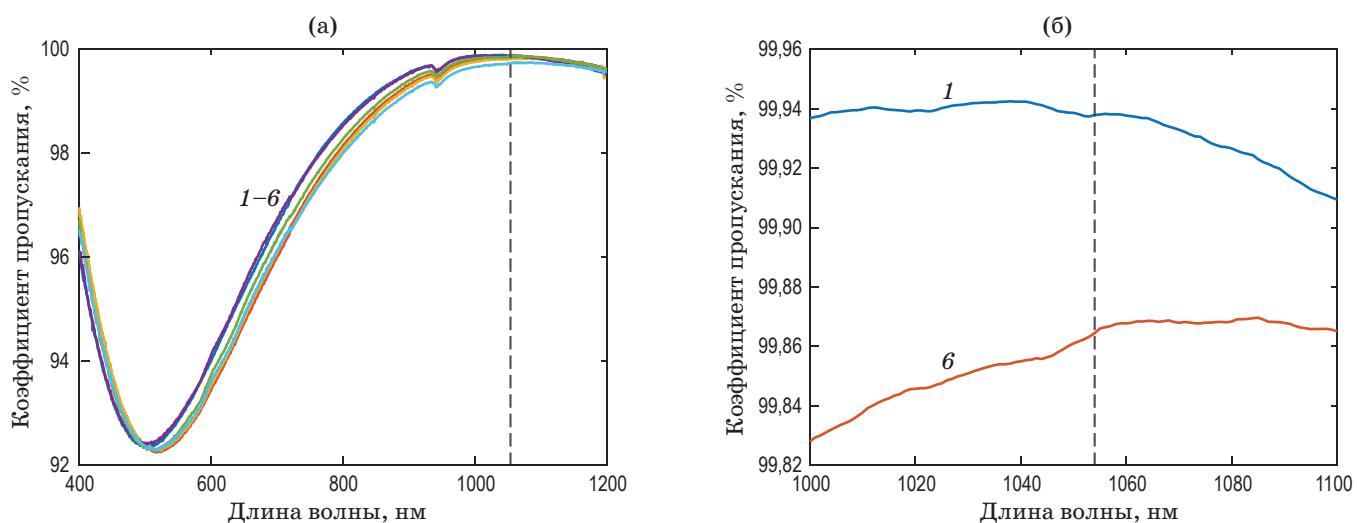


Рис. 4. Спектры пропускания образца № 3. (а) Для всех шести точек; (б) для точек № 1 и № 6 в диапазоне 1000–1100 нм

Fig. 4. Transmission spectra of sample No. 3 (a) for all six points; (b) for points No. 1 and No. 6 in a range of 1000–1100 nm

Таблица 2. Коэффициенты пропускания в 6 точках, $\lambda_0 = 1054$ нм, одна грань
Table 2. Transmission coefficients in six points, $\lambda_0 = 1054$ nm, one side

Номер точки	1	2	3	4	5	6	Среднее значение
$T, \%$	99,94	99,92	99,91	99,93	99,93	99,87	99,92 %

метре, имелась возможность измерений в нескольких точках по апертуре образца № 3. Измерения проводились в шести точках по радиусу образца, причём точка № 1 располагалась в центре образца. Коэффициенты пропускания на рабочей длине волны для всех шести точек в пересчёте на одну грань приведены в табл. 2.

С учётом того, что измерения проводились на двух гранях образцов, погрешность измерений на одной грани снижается примерно вдвое и составляет $\pm 0,05\%$.

Спектры пропускания показаны на рис. 4. На рис. 4а показаны результаты по всем 6 точкам на апертуре. Поскольку кривые 1–6, соответствующие номерам точек, расположены достаточно близко, они показаны все вместе. Максимальное пропускание на рабочей длине волны 1054 нм соответствует кривой 1, а минимальное пропускание — кривой 6 (табл. 2).

На рис. 4б рассматривается более узкий спектральный диапазон 1000–1100 нм, где дисперсия проявляется не столь сильно. При этом взяты две крайние кривые 1 и 6.

Максимумы пропускания для кривых 1 и 6 находятся на длинах волн 1038 и 1085 нм, соответственно. Принимая, что коэффициент преломления в этих точках одинаков и равен 1,233, толщина плёнки в точках № 1 и № 6 равна

$$d_{f1} = \frac{\lambda_{QW1}}{4nf} = \frac{1038}{4 \cdot 1,233} = 210,5 \text{ нм},$$

$$d_{f6} = \frac{\lambda_{QW6}}{4nf} = \frac{1085}{4 \cdot 1,233} = 220,0 \text{ нм}.$$

Таким образом, толщину плёнки на образце в целом можно оценить, как $(215,3 \pm 4,8)$ нм с относительной погрешностью $\pm 2,2\%$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе описаны результаты экспериментальной отработки на образцах технологии нанесения просветляющего лазерного покрытия, нанесённого силикатным золь-гель методом. Рабочая длина излучения — 1054 нм,

падение излучения — по нормали. Достигнуты следующие характеристики:

- толщина покрытия ($215,3 \pm 4,8$) нм;
- показатель преломления — 1,233;
- пористость SiO_2 -плёнки — 0,45;
- коэффициент пропускания — ($99,92 \pm 0,05$) %;
- порог лазерного разрушения — ($29,6 \pm 2,4$) Дж/см²;
- коэффициент поглощения излучения — менее 15 ppm.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Raut H.K., Ganesh V.A., Nairb A.S., Ramakrishna S. Anti-reflective coatings: A critical, in-depth review // Energy Environ. Sci. 2011. V. 4. P. 3779–3804. <https://doi.org/10.1039/C1EE01297E>
2. Macleod H. Angus. Thin-film optical filters. 5th Edition. Boca Raton: CRC Press, 2018. 696 p.
3. Furman Sh.A., Tikhonravov A.V. Basics of optics of multilayer systems. Singapore: Editions Frontieres, 1992. 243 p.
4. Chi F., Zeng Y., Liu C. et al. Aggregation of silica nanoparticles in sol-gel processes to create optical coatings with controllable ultra-low refractive indices // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2020. V. 12. № 14. P. 16887–16895. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c00579>
5. Кузнецова О.В., Мухаммедзянов Т.Р., Азербаев А.А. Нанесение широко-полосного просветляющего покрытия на крупногабаритные оптические детали методом вытягивания из плёнкообразующих золь-гелиевых растворов пентахлорида tantalа и тетраэтоксисилана // Контенант. 2021. Т. 20. № 2. С. 1–10.
6. Almeida R., Martucci A., Santos L. et al. Sol-gel derived optical and photonic materials. Amsterdam: Elsevier Science, 2021. 394 p. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-02962-X>
7. Шабанова Н.А., Саркисов П.Д. Золь-гель технологии. Нанодисперсный кремнезем. 2-е изд. (эл.). М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. 331 с.
8. Orfanidis S.J. Electromagnetic waves and antennas. Piscataway: Rutgers University, 2016. 1433 p. www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/ewa
9. VanBlarcom D., Monticelli M., Davalos G. et al. Damage performance of sol-gel anti-reflective coatings for the national ignition facility // Conference OIC 19–25 June 2016. Tucson, USA. Paper WD 10. <https://doi.org/10.1364/OIC.2016.WD.10>
10. Murray C., Flannery C., Streiter I. et al. Comparison of techniques to characterise the density, porosity and elastic modulus of porous low-k SiO_2 xerogel films // Microelectronic Engineering. 2022. V. 60. Iss. 1–2. P. 133–141. [https://doi.org/10.1016/S0167-9317\(01\)00589-5](https://doi.org/10.1016/S0167-9317(01)00589-5)
11. Stoltz C.J., Negres R.A. Ten-year summary of the Boulder Damage Symposium annual thin film laser damage competition // Optical Engineering. 2018. V. 57. № 12. P. 121910-1–121910-13. <https://doi.org/10.1117/1.OE.57.12.121910>
- В статье [11] приведены результаты ряда исследований порога лазерного разрушения. В частности, для длины волны 1064 нм и длительности импульса 3 нс медианное значение порога лазерного излучения составило 26 Дж/см². Таким образом, созданная технология нанесения просветляющего покрытия методом силикатного золь-гель обеспечивает лучевую прочность на мировом уровне.

REFERENCES

1. Raut H.K., Ganesh V.A., Nairb A.S., Ramakrishna S. Anti-reflective coatings: A critical, in-depth review // Energy Environ. Sci. 2011. V. 4. P. 3779–3804. <https://doi.org/10.1039/C1EE01297E>
2. Macleod H. Angus. Thin-film optical filters. 5th Edition. Boca Raton: CRC Press, 2018. 696 p.
3. Furman Sh.A., Tikhonravov A.V. Basics of optics of multilayer systems. Singapore: Editions Frontieres, 1992. 243 p.
4. Chi F., Zeng Y., Liu C. et al. Aggregation of silica nanoparticles in sol-gel processes to create optical coatings with controllable ultra-low refractive indices // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2020. V. 12. № 14. P. 16887–16895. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c00579>
5. Kuznetsova O.V., Muhammedzyanov T.R., Azerbaev A.A. Deposition of a broadband antireflection coating on large-sized optical parts by dip-coating from film-forming sol-gel solutions of tantalum pentachloride and tetraethoxysilane (in Russian) // Contenant. 2021. V. 20. № 2. P. 1–10.
6. Almeida R., Martucci A., Santos L. et al. Sol-gel derived optical and photonic materials. Amsterdam: Elsevier Science, 2021. 394 p. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-02962-X>
7. Shabanova N.A., Sarkisov P.D. Sol-gel technology. Nano-dispersed Silica (in Russian). 2nd Edition. Moscow: BINOM. Laboratory of Knowledge, 2015. 331 p.
8. Orfanidis S.J. Electromagnetic waves and antennas. Piscataway: Rutgers University, 2016. 1433 p. www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/ewa
9. VanBlarcom D., Monticelli M., Davalos G. et al. Damage performance of sol-gel anti-reflective coatings for the national ignition facility // Conference OIC 19–25 June 2016. Tucson, USA. Paper WD 10. <https://doi.org/10.1364/OIC.2016.WD.10>
10. Murray C., Flannery C., Streiter I. et al. Comparison of techniques to characterise the density, porosity and elastic modulus of porous low-k SiO_2 xerogel films // Microelectronic Engineering. 2022. V. 60. Iss. 1–2. P. 133–141. [https://doi.org/10.1016/S0167-9317\(01\)00589-5](https://doi.org/10.1016/S0167-9317(01)00589-5)
11. Stoltz C.J., Negres R.A. Ten-year summary of the Boulder Damage Symposium annual thin film laser damage competition // Optical Engineering. 2018. V. 57. № 12. P. 121910-1–121910-13. <https://doi.org/10.1117/1.OE.57.12.121910>

АВТОРЫ

Елена Иннокентьевна Истомина — канд. хим. наук, ведущий научный сотрудник, НИИ НПО «Луч», 142103, Подольск, Россия; Scopus ID: 55342866500, <https://orcid.org/0000-0002-6729-247X>, IstominaEI@sialuch.ru, istomina-ei@yandex.ru

Виктор Николаевич Федосеев — канд. техн. наук, главный научный сотрудник, НИИ НПО «Луч», 142103, Подольск, Россия; Scopus ID: 56465551400, 57194091526, <https://orcid.org/0000-0002-1231-0087>, fedoseevvn@sialuch.ru, grivma14@live.com

Вероника Владимировна Высоцкая — инженер 1 кат., НИИ НПО «Луч», 142103, Подольск, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-0860-068X>, VysotskaiaVV@sialuch.ru, ms.veronikka@mail.ru

Валерий Григорьевич Жупанов — начальник лаборатории, НИИ НПО «Луч», 142103, Подольск, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-0117-5761>, zhupanovvg@sealuch.ru, vgzhupanov@gmail.com

Статья поступила в редакцию 05.12.2022
Одобрена после рецензирования 06.06.2023
Принята к печати 18.08.2023

AUTHORS

Elena I. Istomina — PhD in Chemistry, Leading Researcher, Luch JSC, 142103, Podolsk, Russia; Scopus ID: 55342866500, <https://orcid.org/0000-0002-6729-247X>, IstominaEI@sialuch.ru, istomina-ei@yandex.ru

Victor N. Fedoseev — PhD, Chief Researcher, Luch JSC, 142103, Podolsk, Russia; Scopus ID: 56465551400, 57194091526, <https://orcid.org/0000-0002-1231-0087>, fedoseevvn@sialuch.ru, grivma14@live.com

Veronika V. Vysotskaia — Engineer of the first category, Luch JSC, 142103, Podolsk, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-0860-068X>, VysotskaiaVV@sialuch.ru, ms.veronikka@mail.ru

Valerii G. Zhupanov — Head of a Laboratory, Luch JSC, 142103, Podolsk, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-0117-5761>, zhupanovvg@sealuch.ru, vgzhupanov@gmail.com

The article was submitted to the editorial office 05.12.2022

Approved after review 06.06.2023

Accepted for publication 18.08.2023