

ИСТОЧНИКИ И ПРИЕМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 539.231

**Влияние состава и морфологии оптических  
интерференционных покрытий диэлектрических зеркал  
для лазерных источников лидарных комплексов  
на порог оптического пробоя**

**М.М. Зиновьев<sup>1, 2, 3</sup>, В.С. Кузнецов<sup>2, 3</sup>, Н.Н. Юдин<sup>1, 2, 3</sup>, Е.С. Слюнько<sup>✉ 2, 3</sup>,  
С.Н. Подзыватьов<sup>2, 3</sup>, А.Б. Лысенко<sup>2, 3</sup>, А.Ю. Кальсин<sup>2, 3</sup>,  
А.Ш. Габдрахманов<sup>2, 3</sup>, Д.В. Власов<sup>2\*</sup>**

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

<sup>3</sup>ООО «Лаборатория оптических кристаллов»  
634040, г. Томск, ул. Высоцкого, 28, стр. 7

Поступила в редакцию 07.03.2024;  
после доработки 16.04.2024;  
принята к печати 10.06.2024

Представлены результаты исследования влияния морфологии и состава тонких пленок, образующих структуру диэлектрических зеркал оптических резонаторов когерентных источников для лидаров, на порог оптического пробоя. В программном обеспечении Optilayer проведено моделирование диэлектрических зеркал с использованием двух пар материалов:  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  и  $\text{ZnS}/\text{YbF}_3$ . С помощью электронной и атомно-силовой микроскопии определены их морфологические особенности. Методом ионно-лучевого распыления нанесена рассчитанная структура интерференционного покрытия на подложку из кварца марки КИ. Определен порог лазерно-индуцированного пробоя диэлектрических зеркал излучением Nd:YAG-лазера на длине волны 1064 нм, который составил 4 Дж/см<sup>2</sup> для зеркала  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  и 3,2 Дж/см<sup>2</sup> для зеркала  $\text{ZnS}/\text{YbF}_3$ . Результаты работы могут быть полезны при изготовлении диэлектрических зеркал с высоким порогом оптической прочности для лидарных систем и комплексов как в источниках, так и в приемных системах.

**Ключевые слова:** диэлектрическое зеркало, лидар, подложка, кварц, морфология, оптический пробой; dielectric mirror, LIDAR, substrate, quartz, morphology, optical breakdown.

## Введение

С целью контроля и оценки изменения параметров окружающей среды уже долгое время ведется разработка лазерных комплексов — лидаров, как стационарных, так и мобильных, устанавливаемых на машины или летательные аппараты [1]. Зондирование атмосферы — задача нетривиальная; она сопряжена с решением множества проблем, например

с поглощением лазерного излучения. Для ее решения используются источники, действующие в окне прозрачности атмосферы. Помимо поглощения, излучение также рассеивается атмосферой, что вызывает дополнительные трудности в регистрации сигнала. Решение этой проблемы связано уже с усовершенствованием конструкции и параметров как самого источника для зондирования, так и приемопередающей части лидара.

В работе [2] продемонстрирована возможность расширения высотного диапазона зондирования атмосферы путем применения двух приемных телескопов для ближней и дальней зон, а также объединения аналоговых и счетно-фотонных лидарных сигналов в один общий. В работе [3] решается задача повышения энергии импульсов излучателя при сохранении высокой частоты их повторения. Высокая энергия импульсов позволяет добиться большей дальности зондирования, а высокая частота

\* Михаил Михайлович Зиновьев (mucha9229@gmail.com); Владимир Сергеевич Кузнецов (robert\_smith\_93@mail.ru); Николай Николаевич Юдин (rach3@yandex.ru); Елена Сергеевна Слюнько (elenohka266@mail.ru); Сергей Николаевич Подзыватьов (cginen@yandex.ru); Алексей Борисович Лысенко (festality@yandex.ru); Андрей Юрьевич Кальсин (andrejkalsin@gmail.com); Акмаль Шамилович Габдрахманов (Realist98937@mail.ru), Денис Васильевич Власов (dv472@mail.ru).

повторения — увеличения разрешающей способности при регистрации обратного сигнала. Однако существенное повышение энергии импульсов излучения сопряжено с рисками повреждения как самого активного элемента, так и зеркал резонатора оптического генератора.

Порог лазерно-индуцированного пробоя (ПЛИП) диэлектрических интерференционных зеркал (а также просветляющих покрытий) зависит от множества параметров и факторов. Например, отражательная способность зеркала, как правило, улучшается путем увеличения числа слоев, составляющих интерференционную структуру. А это, в свою очередь, приводит к увеличению суммарных механических напряжений в слоях и, как следствие, плохой адгезии пленки и возможности ее растрескивания в процессе эксплуатации оптического элемента [4].

Еще один важный фактор, влияющий на ПЛИП интерференционных покрытий, — морфологический состав пленок и их химическая стехиометрия. При вакуумном методе нанесения пленок в них может образовываться нестехиометрическая структура, иными словами, включения, которые являются центрами поглощения [5, 6]. Такие включения при воздействии на них высокоэнергичных лазерных импульсов высокой мощности разогреваются, вызывая оптический пробой пленки. Для решения этой проблемы разрабатывается технологическая карта процесса напыления пленок в вакууме с оптимальными параметрами, при которых стехиометрия пленок близка к номинальному составу [7, 8].

На сегодняшний день наиболее распространены методы получения диэлектрических пленок, обладающих высокими значениями ПЛИП, — методы электронно-лучевого и ионно-лучевого осаждения [9], а также атомно-слоевого осаждения [10]. В нашей работе был использован метод ионно-лучевого распыления (ИЛР) пленок в вакууме. Он позволяет распылять мишени практически всех материалов высокоэнергичным ионным пучком при давлении в камере порядка  $10^{-4}$ – $10^{-5}$  Па. Однако высокая энергия ионов распыляющего пучка также может вызывать распад сложного соединения на элементарные составляющие, что повлечет нарушение стехиометрии состава напыляемой пленки.

Цель настоящей работы — определить влияние состава и морфологии диэлектрических зеркал для лазерных источников лидарных комплексов на порог оптического пробоя при воздействии на них высокоэнергичными лазерными импульсами.

## 1. Выбор материалов и моделирование интерференционных покрытий

Для работы зеркал был выбран целевой диапазон 970–1175 нм с центром на длине волны 1064 нм, так как в этом диапазоне работают YAG- и YAP-лазеры, легированные ионами неодима

и иттербия, которые являются источниками высокоэнергичного излучения и широко используются для накачки параметрических генераторов света среднего ИК-диапазона в лидарных комплексах [11].

Оптическое покрытие моделировалось в программном обеспечении Optilayer. В качестве подложки был использован кварц марки КИ из-за высокой лучевой прочностью кварцевого стекла (более 30 Дж/см<sup>2</sup>) на длинах волн, близких к 1064 нм [12]. В качестве пленкообразующих материалов были выбраны высокопреломляющие TiO<sub>2</sub>, ZnS и низкопреломляющие SiO<sub>2</sub>, YbF<sub>3</sub>. Данные материалы наносились в виде монослоев для определения морфологии. Для создания диэлектрического зеркала из них были образованы две пары: TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> и ZnS/YbF<sub>3</sub>. Такой выбор обусловлен высокой разницей между показателями преломления этих материалов, и, как следствие, меньшими количеством и толщиной слоев, необходимыми для достижения максимального коэффициента отражения. Это, в свою очередь, уменьшает вероятность пробоя зеркала из-за механических напряжений в слоях. Кроме того оксидные пары материалов тверже и могут обладать более высокими значениями компонент тензора напряжения, в отличие от сульфидов и фторидов, что также влияет на ПЛИП интерференционного покрытия. Используемые материалы, толщины покрытий, количество слоев, а также средний коэффициент отражения ( $R$ ) в целевом диапазоне представлены в таблице.

Характеристики рассчитанных диэлектрических зеркал

| Параметр                                        | Значение                           |                      |
|-------------------------------------------------|------------------------------------|----------------------|
| Рабочий диапазон покрытия ( $R \geq 99\%$ ), нм | 970–1175                           |                      |
| Материал                                        | TiO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> | ZnS/YbF <sub>3</sub> |
| Физическая толщина покрытия, нм                 | 2587                               | 2576                 |
| Оптическая толщина покрытия                     | 4649                               | 4648                 |
| Средний по диапазону коэффициент отражения, %   | 99,8                               | 99,7                 |
| Количество слоев покрытия, шт.                  | 18                                 | 18                   |

На рис. 1 приведены результаты моделирования спектров отражения с центральной длиной волны 1064 нм. Из рис. 1 и таблицы видно, что для обоих зеркал  $R > 99\%$  в широком диапазоне от 970 до 1175 нм. На длине волны 1064 нм коэффициент отражения зеркала на основе TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> составляет  $R = 99,8\%$ , а зеркал ZnS/YbF<sub>3</sub> —  $99,7\%$ . Физическая и оптическая толщины практически одинаковы, в обоих случаях число слоев равно 18, поэтому ПЛИП зеркал можно сравнивать исходя из термомеханических свойств и морфологических особенностей используемых материалов.

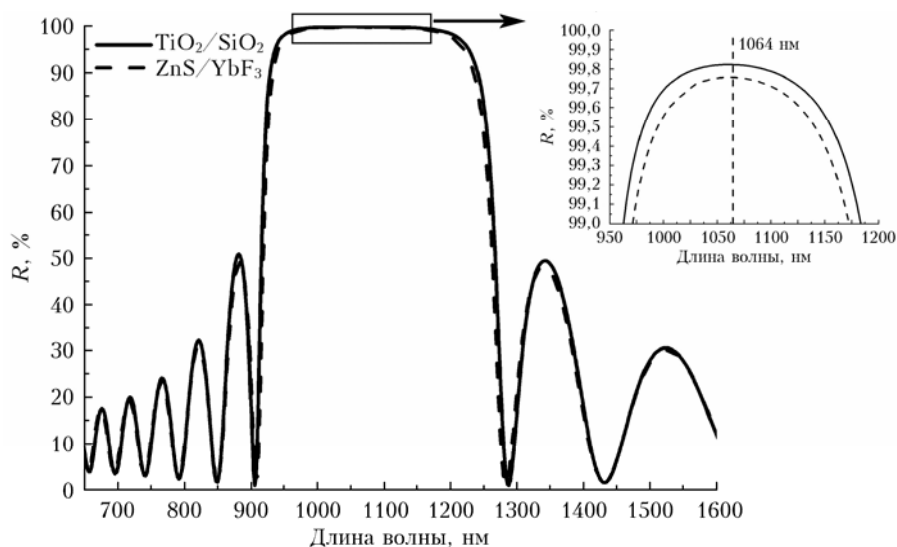


Рис. 1. Результат моделирования спектров отражения диэлектрических зеркал с центральной длиной волны 1064 нм

## 2. Морфология полученных монослоев, их дефектная структура в зависимости от условий напыления

Перед напылением многослойных интерференционных зеркальных покрытий производилась оптимизация режимов напыления монослоев  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{ZnS}$  и  $\text{YbF}_3$ . С помощью ионно-лучевой напылительной машины Aspira 200 монослои толщиной 10 нм наносились на подложки из кварца КИ в различных режимах напыления (варьировались парциальное давление газовой смеси, подаваемой в камеру при напылении, и напряжение на ионном источнике). Анализ полученных монослоев был проведен с использованием сканирующего электронного микроскопа Tescan MIRA 3 LMU с катодом Шоттки. В оксидных соединениях на основе металлов, а также соединении  $\text{ZnS}$  (рис. 2, а) дефектной структуры пленок найдено не было. Обнаруживались отдельные дефекты подложки в виде царапин или выколов. Стехиометрический состав не нарушен, пленка состоит из элементов  $\text{Zn}$  и  $\text{S}$ , а также минимального количества (менее 0,05%) распыляемого газа аргона ( $\text{Ar}$ ).

В ходе работы были сделаны снимки (рис. 2, б) монослоя  $\text{TiO}_2$ . Средний размер зерен оксида титана составляет порядка 100–120 нм, они формируют агломераты размерами 500–600 нм. Пленка, получаемая методом ИЛР, плотная, ее структура непористая. Отклонений от стехиометрии состава не обнаружено.

Наибольший интерес представили напыленные монослои низкопреломляющих материалов  $\text{SiO}_2$ , а также соединение  $\text{YbF}_3$ . В монослое  $\text{SiO}_2$  на начальных этапах отработки процесса распыления наблюдались дефекты пленки в виде скопления конгломератов, идентифицированные в дальнейшем как чистый непрореагировавший кремний (рис. 3, а, б). В итоге серии экспериментов дефектная структура пленки оксида кремния была устранена (рис. 3, в).

После снижения ускоряющего напряжения ионного источника с 3500 до 2800 В дефектная структура пленки оксида кремния исчезла. Этот факт говорит о том, что при высоких напряжениях и вследствие

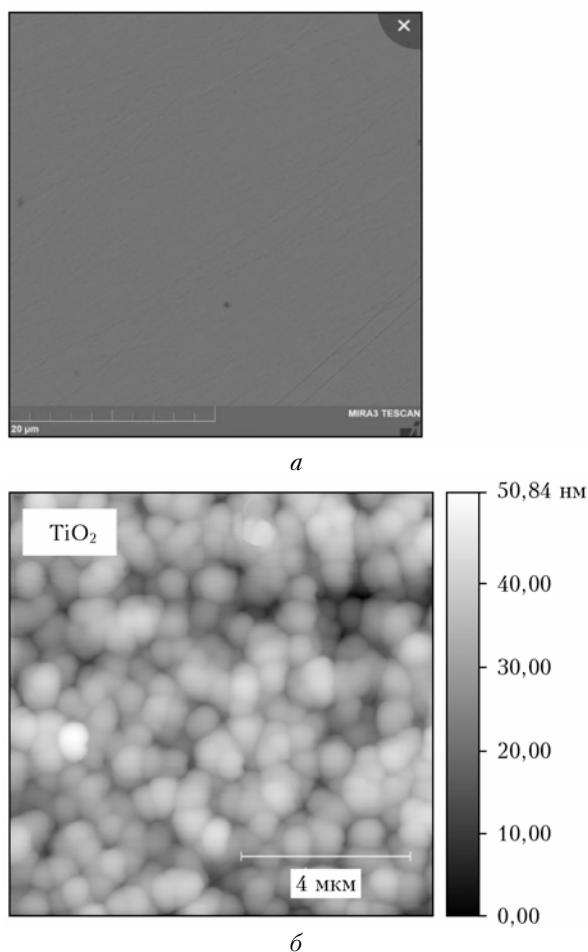


Рис. 2. Изображения: области поверхности монослоя  $\text{ZnS}$ , полученное через объектив электронного микроскопа (а), и монослоя  $\text{TiO}_2$ , полученное методом АСМ (б)

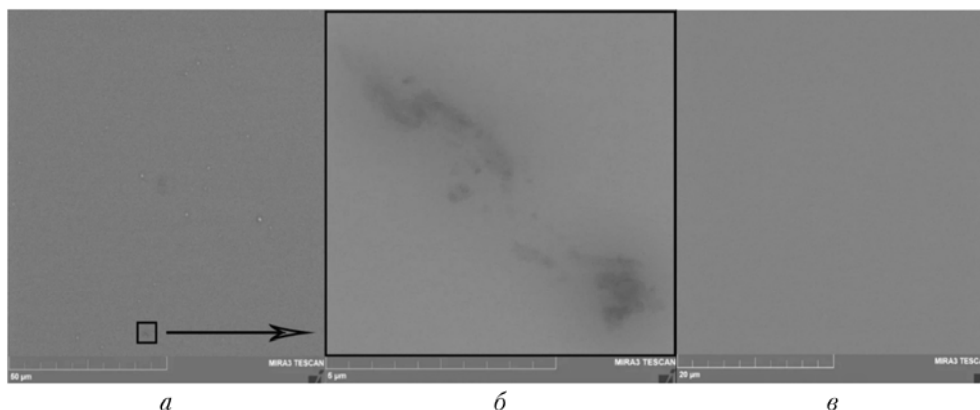


Рис. 3. Дефектная структура, обнаруженная в пленках оксида кремния (а), увеличенная область с обнаруженным дефектом (б), бездефектная пленка оксида кремния (в)

высокого разогрева самой мишени материал может распыляться в виде капель. Это, в свою очередь, негативно влияет на стехиометрию пленки, ее структуру и лучевую прочность.

Соединения на основе фторидов, в частности  $\text{YbF}_3$ , имеют в своем составе легколетучий компонент фтор. Поэтому при высоких энергиях ионного пучка возможно разложение соединения на составляющие с последующим улетучиванием фтора за пределы напылительной камеры, что влечет за собой нестехиометричность состава напыляемого монослоя [13]. У монослоя  $\text{YbF}_3$  множество дефектов (темные области на рис. 4), которые, по-видимому, могут быть связаны с отсутствием фтора в соединении и, как следствие, являться включениями чистого иттербия.

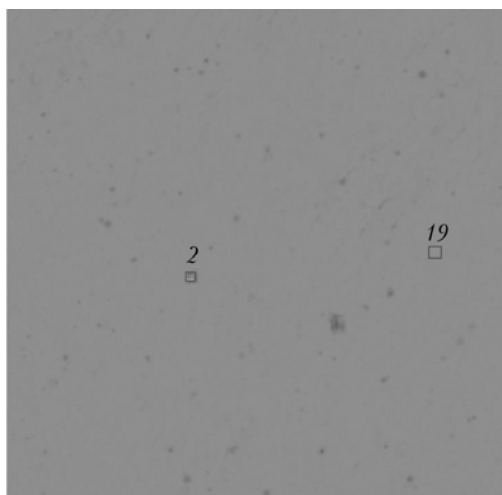


Рис. 4. Изображение области поверхности монослоя  $\text{YbF}_3$ , полученное через объектив электронного микроскопа: 2 – дефектная, 19 – бездефектная области (рис. 5)

Элементный анализ нескольких областей, проведенный с помощью электронного микроскопа, подтвердил теорию, что в темных областях (2 на рис. 4) преобладает как раз иттербий и существенно недостает фтора. Соотношения фтора к иттербию в темных областях составляет примерно 1:5. Это пока-

зано на рис. 5, а. Для бездефектной области (19 на рис. 4) соотношение между фтором и иттербием составляет порядка 1:3, как показано на рис. 5, б, что укладывается в формулу соединения  $\text{YbF}_3$ . Высокая энергия ионного пучка разрушает соединение, что приводит к появлению большого количества дефектов в тонкой пленке  $\text{YbF}_3$ .

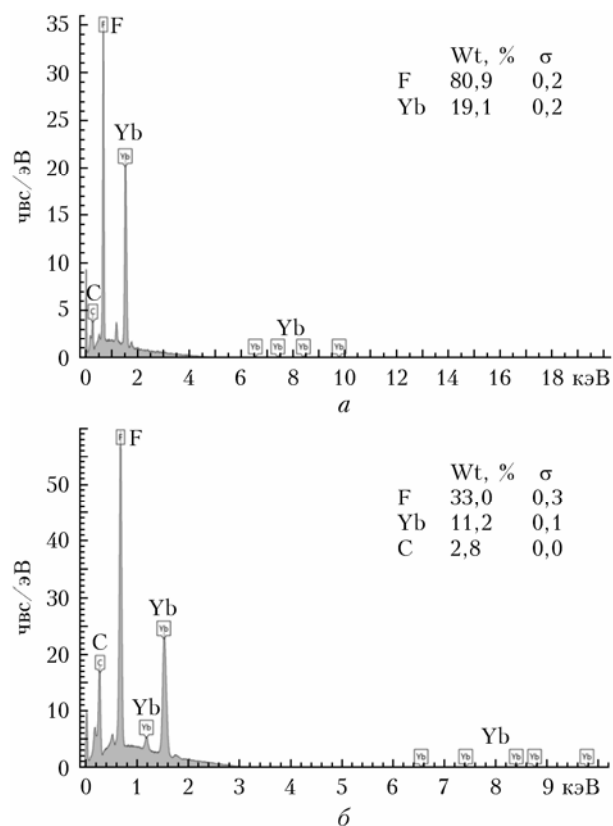


Рис. 5. Элементный анализ монослоя  $\text{YbF}_3$ : спектр, соответствующий сектору 2 (а), 19 (б) на рис. 4

На основе моделирования интерференционных покрытий из материалов  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  и  $\text{ZnS}/\text{YbF}_3$  (см. таблицу и рис. 1) и полученной информации об их морфологических особенностях диэлектриче-

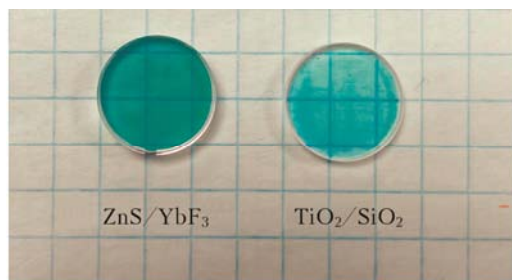


Рис. 6. Нанесенные на подложку из кварца КИ зеркальные покрытия

ские покрытия были нанесены на подложку кварца КИ методом вакуумного ионно-лучевого распыления (рис. 6).

### 3. Порог оптического пробоя разработанных экспериментальных покрытий

В качестве источника излучения использовался Nd:YAG-лазер, генерирующий излучение на длине волны 1064 нм с поперечной диодной накачкой. Он работал в режиме активной модуляции добротности с длительностью импульсов  $\tau = 35$  нс и частотой следования импульсов  $f = 1000$  Гц. Измеренный диаметр лазерного пучка на входной апертуре исследуемых образцов составил во всех экспериментах  $d = 350 \pm 10$  мкм по уровню  $1/e^2$  от максимальной интенсивности. Средняя мощность излучения Nd:YAG-лазер варьировалась от 0,5 до 10 Вт в линейно-поляризованном гауссовом пучке (параметр  $M^2 \leq 2$ ), фотография источника излучения и схема измерительного стенда приведены на рис. 7.

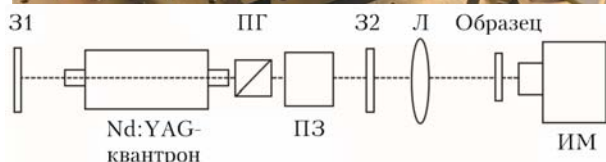
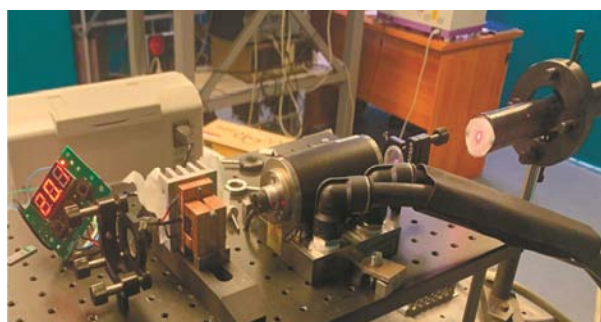


Рис. 7. Nd:YAG-лазер для определения ПЛИП исследуемых образцов: 31 — глухое зеркало резонатора; Nd:YAG-квантрон с поперечной непрерывной диодной накачкой; ПГ — призма Глана; ПЗ — пассивный затвор Cr:YAG; 32 — выходное зеркало резонатора с 50%-м пропусканием; Л — фокусирующая линза; ИМ — измеритель мощности

Согласно международному стандарту ISO 21254 эффективная площадь гауссова пучка определяется

как  $S = \pi d^2/4$ . Плотность энергии лазерного излучения

$$E = 8P_{av}/(f\pi d^2), \quad (1)$$

где  $P_{av}$  — средняя выходная мощность лазера накачки [14].

Порог оптического пробоя образцов определялся по методике R-on-1. Суть ее заключается в том, что каждая отдельная область кристалла подвергается лазерному облучению с последовательным повышением интенсивности до тех пор, пока не произойдет оптический пробой или не будет достигнуто заранее заданное значение плотности энергии. В нашей работе исследование проводилось с длительностью экспозиции  $\tau_{ex} = 5$  с. На исследуемый образец воздействовал пакет лазерных импульсов с фиксированным уровнем плотности энергии, не вызывающим повреждения поверхности кристаллов. Далее уровень плотности энергии увеличивался с шагом  $\sim 0,1$  Дж/см<sup>2</sup>. При появлении видимого повреждения на поверхности эксперимент прекращался. Затем образец перемещался на 0,5 мм по высоте или ширине при помощи двухкоординатной подвижки; эксперимент повторялся пять раз. Вероятность оптического пробоя оценивалась путем построения графика кумулятивной вероятности в зависимости от плотности энергии оптического пробоя. За порог оптического пробоя ( $W_{0d}$ ) принималась величина плотности энергии, соответствующая аппроксимации вероятности оптического пробоя к нулю.

У диэлектрического зеркала на основе пары  $TiO_2/SiO_2$  ПЛИП  $= 4,0 \pm 0,1$  Дж/см<sup>2</sup>; для зеркала на основе  $ZnS/YbF_3$  он достигал лишь  $3,2 \pm \pm 0,1$  Дж/см<sup>2</sup>. Так как исследуемые зеркала обладали одинаковым количеством слоев (по 18), а также приблизительно одинаковой толщиной (см. таблицу) и характеристикой отражения на длине волны 1064 нм, то существенную разницу в ПЛИП можно объяснить только наличием дефектной структуры в монослое  $YbF_3$  (см. рис. 4, 5). Нарушение стехиометрии приводит к появлению локальных центров поглощения, из-за чего при воздействии высокоэнергетических лазерных импульсов возникает локальный перегрев области, приводящий к оптическому пробоя покрытия и отслоению от подложки с разрушением облучаемой области.

### Заключение

Проведено моделирование интерференционных диэлектрических зеркал на основе пар материалов  $TiO_2/SiO_2$  и  $ZnS/YbF_3$  для рабочего диапазона с центральной длиной волны 1064 нм. Расчет показал, что можно получить отражение  $R \geq 99,7\%$  на целевой длине волны.

С помощью электронного и атомно-силового микроскопов исследована морфологическая структура монослоев используемых материалов. Показано, что высокопреломляющие слои как  $ZnS$ , так и  $TiO_2$  при нанесении их на подложку методом ионно-лучевого распыления имеют бездефектную структуру

и плотную упаковку частиц, что позволяет получать пленки с высоким показателем преломления.

Исследование низкопреломляющих материалов  $\text{SiO}_2$  и  $\text{YbF}_3$  показало, что в монослоях данных материалов присутствуют различного рода дефекты. Так, при распылении  $\text{SiO}_2$  на высоких ускоряющих напряжениях ионного источника (высокая энергия ионов) часть кремния не успевает прореагировать до состояния оксида, вызывая дефекты напыляемой пленки. Эти дефекты практически полностью устраняются путем подбора газовой смеси аргон/кислород при распылении материала и путем снижения ускоряющего напряжения источника.

Установлено, что при ионном распылении мишени  $\text{YbF}_3$  в напыляемой пленке появляется большое количество дефектов. Элементный анализ этих областей показывает недостаток фтора с существенным преобладанием итербия (соотношение 1:5). Это вызывает локальное отклонение от стехиометрии состава пленки, данные дефекты являются в том числе и поглощающими центрами. Однако снижение ускоряющего напряжения на 20–25% не вызывает существенных изменений количества дефектов. Дальнейшее снижение мощности источника приводит к очень низкой скорости распыления и, как следствие, невозможности наносить многослойные покрытия, поэтому требуются дополнительные исследования.

Анализ ПЛИП ( $\lambda = 1064$  нм,  $\tau = 35$  нс,  $f = 1000$  Гц) диэлектрических зеркал на основе пар материалов  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  и  $\text{ZnS}/\text{YbF}_3$  на подложке, сделанной из кварца КИ, показал, что диэлектрическое зеркало на основе  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  способно выдержать оптическую нагрузку до  $4 \text{ Дж/см}^2$ , в то время как зеркало на основе  $\text{ZnS}/\text{YbF}_3$  — до  $3,2 \text{ Дж/см}^2$ .

**Финансирование.** Исследование выполнено при поддержке РНФ (грант № 23-79-10193, <https://rscf.ru/project/23-79-10193.%22>).

## Список литературы

1. Бореишо А.С., Коняев М.А., Морозов А.В., Пикулик А.В., Савин А.В., Трилис А.В., Чакчир С.Я., Бойко Н.И., Власов Ю.Н., Никитаев С.П., Рожнов А.В. Мобильные многоволновые лидарные комплексы // Квант. электрон. 2005. Т. 35, № 12. С. 1167–1178.
2. Балин Ю.С., Байрашин Г.С., Коханенко Г.П., Клемашева М.Г., Пеннер И.Э., Самойлова С.В. Аэрозольно-рамановский лидар «ЛОЗА-М2» // Квант. электрон. 2011. Т. 41, № 10. С. 945–949.
3. Jiang Y., Fu X., Liu Qi. High energy LiDAR source for long distance, high resolution range imaging // Microwave Opt. Technol. Lett. 2020. V. 62. P. 3655–3661. DOI: 10.1002/mop.32650.
4. Ванякин А.В., Железнов В.И., Кулевский Л.А., Лукашев А.В., Морозов Н.П., Орлов Н.А. Интерференционная оптика для лазеров и параметрических генераторов среднего ИК-диапазона // Квант. электрон. 1997. Т. 24, № 2. С. 142–144.
5. Wang L., Jiang Y., Jiang C., Liu H., Ji Y., Zhang F., Fan R., Chen D. Effect of oxygen flow rate on microstructure properties of  $\text{SiO}_2$  thin films prepared by ion beam sputtering // J. Non-Crystal. Sol. 2018. V. 482. P. 203–207. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2017.12.046.
6. Langston P.F., Krous E., Schiltz D., Patel D., Emmert L., Markosyan A., Reagan B., Wernsing K., Xu Y., Sun Z., Route R., Fejer M.M., Rocca J.J., Rudolph W., Menoni C.S. Point defects in  $\text{Sc}_2\text{O}_3$  thin films by ion beam sputtering // Appl. Opt. 2014. V. 53. P. A276–A280. DOI: 10.1364/AO.53.00A276.
7. Raider S.I., Flitsch R. Stoichiometry of  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  interfacial regions. I. Ultrathin oxide films // J. Vac. Sci. Technol. 1976. V. 13, N 1. P. 58. DOI: 10.1116/1.568955.
8. Hickmot T.W., Baglin J.E. Stoichiometry and atomic defects in rf-sputtered  $\text{SiO}_2$  // J. Appl. Phys. 1979. V. 50, N 1. P. 317–323. DOI: 10.1063/1.325662.
9. Телеш Е.В., Касинский Н.К., Томаль В.С.. Формирование покрытий ионно-лучевым распылением диэлектрических мишеней // Вестн. Полоцкого гос. ун-та. Сер. С. 2012. Т. 4. С. 70–76.
10. Liu H., Jensen L., Becker J., Wurz M.C., Ma P., Ristau D. Comparison of ALD and IBS  $\text{Al}_2\text{O}_3$  films for high power lasers // Proc. SPIE. 2016. N 10014. P. 1001421. DOI: 10.1117/12.2245051.
11. Guo J., Fei X., Ge P., Li Z., Lv Y., Sheng L. A 1064 nm single-photon lidar for three-dimensional imaging // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. V. 1983. DOI: 10.1088/1742-6596/1983/1/012093.
12. Kuzuu N., Yoshida K., Yoshida H., Kamimura T., Kamisugi N. Laser-induced bulk damage in various types of vitreous silica at 1064, 532, 355, and 266 nm: Evidence of different damage mechanisms between 266-nm and longer wavelengths // Appl. Opt. 1999. V. 38. P. 2510–2515. DOI: 10.1364/ao.38.002510.
13. Zhang Y., Xiong S., Huang W. Study on defects in  $\text{ZnS}/\text{YbF}_3$  infrared coatings on silicon substrates // Surf. Coat. Technol. 2017. V. 320. P. 3–6. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.03.023.
14. ISO 11146-1:2021; Lasers and Laser-Related Equipment. Test Methods for Laser Beam Widths, Divergence Angles and Beam Propagation Ratios. Part 1: Stigmatic and Simple Astigmatic Beams. URL: <https://www.iso.org/standard/77769.html> (last access: 09.04.2024).

*M.M. Zinoviev, V.S. Kuznetsov, N.N. Yudin, E.S. Slyunko, S.N. Podzyvalov, A.B. Lysenko, A.Yu. Kal-sin, A.Sh. Gabdrakhmanov, D.V. Vlasov. Influence of the composition and morphology of dielectric mirrors of LIDAR complexes on their optical breakdown threshold.*

The paper presents the results of studying the influence of the morphology and composition of thin films that form the structure of dielectric mirrors of optical resonators of coherent sources for LIDARs. The Opti-layer software simulated dielectric mirrors based on two pairs of materials:  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  and  $\text{ZnS}/\text{YbF}_3$ . Using electron and atomic force microscopy, their morphological features were determined. The calculated structure of the interference coating was deposited onto a substrate using the ion-beam sputtering method. The threshold of laser-induced breakdown of dielectric mirrors by Nd:YAG laser radiation at a wavelength of 1064 nm was found to be  $4 \text{ J/cm}^2$  for a  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  mirror and  $4 \text{ J/cm}^2$  for a  $\text{ZnS}/\text{YbF}_3$  mirror.