

doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-2-154-162

УДК 621.373.8: 620.1.08

Лазерный многопараметрический метод входного контроля монтажных элементов, используемых в объеме герметичных неодимовых лазерных излучателей

Андрей Вячеславович Беликов¹, Иван Сергеевич Клочков²✉,
 Иван Владимирович Алексеев³, Сергей Анатольевич Капралов⁴

^{1,2} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^{2,3} АО «НПК «СПП», Санкт-Петербург, 190020, Российская Федерация

⁴ АО «НПК «СПП», Великий Новгород, 173003, Российская Федерация

¹ avbelikov@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-8733-4860>

² Vany-nov13@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-5461-783X>

³ El.magio@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4368-9309>

⁴ kapralov_sa@npspp.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3393-4948>

Аннотация

Предмет исследования. Исследованы параметры зон осаждения в результате воздействия лазерного излучения на поверхности оптического элемента. Для исследования созданы условия имитации внутреннего пространства лазерного излучателя, который содержит различные монтажные элементы. Определены возможности использования монтажных элементов в объеме герметичных неодимовых лазерных излучателей в процессе их эксплуатации. **Метод.** Разработана оригинальная установка, в состав которой входит YAG:Nd лазер с длиной волны излучения 1064 нм, энергией лазерного импульса 100 мДж, длительностью лазерного импульса 10–15 нс, частотой следования лазерных импульсов 10 Гц, и герметичная тест-кювета, внутри которой размещается монтажный элемент. При прохождении в течение 10 000 с лазерного излучения через пространство тест-кюветы летучие вещества, которые выделяются из материалов монтажного элемента, поглощают лазерное излучение и образуют на оптических элементах тест-кюветы зоны осаждения. Исследованы оптические, геометрические, цветовые параметры зон осаждения и их стойкость к действию растворителей. **Основные результаты.** Рассмотрено десять наиболее часто применяемых при создании герметичных неодимовых лазерных излучателей монтажных элементов. Определено, что провода с фторопластовой изоляцией, полиолефиновая термоусадочная трубка и индиевая фольга не создают зон осаждения на поверхности оптических элементов тест-кюветы. Установлено, что провода с силиконовой и фторполимерной изоляцией, оловянно-свинцовые сплавы (припой) с содержанием олова 61 % с канифолью и без нее, полиолефиновая термоусадочная трубка с клеевой основой и керамика-полимерные теплопроводящие диэлектрические материалы создают на поверхности оптических элементов тест-кюветы зоны осаждения. В связи с этим они не могут быть использованы в объеме герметичных неодимовых лазерных излучателей в процессе их эксплуатации. **Практическая значимость.** Полученные результаты могут быть востребованы при разработке и производстве устройств лазерной техники, в том числе для оценки возможности размещения материалов и монтажных элементов в объеме герметичных неодимовых лазерных излучателей.

Ключевые слова

лазерный излучатель, зона осаждения, взаимодействие, герметичный неодимовый лазерный излучатель, монтажный элемент, тест-кювета, ослабление

Ссылка для цитирования: Беликов А.В., Клочков И.С., Алексеев И.В., Капралов С.А. Лазерный многопараметрический метод входного контроля монтажных элементов, используемых в объеме герметичных неодимовых лазерных излучателей // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 2. С. 154–162. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-2-154-162

Laser multiparameter method for incoming inspection of the mounting elements used in the volume of sealed neodymium laser emitters

Andrey V. Belikov¹, Ivan S. Klochkov^{2✉}, Ivan V. Alekseev³, Sergey A. Kapralov⁴

^{1,2} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

^{2,3} Joint Stock Company “Research and Production Corporation “Precision Systems and Instruments”, Saint Petersburg, 190020, Russian Federation

⁴ Joint Stock Company “Research and Production Corporation “Precision Systems and Instruments”, Veliky Novgorod, 173003, Russian Federation

¹ avbelikov@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-8733-4860>

² Vany-nov13@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-5461-783X>

³ El.magio@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4368-9309>

⁴ kapralov_sa@npspp.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3393-4948>

Abstract

The paper investigates the parameters of the deposition zones as a result of laser radiation effect on the surface of an optical element. For the research, conditions have been created to simulate the inner space of a laser emitter, which contains various mounting elements. The possibilities of using mounting elements in the volume of sealed neodymium laser emitters during their operation have been determined. The authors developed a novel installation, which includes a YAG:Nd laser with a wavelength of 1064 nm, a laser pulse energy of 100 mJ, a laser pulse duration of 10-15 ns, a laser pulse repetition rate of 10 Hz, and a sealed test-cuvette with a mounting element inside it. When laser radiation passes through the space of the test-cuvette for 10 000 s, volatile substances released from the materials of the mounting element absorb the laser radiation and form a deposition zone on the optical elements of the test-cuvette. Optical, geometric, color parameters of these deposition zones and their resistance to the action of solvents are investigated. The work explored the ten mounting elements most frequently used for the manufacture of sealed neodymium laser emitters. It was determined that wires with fluoroplastic insulation, polyolefin heat-shrinkable tubing and indium foil do not create deposition zones on the surface of the optical elements of the test-cuvette. At the same time, it was found that wires with silicone and fluoropolymer insulation, tin-lead alloys (solders) with a tin content of 61 % with and without rosin, polyolefin heat-shrink tubing with an adhesive base and ceramic-polymer heat-conducting dielectric materials do create a deposition zone on the surface of the optical elements of the test-cuvette. Hence they cannot be used in the volume of sealed neodymium laser emitters during their operation. The results can be relevant for the development and manufacture of laser devices, as well as for assessing the possibility of placing mounting elements in the volume of sealed neodymium laser emitters.

Keywords

laser emitter, deposition zone, interaction, sealed neodymium laser emitter, mounting element, test-cuvette, attenuation

For citation: Belikov A.V., Klochkov I.S., Alekseev I.V., Kapralov S.A. Laser multiparameter method for incoming inspection of the mounting elements used in the volume of sealed neodymium laser emitters. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 154–162 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-2-154-162

Введение

Твердотельные неодимовые лазерные излучатели, в том числе на основе кристалла алюмоиттриевого граната, активированного неодимом (YAG:Nd), с длиной волны 1064 нм широко применяются в науке и технике. Они используются при исследовании механизмов и процессов, которые возникают: при взаимодействии излучения с веществом в ходе проведения высокоточных измерений, при формировании оптических стандартов и в других областях [1]. В лазерной медицине и биотехнологиях, авиа- и приборостроении, промышленности и других областях [2] используются твердотельные неодимовые лазерные излучатели, работающие в режиме модуляции добротности, с длительностью лазерного импульса 5–250 нс и частотой следования лазерных импульсов до 100 Гц.

Увеличение ресурса данных излучателей представляет большой практический интерес. Один из важных способов повышения ресурса — тщательный подбор материалов, которые размещаются в герметичном корпусе лазерного излучателя и используются для формирования излучения или служат как вспомогательные крепления и узлы. Необходимо, чтобы материал

удовлетворял требованиям к лучевой прочности, оптическим и конструктивным свойствам. Вместе с тем известно, что материалы обладают газовой выделением, в результате которого летучие вещества, удерживающиеся на поверхности за счет сил физической адсорбции, растворенные в объеме материала, содержащиеся в виде химических соединений или присутствующие в виде объемных включений в порах и трещинах, при определенных условиях оседают на оптических элементах и влияют на свойства поверхностей этих элементов и их лучевую прочность, что в конечном итоге приводит к уменьшению срока службы лазерных излучателей [3–5]. В этой связи при создании герметичных неодимовых лазерных излучателей важно применять вещества с минимальным газовой выделением, а такому фактору, как контроль чистоты внутренних поверхностей герметичных приборов, в том числе работающих в широком температурном диапазоне, следует уделять повышенное внимание. Особенно актуальна данная задача для мощных лазеров, работающих в режиме модуляции добротности.

В работе [5] встречается термин — удельный поток газовой выделения, с помощью которого можно оценить газовой выделение вещества. К сожалению, не все произ-

водители указывают данный параметр в технических характеристиках выпущенной продукции. Кроме того, в условиях реального производства при выборе монтажных элементов крайне затруднительно руководствоваться лишь справочными материалами, так как часто справочные значения расходятся с реальными вследствие того, что не всегда известна история каждого конкретного монтажного элемента, технология его производства, хранения и транспортировки. На предприятии, осуществляющем разработку и производство лазерной техники, зачастую необходимо производить оценку газовой выделенности используемых материалов монтажных элементов самостоятельно, так как очень важно гарантировать высокую воспроизводимость выходных параметров лазерного излучения в течение всего срока эксплуатации.

Методы и техника для определения газовой выделенности материалов хорошо известны. Вакуумные методы исследования газовой выделенности материалов являются современными способами определения пригодности вещества для применения во внутреннем объеме герметичных приборов. С их помощью определяют газовой выделенности образцов материалов, расположенных в изотермических контейнерах при определенной температуре, в вакуумной печи. Летучие конденсирующиеся компоненты, которые выделяются из образцов, улавливаются охлажденными поверхностями. Потерю массы вычисляют на основе разности масс образцов и конденсирующей пластины до и после эксперимента. Состав продуктов газовой выделенности определяют с помощью масс-спектрометра. Описанный метод позволяет выявить и идентифицировать все летучие вещества, однако для его осуществления необходимо большое количество высокотехнологичного оборудования (герметизированная вакуумная камера, контейнеры для материала, средства откачки воздуха, вакуумный затвор, регулятор объема камеры, масс-спектрометр и пр.), а сам процесс измерения занимает значительный промежуток времени [5–8]. Эти ограничения стимулируют поиск альтернативных методов исследования возможности использования тех или иных материалов в объеме герметичных приборов.

Постановка задачи и цель исследования

В данной работе впервые описан лазерный многопараметрический (ЛМП) метод входного контроля монтажных элементов, используемых в объеме герметичных YAG:Nd лазерных излучателей, работающих в режиме модуляции добротности. Метод основан на анализе параметров зон осаждения, создаваемых на оптических элементах тест-кюветы, содержащей тестируемый монтажный элемент (припой, провод, прокладка и другие) в процессе прохождения через нее излучения YAG:Nd-лазера [9, 10]. Рассмотрено ослабление лазерного излучения зоной осаждения, площадь, цвет, внешний вид зоны осаждения и ее устойчивость к растворителям. Совокупная оценка всех этих параметров позволяет оперативно принимать решение о возможности использования монтажного элемента в герметичном корпусе лазерного излучателя. Для умень-

шения времени измерений тест-кювета нагревается [4, 11]. В отличие от вакуумных методов ЛМП метод обладает такими преимуществами, как простота и высокая скорость измерений. Метод удобно применять на предприятиях, которые занимаются серийным производством лазерных приборов, так как он предполагает использование в качестве тестовых источников лазеров с параметрами, близкими или идентичными параметрам выпускаемых изделий.

Цель данной работы заключалась в представлении ЛМП метода, с помощью которого может осуществляться входной контроль монтажных элементов, применяемых в объеме герметичных неодимовых лазерных излучателей. Исследования с использованием ЛМП метода наиболее часто применяются в излучателях монтажных элементов.

Материалы и методы

В основе ЛМП метода лежит способность летучих веществ, выделяющихся из материалов, элементов и узлов, применяемых в корпусах герметичных лазерных излучателей, поглощать лазерное излучение и образовывать на поверхностях оптических элементов лазера зоны осаждения, содержащие эти вещества и влияющие на генерационные характеристики лазера [12]. ЛМП метод предполагает создание таких зон осаждения на поверхностях оптических элементов тест-кюветы. Внутри тест-кюветы помещается тестируемый монтажный элемент, и проходит излучение тестирующего лазерного излучателя, под воздействием которого и могут сформироваться зоны осаждения. Также возможно исследование оптических, геометрических, цветовых параметров этих зон осаждения и их стойкости к действию растворителей.

Для реализации ЛМП метода создана экспериментальная установка, схема и фотография которой представлены на рис. 1, где введены следующие обозначения: 1 — поглотитель лазерного излучения; 2 — приемная головка измерителя энергии Gentec QE25LP-S-MB-DO (Gentec Electro-Optics, Inc, Канада); 3 — термостол Магистр C20T1 (ООО НТЦ «Магистр-С», Россия); 4 — тест-кювета; 5 — тестирующий YAG:Nd лазерный излучатель (АО «НПК «СПП», Россия); 6 — светоделительная пластина; 7 — фотоприемник DET01CFC (THORLABS, Inc., США); 8 — осциллограф Wavesurfer 510R (Teledyne LeCroy, США).

В качестве активной среды в тестирующем лазерном излучателе использован алюмоиттриевый гранат, легированный ионами неодима. Длина волны излучения тестирующего лазера соответствует 1064 нм, длительность лазерного импульса (по полувысоте) — 10–15 нс, частота следования лазерных импульсов — 10 Гц, энергия лазерного импульса — 100 мДж. Источником накачки были выбраны решетки лазерных диодов, излучающие на длине волны 805 нм. Пространственное распределение интенсивности излучения в лазерном пятне после его ослабления закрытым револьверным аттенуатором 10CWA168 (Standa Ltd., Литва) в 100 000 раз и временной профиль лазерного импульса представлены на рис. 2.

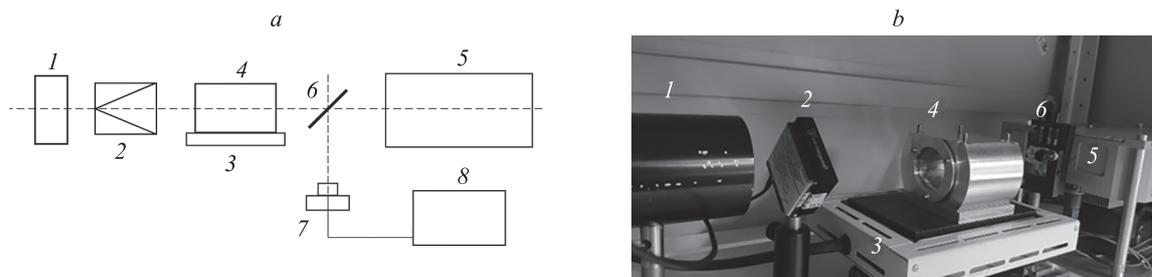


Рис. 1. Схема (а) и фотография (b) установки для реализации лазерного многопараметрического метода
 Fig. 1. Scheme (a) and photograph (b) of the installation for the implementation of the laser multiparameter method

Диаметр лазерного пучка и наклон его оси выбраны таким образом, чтобы излучение тестирующего лазерного излучателя проходило через входное и выходное стекла кюветы без виньетирования и в кювете не возникало дополнительных источников загрязнения. В результате анализа пространственного распределения интенсивности лазерного излучения в программном пакете Gentec-EO (Gentec Electro-Optics, Inc, Канада) определялась площадь сечения лазерного пучка $S_{\text{пучка}}$ по уровню e^{-2} .

Тест-кювета образована закрепленными в алюминиевом корпусе двумя кварцевыми плоскопараллельными пластинами (стеклами), которые представляют собой входные и выходные окна кюветы. Предварительно алюминиевый корпус тест-кюветы проходит этап очистки с помощью ультразвуковой ванны (ПСБ-Галс, Россия) и индустриального моющего средства Экономик (CHRISAL NV, Россия). В течение 30 мин корпус очищается от металлической стружки, масел и прочих материалов, наличие которых обусловлено процессами производства. Затем в течение 10 мин проводится очистка алюминиевого корпуса и стекол кюветы от следов моющего средства и остатков других веществ с помощью спирта и ацетона. Перед установкой стекол в кювету с помощью видеокамеры DCM510 5M pixels, CMOS chip (Scopetek, Китай) и микроскопа MC-2 ZOOM (Микромед, Китай) регистрируется внешний вид их поверхностей. Далее в тест-кювету устанавливаются стекла и помещается тестируемый

монтажный элемент. Площадь открытой для испарения поверхности монтажного элемента составила 375 мм², это значение одинаково для всех тестируемых монтажных элементов. Объем тест-кюветы соответствует 5 % усредненного объема герметичных неодимовых лазерных излучателей и равен 53 см³. Затем тест-кювета с тестируемым монтажным элементом внутри размещалась на термостоле «Магистр С20Т1» (ООО НТЦ «Магистр-С», Россия), который разогревал корпус кюветы до 100 °С в течение 60 мин [4, 11]. После этого через кювету с расположенным внутри тестируемым монтажным элементом пропускалось излучение тестирующего лазерного излучателя в течение промежутка времени, который определялся по формуле:

$$t = \frac{N}{f},$$

где N — количество лазерных импульсов; f — частота следования лазерных импульсов, Гц.

В экспериментах $N=100\,000$, что соответствует 1 % от ресурса источника накачки, $f=10$ Гц. В результате $t = 10\,000$ с.

По окончании промежутка времени t определен коэффициент ослабления Δk :

$$\Delta k = \frac{E_1 - E_2}{E_0} \cdot 100 \%,$$

где E_0 — энергия излучения на входе тест-кюветы, мДж; E_1 — энергия на выходе тест-кюветы сразу после

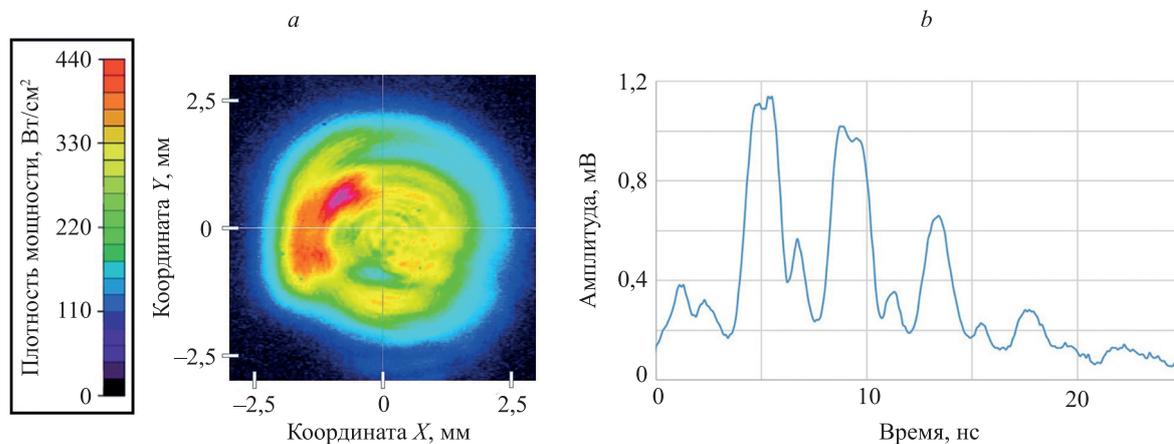


Рис. 2. Пространственное распределение интенсивности лазерного излучения (а) и временной профиль лазерного импульса (b)
 Fig. 2. Spatial distribution of the laser radiation intensity (a) and the temporal profile of the laser pulse (b)

нагрева корпуса кюветы до 100 °С, мДж; E_2 — энергия на выходе тест-кюветы после окончания промежутка времени t , мДж.

Из эксперимента следует, что один и тот же тестирующий излучатель использовался как для создания зон осаждения, так и для измерения коэффициента ослабления Δk .

После определения Δk стекла извлекались из тест-кюветы, и производилось опико-микроскопическое исследование их поверхностей. В результате анализа фотоснимков поверхностей в программном пакете ScopePhoto 3.1 (Scorpetek, Китай) определены площадь зоны осаждения $S_{\text{зос}}$ и коэффициент площади зоны осаждения K , который вычислен по формуле:

$$K = \frac{S_{\text{зос}}}{S_{\text{пучка}}} \cdot 100 \%,$$

где $S_{\text{пучка}}$ — площадь сечения лазерного пучка по уровню e^{-2} , мм²; $S_{\text{зос}}$ — площадь зоны осаждения, мм².

Выполнен анализ устойчивости к действию растворителей (спирт, ацетон). Чтобы определить устойчивость к растворителям, в течение 10 мин предпринималась попытка убрать зону осаждения в результате ее протирки ватным тампоном, содержащим 99,7 % этиловый спирт (АО «ЛенРеактив», Россия). Если она не исчезала, предпринималась попытка убрать зону осаждения протиркой ватным тампоном, содержащим 99,8 % ацетона (АО «ЛенРеактив», Россия). Если зону осаждения удавалось убрать, то она характеризовалась как неустойчивая к растворителям, в другом случае — как устойчивая.

Дополнительно в результате анализа фотоснимков зон осаждения с помощью микроскопа при 10[×] увеличении определялись: цвет зоны осаждения (белый или черный), наличие подтеков (рис. 3, *a*) и наличие равномерно осажденных веществ на элементах корпуса тест-кюветы — налета (рис. 3, *b*).

Для каждого монтажного элемента исследование повторялось десять раз. Статистическая обработка данных, полученных в результате экспериментов, заключа-

лась в определении средних значений и стандартного отклонения измеренных величин и проводилась в программном комплексе «StatGraphics Plus 5.0» (Statistical Graphics Corp., США).

Результаты и обсуждения

При разработке и изготовлении лазерных излучателей традиционно используют такие материалы и монтажные элементы, как провода, припой, термоусадочные трубки и теплопроводящие материалы.

В лазерных излучателях провода используются для фиксированного внутри- и межприборного монтажа электрических устройств. При выборе провода необходимо руководствоваться следующими параметрами: материал жилы, сечение жилы, количество проволок в жиле и материал изоляции. В качестве материала жилы провода чаще всего выбирают медь, алюминий или алюминий. Известно, что данные металлы содержат малое количество летучих веществ, поэтому не оказывают сильного влияния на чистоту поверхностей внутреннего объема лазера [6]. Материалы изоляции провода, наоборот, содержат большое количество летучих веществ [13]. При выборе изоляции провода стоит обратить особое внимание на: стойкость изоляции к механическим воздействиям, прочность на разрыв, гибкость, морозостойкость и термостойкость, устойчивость к возгоранию. Все эти параметры необходимо учитывать и в лазерных излучателях. Материалы изоляции проводов, которые наиболее часто применяются в приборостроении: силикон (провод Sili-e), фторполимер (провод Medi Kabel), фторопласт-4Д (провод МС-26), фторопласт-4 (провод МГТФ).

Для соединения двух и более проводов или для того, чтобы получить электрический контакт с малым переходным сопротивлением, применяются припои. Припой бывают мягкие или твердые, также они могут содержать или не содержать в своем составе канифоль. В лазерном приборостроении традиционно используются припои ПОС-61 с канифолью и ПОС-61 без канифоли.

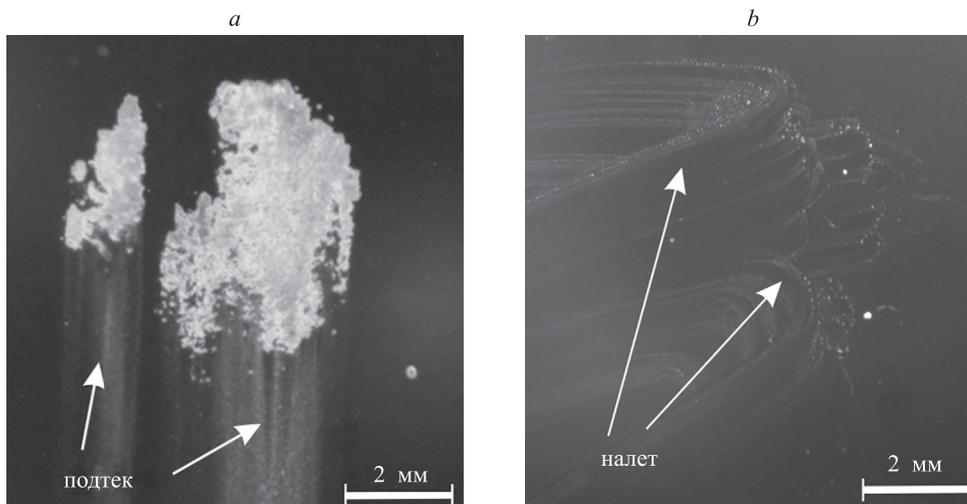


Рис. 3. Фотографии зон осаждения, содержащих подтеки (*a*) и налет (*b*)

Fig. 3. Photographs of deposition zones containing smudges (*a*) and sediments (*b*)

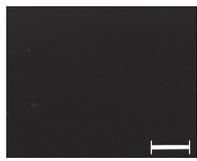
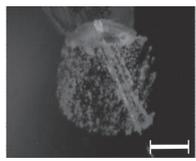
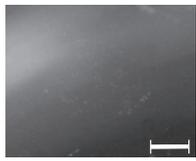
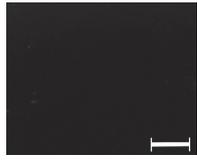
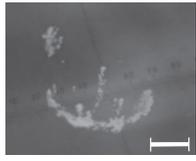
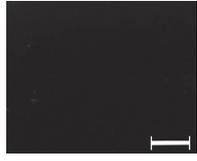
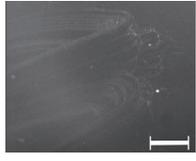
Чтобы обеспечить надлежащую защиту проводов и кабелей в электрических приборах, применяют кабельную изоляцию, в том числе термоусадочные трубки [14]. В лазерном приборостроении для этого широко используются полиолефиновые термоусадочные трубки: — с добавлением клеевой основы (термоусадочная трубка ТУТнг); — без клеевой основы (термоусадочная трубка GTI-3000).

Для максимально эффективного отвода тепла используются теплопроводящие материалы [15]. К этому классу относятся индиевая фольга Индий Ин00¹ и керамико-полимерные теплопроводящие диэлектрические материалы НОМАКОН™ КПТД-2. Важно, чтобы вы-

¹ ГОСТ 10297–94. Индий. Технические условия. Введ. 01.01.97. М.: Изд-во стандартов, 1996. 9 с.

Таблица 1. Типичные значения коэффициентов Δk , K и фотографии поверхности входного стекла тест-кюветы до и после воздействия излучения тестирующего лазерного излучателя для различных материалов монтажных элементов, исследуемых с помощью лазерного многопараметрического метода. Длина масштабного отрезка на фотографиях равна 2 мм

Table 1. Typical values of the Δk , K coefficients and photographs of the surface of the entrance glass of the test-cuvette before and after exposure to the radiation of the testing laser emitter for various materials of mounting elements, investigated using the laser multiparameter method. The scale bar is equal to 2 mm

Материал	Δk , %	K , %	Фотографии	
			до	после
Провод Sili-e (силикон) Staubli, Германия	62 ± 1	71 ± 2		
Провод Medi Kabel (фторполимер) MEDIKabelhandels GmbH, Германия	2 ± 1	3 ± 2		
Провод МС-26 (фторопласт-4Д), ООО «РадиоТехИндустрия», Россия	0	0		
Провод МГТФ (фторопласт 4) ООО «РадиоТехИндустрия», Россия	0	0		
Припой ПОС 61 с канифолью ООО «АС ЭНЕРГИЯ М», Россия	33 ± 1	23 ± 2		
Припой ПОС 61 без канифоли ООО «АС ЭНЕРГИЯ М», Россия	7 ± 1	0		

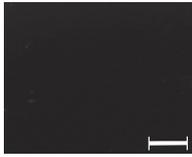
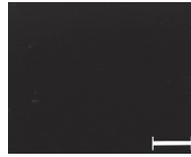
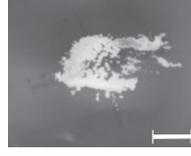
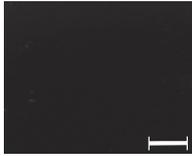
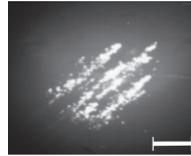
бранный материал обладал максимальным коэффициентом теплопроводности.

Результаты исследования вышеперечисленных материалов монтажных элементов ЛМП методом приведены в табл. 1 и 2.

В результате исследования материалов монтажных элементов по ЛМП методу определено, что при помещении проводов с силиконовой и фторопластовой изоляцией в герметичное пространство тест-кюветы на ее стеклах создается устойчивая к действию растворителей зона осаждения с $\Delta k = 62 \pm 1$ %, $K = 71 \pm 2$ % и $\Delta k = 2 \pm 1$ %, $K = 3 \pm 2$ % соответственно. В этой связи данные монтажные элементы могут являться причиной загрязнения внутреннего объема герметичных приборов.

Провода МС-26 и МГТФ с изоляцией из фторопласта не создают зон осаждения ($\Delta k = 0$), и по этой

Таблица 1. Продолжение

Материал	Δk , %	K , %	Фотографии	
			до	после
Термоусадочная трубка GTI-3000 (полиолефин) 3M Company, США	0	0		
Термоусадочная трубка ТУТнг (полиолефин с кле- евой основой) КВТ, Россия	58 ± 1	67 ± 2		
Керамико-полимерный теплопроводящий диэлек- трический материал НОМАКОН™ КПТД-2 «НОМАКОН», Россия	55 ± 1	64 ± 2		
Фольга индиевая Индий Ин00 ООО «СНАБТЕХМЕТ», Россия	0	0		

причине они не могут быть основанием для загрязнения внутреннего объема герметичных неодимовых лазерных излучателей.

При исследовании припоев ПОС 61 с канифолью и без канифоли выявлено, что $\Delta k = 33 \pm 1$ %, $K = 23 \pm 2$ % и $\Delta k = 7 \pm 1$ %, $K = 0 \pm 2$ % соответственно. Следовательно, оба припоя подлежат замене на материалы с меньшим количеством летучих веществ.

Среди двух исследованных изолирующих элементов термоусадочные трубки ТУТнг оказались источником появления зон осаждения на оптических поверхностях тест-кюветы $\Delta k = 58 \pm 1$ %, $K = 67 \pm 2$ %, а термоусадочные трубки GTI-3000 оказались пригодными для использования в герметичных приборах. Очевидно, что для уменьшения негативного влияния изолирующих материалов внутри объема герметичных неодимовых

Таблица 2. Результаты оценки устойчивости к действию растворителей, цвета и наличия-отсутствия подтеков и налета зон осаждения на поверхности стекол тест-кюветы для различных материалов монтажных элементов, исследуемых с помощью лазерного многопараметрического метода

Table 2. The results of assessing the resistance to the action of solvents, color and the presence-absence of smudges and sediments deposition zones on the surface of the glasses of the test-cuvette for various materials of mounting elements, investigated using the laser multiparameter method

Название материала	Устойчивость к действию растворителей	Цвет	Наличие/отсутствие подтека, налета	
			подтек	налет
Провод Sili-e	устойчива	черный	–	–
Провод Medi Kabel	устойчива	белый	–	–
Провод МС-26	зона осаждения отсутствует			
Провод МГТФ	зона осаждения отсутствует			
Припой ПОС 61 с канифолью	устойчива	белый	–	–
Припой ПОС 61 без канифоли	не устойчива	–	–	+
Термоусадочная трубка GTI-3000	зона осаждения отсутствует			
Термоусадочная трубка ТУТнг	устойчива	белый	–	–
НОМАКОН™ КПТД-2	устойчива	белый	+	–
Индий Ин00	зона осаждения отсутствует			

лазерных излучателей следует применять термоусадочные трубки GTI-3000.

В результате исследования теплопроводящего материала НОМАКОН™ КПТД-2 установлено, что он способствует образованию зон осаждения с $\Delta k = 55 \pm 1 \%$, $K = 64 \pm 2 \%$. Индиевая фольга Индий Ин00 не вызывает появления зон осаждения, и по этой причине в герметичных лазерных излучателях следует использовать именно этот теплопроводящий материал.

Заключение

В работе впервые описан лазерный многопараметрический метод входного контроля монтажных элементов, используемых в объеме герметичных лазерных излучателей. Метод апробирован для твердотельного неодимового лазерного излучателя, работающего в режиме модуляции добротности с длиной волны 1064 нм, длительностью импульса 10–15 нс, частотой f равной 10 Гц и энергией лазерного импульса 100 мДж.

Исследовано десять наиболее часто применяемых при создании герметичных неодимовых лазерных излучателей материалов монтажных элементов.

Определено, что фторопластовый провод МС-26, фторопластовый провод МГТФ, полиолефиновая термоусадочная трубка GTI-3000 и индиевая фольга Индий Ин00 не создают в течение времени действия лазерного излучения на поверхности оптических элементов тест-кюветы зон осаждения. Установлено, что силиконовый провод Sili-e, фторполимерный провод Medi Kabel, припой ПОС 61 с канифолью и без, полиолефиновая термоусадочная трубка ТУТнг с клеевой основой и керамико-полимерные теплопроводящие диэлектрические материалы НОМАКОН™ КПТД-2 создают на поверхности оптических элементов тест-кюветы зоны осаждения, и поэтому не могут быть использованы в объеме герметичных неодимовых лазерных излучателей.

Лазерный многопараметрический метод исследования веществ может быть хорошей альтернативой вакуумным методам. Полученные результаты могут быть использованы при разработке устройств лазерной техники, в том числе для оценки возможности размещения материалов и монтажных элементов в герметичном корпусе лазерного излучателя.

Литература

1. Кравцов Н.В. Основные тенденции развития твердотельных лазеров с полупроводниковой накачкой // Квантовая электроника. 2001. Т. 31. № 8. С. 661–677.
2. Вейко В.П., Петров А.А., Самохвалов А.А. Введение в лазерные технологии: Опорный конспект лекций по курсу «Лазерные технологии»: учебное пособие / под ред. В.П. Вейко. СПб.: Университет ИТМО, 2018. 161 с.
3. Митин А.О., Орешков В.И. Разработка и анализ методов исследования лучевой прочности оптических покрытий // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2016. № 55. С. 172–177.
4. Крючек С.Д. Обеспечение требования газовыделения материалов для применения в изделиях космического назначения // Решетневские чтения. 2017. Т. 1. С. 133–134.
5. Юрьева А.В. Проектирование вакуумных систем: методические указания. Томск: Издательство ТПУ, 2015. 38 с.
6. Ляпин К.Н. Методика измерения величины собственного газоразделения материалов в вакууме // Инженерно-педагогическое образование в XXI веке: материалы VII Республиканской научно-практической конференции молодых ученых и студентов БНТУ. Ч. 2. Минск: БНТУ, 2011. С. 93–96.
7. Виноградский Л.М., Волков М.В., Имамов Р.Ф., Назаров Д.С., Стариков Ф.А. Расчетные исследования газоразделения из металлических деталей лазера // Десятая Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям: сборник докладов. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2017. С. 178–183.
8. Визгалин Н.Ф., Надирадзе А.Б., Шапошников В.В. Способ измерения газоразделения материалов в вакууме. Патент РФ № 2395072. Бюл. 2010. № 20.
9. Schneider C.W., Lippert T. Laser ablation and thin film deposition // Springer Series in Materials Science. 2010. V. 139. P. 89–112. doi: 10.1007/978-3-642-13281-0_5
10. Krebs H.-U., Weisheit M., Faupel J., Súske E., Scharf T., Fuhse C., Störmer M., Sturm K., Seibt M., Kijewski H., Nelke D., Panchenko E., Buback M. Pulsed laser deposition (PLD) - a versatile thin film technique // Advances in Solid State Physics. 2003. V. 43. P. 505–518. doi: 10.1007/978-3-540-44838-9_36
11. Овчинников В.В., Иваненко М.В., Феклистов С.И. Влияние термического старения на свойства аустенитной стали 08X18H10T // Машиностроение и инженерное образование. 2010. № 1(22). С. 42–46.

References

1. Kravtsov N.V. Basic trends in the development of diode-pumped solid-state lasers. *Quantum Electronics*, 2001, vol. 31, no. 8, pp. 661–677. doi: 10.1070/QE2001v031n08ABEH002025
2. Veiko V.P., Petrov A.A., Samokhvalov A.A. *Introduction to Laser Technologies: lecture Notes for the Course “Laser Technologies”*. Tutorial. St. Petersburg, ITMO University, 2018, 161 p. (in Russian)
3. Mitin A.O., Oreshkov V.I. Development and analysis of investigation methods of optical coating radiation durability. *Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University*, 2016, no. 55, pp. 172–177. (in Russian)
4. Kryuchek S.D. Providing outgassing requirements for applications in spacecrafts. *Reshetnev Readings*, 2017, vol. 1, pp. 133–134. (in Russian)
5. Iureva A.V. *Design of Vacuum Systems*. Tomsk, TPU Publ., 2015, 38 p. (in Russian)
6. Liapin K.N. Methods for calculating intrinsic gas emissions of materials in vacuum. *Engineering and Pedagogical Education in the 21st Century: Proc. of the 7th Republican Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Students of Belarusian National Technical University*. Minsk, BNTU, 2011, pp. 93–96. (in Russian)
7. Vinogradskii L.M., Volkov M.V., Imamov R.F., Nazarov D.S., Starikov F.A. Computational studies of gas emissions from laser metal details. *Proc. of the 10th All-Russian School for Students, Postgraduate Students, Young Scientists and Specialists in Laser Physics and Laser Technologies*. Sarov, VNIIEF, 2017, pp. 178–183. (in Russian)
8. Vizgalin N.F., Nadiradze A.B., Shaposhnikov V.V. Method of measuring gas release of materials in vacuum. *Patent RU2395072*, 2010. (in Russian)
9. Schneider C.W., Lippert T. Laser ablation and thin film deposition. *Springer Series in Materials Science*, 2010, vol. 139, pp. 89–112. doi: 10.1007/978-3-642-13281-0_5
10. Krebs H.-U., Weisheit M., Faupel J., Súske E., Scharf T., Fuhse C., Störmer M., Sturm K., Seibt M., Kijewski H., Nelke D., Panchenko E., Buback M. Pulsed laser deposition (PLD) — a versatile thin film technique. *Advances in Solid State Physics*, 2003, vol. 43, pp. 505–518. doi: 10.1007/978-3-540-44838-9_36
11. Ovchinnikov V.V., Ivanenko M.V., Feklistov S.I. Influence of thermal aging on the properties of 08X18H10T austenitic steel. *Mashinostroenie i inzhenernoe obrazovanie*, 2010, no. 1(22), pp. 42–46. (in Russian)

12. Либенсон М.Н., Яковлев Е.Б., Шандыбина Г.Д. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). Часть 2. Лазерный нагрев и разрушение материалов: учебное пособие / под ред. В.П. Вейко. СПб.: Университет ИТМО, 2014. 181 с.
13. Марков В.Ф., Мухамедзянов Х.Н., Маскаева Л.Н. Материалы современной электроники: учебное пособие / под редакцией В.Ф. Маркова. Екатеринбург: УрФУ, 2014. 272 с.
14. Настольная энциклопедия электрика: от специалистов ЕКФ. М.: 1000 бестселлеров, 2019. 189 с.
15. Lee S., Choi D., Kim C.-J., Zhou J. Highly efficient diode side-pumped Nd:YAG ceramic laser with 210 W output power // *Optics and Laser Technology*. 2007. V. 39. N 4. P. 705–709. doi: 10.1016/j.optlastec.2006.03.015
12. Libenson M.N., Iakovlev E.B., Shandybina G.D. *Interaction of Laser Radiation with Matter (Power Optics). Part 2. Laser Heating and Destruction of Materials*. St. Petersburg, ITMO University, 2014, 181 p. (in Russian)
13. Markov V.F., Mukhamedzianov Kh.N., Maskaeva L.N. *Materials of Modern Electronics*. Ekaterinburg, UrFU, 2014, 272 p. (in Russian)
14. *Great Encyclopedia for an Electrician: Compiled by EKF Specialists*. Moscow, 1000 Bestsellers Publ., 2019, 189 p. (in Russian)
15. Lee S., Choi D., Kim C.-J., Zhou J. Highly efficient diode side-pumped Nd:YAG ceramic laser with 210 W output power. *Optics and Laser Technology*, 2007, vol. 39, no. 4, pp. 705–709. doi: 10.1016/j.optlastec.2006.03.015

Авторы

Беликов Андрей Вячеславович — доктор физико-математических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 7005600018](https://orcid.org/0000-0001-8733-4860), <http://orcid.org/0000-0001-8733-4860>, avbelikov@gmail.com

Клочков Иван Сергеевич — научный сотрудник, АО «НПК «СПП», Санкт-Петербург, 190020, Российская Федерация; аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-5461-783X>, Vany-nov13@yandex.ru

Алексеев Иван Владимирович — ведущий инженер, АО «НПК «СПП», Санкт-Петербург, 190020, Российская Федерация, <http://orcid.org/0000-0002-4368-9309>, El.magio@yandex.ru

Капралов Сергей Анатольевич — кандидат технических наук, начальник отдела, АО «НПК «СПП», Великий Новгород, 173003, Российская Федерация, <http://orcid.org/0000-0002-3393-4948>, kapralov_sa@npksp.ru

Статья поступила в редакцию 20.02.2021
Одобрена после рецензирования 14.03.2021
Принята к печати 30.03.2021

Authors

Andrey V. Belikov — D.Sc., Full Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russia, [sc 7005600018](https://orcid.org/0000-0001-8733-4860), <http://orcid.org/0000-0001-8733-4860>, avbelikov@gmail.com

Ivan S. Klochkov — Scientific Researcher, Joint Stock Company “Research and Production Corporation “Precision Systems and Instruments”, Saint Petersburg, 190020, Russian Federation, PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russia, <https://orcid.org/0000-0001-5461-783X>, Vany-nov13@yandex.ru

Ivan V. Alekseev — Lead Engineer, Joint Stock Company “Research and Production Corporation “Precision Systems and Instruments”, Saint Petersburg, 190020, Russian Federation, <http://orcid.org/0000-0002-4368-9309>, El.magio@yandex.ru

Sergey A. Kapralov — PhD, Head of Section, Joint Stock Company “Research and Production Corporation “Precision Systems and Instruments”, Veliky Novgorod, 173003, Russian Federation, <http://orcid.org/0000-0002-3393-4948>, kapralov_sa@npksp.ru

Received 20.02.2021
Approved after reviewing 14.03.2021
Accepted 30.03.2021



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»