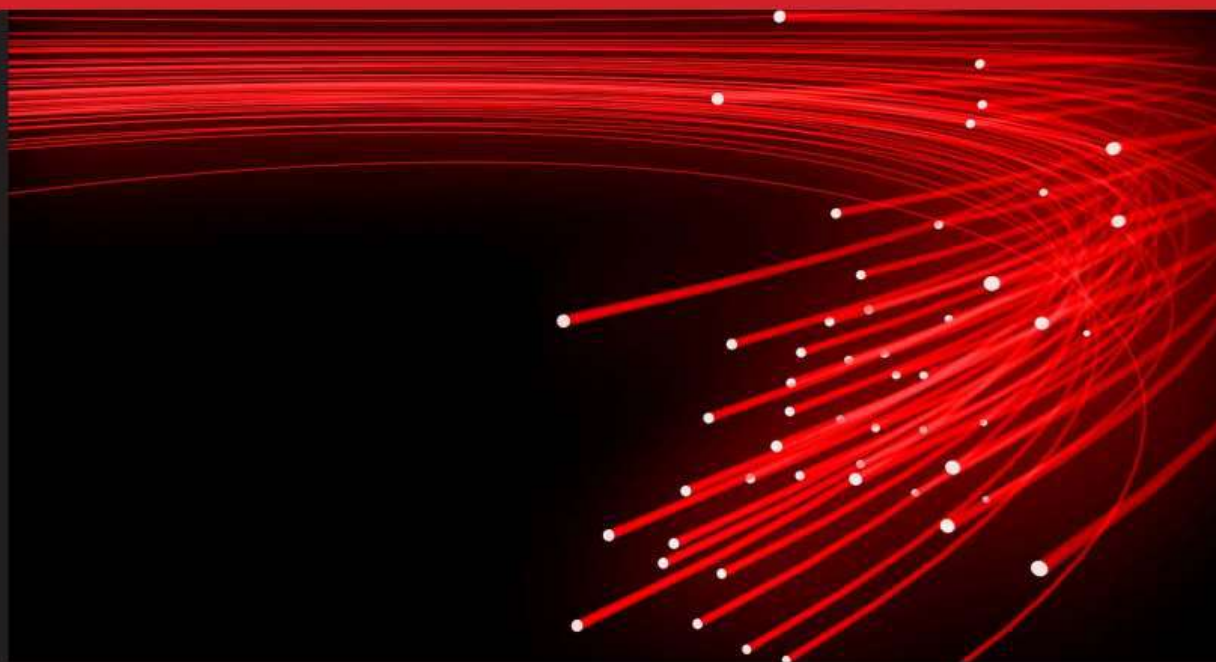


Лазеры. Измерения. Информация



Том 2, № 3 / 2022

Новороссийск
2022

Лазеры. Измерения. Информация. 2022. Том № 02. № 03 (07)

<https://lasers-measurement-information.ru>

Лазеры. Измерения. Информация

Научный сетевой журнал

Издаётся с марта 2021 года

Выходит 4 раза в год

ISSN 2713-0568

Том 2, № 3 (7)

сентябрь 2022 г. - ноябрь 2022 г.

Главный редактор: В. Е. Привалов

Ответственный редактор: В. Г. Шеманин

Редакционная коллегия: А. Н. Власов, В. Н. Дёмкин, Г. С. Евтушенко, И. Г. Иванов, М. М. Кутейко, Г. П. Михайлов, Л. А. Русинов, А. Л. Соколов, А. Н. Солдатов, В. А. Степанов, А. А. Тихомиров, С. А. Филист, А. Э. Фотиади, Е. Г. Чуляева

Учредитель: ФГБОУ ВО БГТУ им. В. Г. Шухова

Издатель: Филиал БГТУ им. В. Г. Шухова в г. Новороссийске

Адрес редакции:

353919, Россия, Новороссийск, Мысхакское шоссе 75

Тел. +78617221333

<https://lasers-measurement-information.ru>

e-mail: editor-laser@nb-bstu.ru

Свидетельство о регистрации: серия Эл № ФС77-81070 от 02 июня 2021 г.

Опубликовано 30.11.2022

© Филиал БГТУ им. В. Г. Шухова в г. Новороссийске, 2022

Содержание:

ЛАЗЕРНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Першин С. М., Гришин М. Я., Завозин В. А., Титовец П. А., Федюк М. О., Смольский А. А.

Лазерное зондирование под водой сквозь полупрозрачные препятствия на дистанцию 9 метров стр. 4

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Баскакова А. В., Кузнецов С. Н., Широбакин С. Е.

Конструирование атермальных оптических систем для беспроводной лазерной связи стр. 9

ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ

Ионов А. Ю., Фролов О. О., Тимченко П. Е., Бажутова И. В., Тимченко Е. В.

Рамановская спектроскопия для оценки твёрдых тканей зубов при лечении пародонтита стр. 20

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

Воронина Э. И., Чартий П. В., Шеманин В. Г.

Прогнозирование оптической прочности полимерных покрытий при их лазерной абляционной деструкции стр. 27

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ. КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Шеманин В. Г., Мкртычев О. В.

Результаты экспериментальных исследований лазерного разрушения кристаллов для оптических волноводов ИК-спектра стр. 34

ЛАЗЕРНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

doi: 10.51639/2713-0568_2022_2_3_4

УДК 535.8

ГРНТИ 47.35.31

ВАК 01.04.21

Лазерное зондирование под водой сквозь полупрозрачные препятствия на дистанцию 9 метров

¹ Першин С. М., ¹ Гришин М. Я., ¹ Завозин В. А., Титовец П. А.,
^{2*} Федюк М. О., ² Смольский А. А.

¹ *Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук
119991, Россия, г. Москва, ул. Вавилова 38*

² *Московский технический университет связи и информатики
111024, Россия, г. Москва, ул. Авиамоторная 8а, с. 39*

e-mail: m.o.fedyuk@mtuci.ru

Использование лидара для зондирования пространства вокруг погружного робота сквозь полупрозрачные препятствия позволяет более эффективно решать задачу подводной навигации. Метод лазерного зондирования заключается в излучении коротких лазерных импульсов большой мощности и последующим их детектированием, путём подсчёта фотонов, отражённых от объектов на пути распространения пучка. Такой метод зондирования менее подвержен влиянию мутности и рассеивания в воде по сравнению с видеокамерами, а также является более энергоэффективным в сравнении с эхолотами. В результате серии экспериментов были получены данные на уникальной научной установке МТУСИ, позволившие утверждать, что лазерное зондирование гидросферы или лидарные измерения являются перспективным направлением в гидротехнологиях и гидроэкологическом мониторинге.

Ключевые слова: оптическая система, лидар, подводная навигация, лазерное зондирование гидросферы, полупрозрачные препятствия.

Теория и метод исследования

Степень изученности подводного мира Земли крайне низка, как за рубежом, так и в России. Территорию России омывают три океана: Северный Ледовитый, Атлантический и Тихий, а также множество окраинных и внутренних морей, не считая тысяч рек и озёр. Поэтому необходимость в изучении подводной среды всегда стояла перед российскими учёными. Рост перспектив исследования подводной среды обусловлен в том числе развитием смежных областей науки, включая микроэлектронику, робототехнику и многие другие. Развитие таких направлений науки позволяет, как совершенствовать уже существующие инструменты для подобных исследований, так и создавать новые. Общие усилия различных областей науки позволяют изменить взгляд и облегчить подводные исследования, получить новые знания о среде. Одним из таких инструментов являются подводные беспилотные дроны и исследовательские платформы.

Для ориентирования и навигации под водой подобные устройства применяют видеокамеры и эхолоты, позволяющие получать «изображение» окружающего пространства и собирать научные данные. Тем не менее видеокамеры обладают небольшой дальностью обзора, вплоть до дистанции в один метр и менее в условиях высокой мутности. Таким образом скорость и качество навигации под водой существенно падает, что мешает проведению исследований. Эхолоты в свою очередь способны обеспечить детектирование объектов на дистанциях 100 и более метров, но стоит отметить крайне высокое энергопотребление эхолота в сотни ватт и более для больших дальностей. Зондирование подводной среды лидаром в свою очередь способно обеспечить большую дальность «обзора» по сравнению с видеокамерами при значительно меньшем энергопотреблении в единицы ватт и менее. Лазерное зондирование подвержено меньшему влиянию мутности воды и рассеиванию света в среде, что положительно сказывается на максимально возможной дальности обнаружения объектов.

Метод лазерного зондирования, также известного как метод оптического радара или лазерного радара (лидара), заключается в обнаружении и определении дальности с помощью лазера. Лазер излучает серию коротких импульсов на заданной длине волны, после чего отражённые от препятствий фотоны детектируются и подсчитываются. На основе временной задержки между излучением и детектированием фотонов становится возможно определить дальность препятствия, при этом количество отражённых фотонов будет зависеть от геометрических размеров этого препятствия и его отражающих свойств.

Постановка эксперимента

Эксперимент по лидарному зондированию полупрозрачных препятствий проводился на уникальной научной установке (УНУ) МТУСИ «Аппаратно-программный комплекс оценки основных технических характеристик оборудования беспроводной подводной лазерной связи» (рис. 1), длина подводной трассы составила 9,68 м. Данная установка является модульной, что позволяет изменять длину трассы путём увеличения или же уменьшения количества секций, также варьируя длину каждой из секций.



Рис. 1. УНУ «Аппаратно-программный комплекс оценки основных технических характеристик оборудования беспроводной подводной лазерной связи»

Для имитации полупрозрачных препятствий на стыках секций в воду были погружены мелкаячеистые сетки, закреплённые на пластиковой основе (рис. 2). Каждая из этих сеток не препятствует прохождению лазерного пучка, при этом отражает часть попадающих на неё фотонов.



Рис. 2. Сетка, погруженная в воду

Источником лазерного излучения являлся импульсный лазер на основе Nd:YAG лазера с диодной накачкой, длиной волны – 532 нм, длительность импульса – 10 нс, энергия импульса – 2 мкДж/импульс, частота повторения импульсов – 4 кГц (рис. 3). Приёмным устройством являлся кремниевый однофотонный диод (SPAD), работающий в режиме счёта фотонов.



Рис. 3. Задействованный в эксперименте лидар

Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 4.



Рис. 4. Схема экспериментальной установки

На рисунке 5 приведены результаты детектирования препятствий в гидросфере и атмосфере сквозь гидросферу. Данные результаты показали, что такой метод позволяет уверенно детектировать несколько полупрозрачных препятствий в гидросфере, а также определять сплошное препятствие за полупрозрачными препятствиями. Тем самым по полученной картине рассеяния можно однозначно определить наличие полупрозрачных препятствий в гидросфере и определить до них точное расстояние. Лазерное зондирование гидросферы позволяет работать через разделы двух сред, которые для остальных видов зондирования гидросферы являются не доступными.

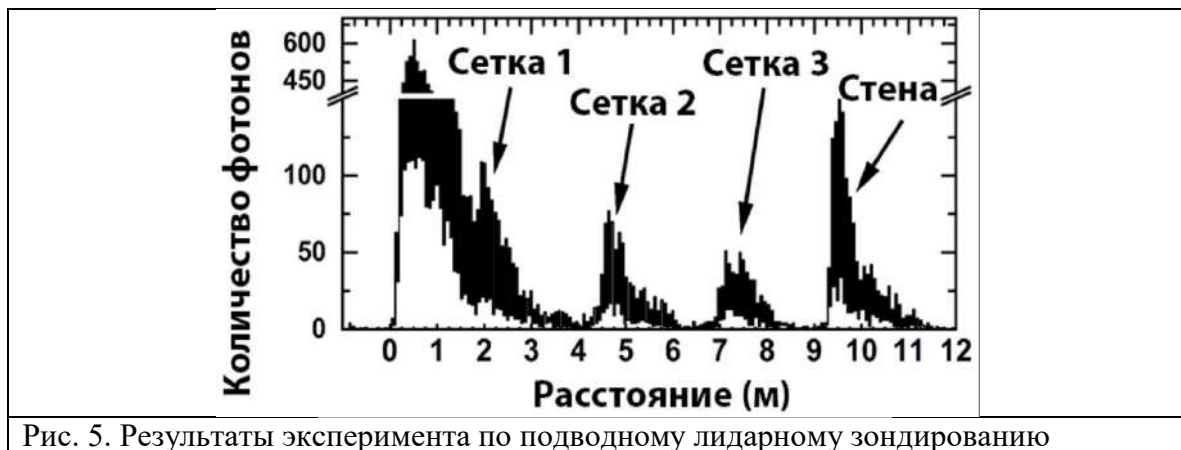


Рис. 5. Результаты эксперимента по подводному лидарному зондированию

Заключение

Серия экспериментов на УНУ МТУСИ показала перспективность применения лидарного измерения в гидросфере. Полученные результаты показали возможность детектирования полупрозрачных и сплошных препятствий в гидросфере.

По итогам проведенного эксперимента, можно судить об эффективности и целесообразности применения лидарного зондирования для подводной навигации автономных роботов и платформ. Такой способ позволяет оценить дистанцию до объектов под водой с высокой точностью, а также оценить ряд других параметров, например, отражающие свойства препятствия или его размеры.

Для дальнейшего развития проекта по лидарному зондированию подводной среды планируется: модернизировать лидар для работы на длине волны 450 нм, (данная длина волны меньше всех прочих затухает при прохождении сквозь гидросферу); провести дополнительные эксперименты для разных дальностей гидросферной трассы; провести серию экспериментов с различными параметрами воды, таких как солёность и прозрачность, различными степенями турбулентности, а также провести эксперименты в море.

Конфликт интересов

Авторы статьи заявляют, что у них нет конфликта интересов по материалам данной статьи с третьими лицами, на момент подачи статьи в редакцию журнала, и им ничего не известно о возможных конфликтах интересов в настоящем со стороны третьих лиц.

Список литературы

1. Miroshnikova N. E., Petruchin G. S., Sherbakov A. V., Titovec P. A. A statistical model of the propagation of optical radiation in the hydrosphere // 2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications SYNCHROINFO 2021 - Conference Proceedings – IEEE, 2021. – С. 9166104.
2. Miroshnikova N. E., Petruchin G. S., Titovec P. A. Estimation of the effect of dispersion on the communication range in a wireless underwater optical channel // 2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications SYNCHROINFO 2021 - Conference Proceedings – IEEE, 2021. – С. 9488389.
3. Андреев С. А., Казанцев С. Ю., Свистунова А. И., Титовец П. А., Федюк М. О. Перспективы развития беспроводной оптической подводной связи: достижения МТУСИ // Наука, техника, педагогика высшей школы. Новые технологии = Science, Engineering, Higher Education Pedagogics. New Technologies (2022): материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Москва: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский политехнический университет", 2022. – С. 281–288.
4. Бункин А. Ф., Клинков В. К., Леднев В. Н., Першин С. М., Юльметов Р. Н. Дистанционное зондирование полярных акваторий компактным лидаром: достижения и перспективы // Труды ИОФАН. 2013. Т. 69. С. 148–170.

Laser probing in water to 9 m distance through semi-transparent obstacles

¹ Pershin S. M., ¹ Grishin M. Ya., ¹ Zavozin V. A., ² Titovets P. A.,
² Fedyuk M. O., ² Smolsky A. A.

¹ *Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences
 119991, Russia, Moscow, st. Vavilova 38*

² *Moscow technical university of communication and informatics
 111024, Russia, Moscow, st. Aviamotornaya 8a, c. 39*

The use of lidar for sensing the space around the submersible robot through translucent obstacles makes it possible to more effectively solve the problem of underwater navigation. The method of laser probing consists in the emission of short laser pulses of high power and their subsequent detection by counting the photons reflected from objects along the beam propagation path. This probing method is less affected by turbidity and dispersion in water compared to video cameras, and is also more energy efficient than echo sounders. As a result of a series of experiments, data were obtained with unique MTUCI scientific facility, which made it possible to state that laser probing of the hydrosphere or lidar measurements are a promising direction in hydrotechnologies and hydroecological monitoring.

Key words: optical system, lidar, underwater navigation, laser probing of the hydrosphere, translucent obstacles.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

doi: 10.51639/2713-0568_2022_2_3_9

УДК 535.2

ГРНТИ 49.46.33

ВАК 01.04.05

Конструирование атермальных оптических систем для беспроводной лазерной связи

* Баскакова А. В., Кузнецов С. Н., Широбакин С. Е.

Акционерное общество «Мостком», Рязань, Урицкого, 35, помещение Н7

e-mail: info@mocckom.ru, * anna_bas97@mail.ru

Возможности FSO оборудования определяются качеством оптической системы и стабильностью ее параметров при воздействии внешних факторов, важнейшим из которых является температура. В работе представлена методика оценки термостабильности оптических систем, которая позволяет оценить влияние температуры на бюджет оптической линии связи.

Ключевые слова: беспроводная оптическая связь, оптическая система, атермальность, бюджет.

Введение

Одной из все более востребованных в настоящее время технологий беспроводной высокоскоростной телекоммуникации является технология атмосферных оптических линий связи (АОЛС, Free Space Optics, FSO-оборудование). Данный вид связи, использующий модулированное лазерное излучение, имея свои ограничения в применении из-за воздействия внешних факторов таких как снег и туман, тем не менее очень перспективен благодаря скорости передачи данных, соизмеримой с передачей по оптическому волокну. В данном оборудовании запас по усилению (бюджет) линии связи определяется расходимостью излучения в открытом пространстве. В связи с этим возможности FSO оборудования определяются качеством оптической системы и стабильностью ее параметров при воздействии внешних факторов, важнейшим из которых является температура. Настоящая работа посвящена методике оценки термостабильности оптических систем (ОС) беспроводных оптических систем связи, направленной на разработку термостабильных (атермальных) ОС.

Постановка задачи

Влияние температуры на беспроводные линии связи с точки зрения изменения параметров оптической системы идет по двум направлениям:

- на приёмной стороне смещается фокус принимаемого излучения относительно приемного устройства;
- на передающей стороне изменяется расходимость излучения передатчика из-за смещения точки излучения относительно фокальной плоскости (расстройки ОС).

В связи с тем, что конструкция FSO систем осесимметрична, имеет смысл рассматривать смещения оптических элементов (как и точки фокусировки) только в продольном, параллельном оси диаграммы направленности оптической системы направлении.

Смещение фокальной плоскости ОС относительно приёмника излучения приводит к увеличению размера пятна излучения на приёмнике и может оказывать влияние на запас по усилению, только если размер пятна начинает превышать диаметр активной зоны приемного устройства. Предварительные оценки показали, что апертура приёмника излучения в FSO системах (например, торец многомодового волокна или площадка фотоприемника) значительно больше размера пятна сфокусированного излучения с учетом его возможного увеличения за счёт относительного смещения фокальной плоскости из-за терморасстройки ОС. В связи с этим в данной работе рассматривается только влияние увеличения расходимости излучения.

Увеличение расходимости излучения передатчика приводит к снижению плотности излучения в плоскости приемника и соответственному снижению мощности излучения, поступающего на приемник.

Таким образом, в рамках поставленной задачи необходимо определить изменение расходимости излучения при изменении температуры окружающей среды и, как следствие, влияние последней на запас по усилению атмосферной оптической линии связи.

Зависимость запаса бюджета линии от расстройки ОС

Запас бюджета в абсолютном выражении определяется отношением принимаемой мощности излучения к чувствительности приемника. В рамках поставленной задачи целесообразно оценивать не абсолютную величину запаса бюджета, а её изменение, вызванное расстройкой ОС за счёт изменения расходимости излучения передатчика. В данном контексте изменение запаса бюджета происходит за счёт изменения плотности мощности излучения на приёмной апертуре ΔB . В условиях, когда диаметр пучка излучения на приёмной апертуре больше или равен её диаметру, ΔB идентично изменению запаса бюджета. Величина ΔB пропорциональна квадрату отношения радиуса пучка после расстройки ОС w_2 к радиусу пучка до расстройки ОС w_1 , и её можно оценить, используя следующее выражение:

$$\Delta B = 20 \cdot \log \left(\frac{w_2}{w_1} \right), \text{ дБ.} \quad (1)$$

Для расчёта радиуса пучка излучения используем приближение гауссовых пучков.

В различных приложениях лазерной оптики при описании пучка излучения используют идеальное приближение, известное как Гауссов пучок [1]. Интенсивность в таком пучке распределена по закону Гаусса.

На рисунке 1 представлен профиль (каустика) сходящегося Гауссовского пучка, выходящего из излучателя TR (например, торца одномодового волокна), проходящего через тонкую линзу (эквивалент объектива АОЛС) и распространяющегося далее в свободном пространстве (справа от линзы) до входной апертуры приемника излучения RCV.

Как видно из рисунка 1, пучок излучения после линзы сходится, имея на расстоянии от линзы S_1 самое узкое сечение (перетяжку) радиусом w_{01} , и на приёмной апертуре радиус пучка становится равным w_1 .

Радиус перетяжки пучка излучения после линзы определяется выражением:

$$w_{01} = \frac{w_0 F}{\sqrt{(\Delta x)^2 + Z_R^2}}, \quad (2)$$

где F – фокусное расстояние линзы; Δx – смещение торца излучателя относительно фокуса линзы (расстройка ОС); $Z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$ – длина Релея; λ – длина волны излучения.

При этом расстояние от линзы до перетяжки пучка излучения за линзой определяется следующим выражением [1]:

$$S_1 = F \left[1 + \frac{\frac{F+\Delta}{F} - 1}{\left(\frac{F+\Delta}{F} - 1\right)^2 + \left(\frac{Z_R}{F}\right)^2} \right]. \quad (3)$$

Соответственно радиус пучка излучения на расстоянии l описывается выражением:

$$w_l = w_{01} \sqrt{1 + \left[\frac{\lambda(l-S_1)}{\pi w_{01}^2} \right]^2}. \quad (4)$$

Для оценки влияния расстройки ОС на ΔB используем следующие параметры:

- длина волны $\lambda = 1550$ нм;
- радиус перетяжки – $w_0 = 5$ мкм;
- фокусное расстояние ОС 200 мм.

На рисунке 2 представлены зависимости $\Delta B(\Delta x)$, для $l = 10, 100, 500, 1000$ и 10000 м, рассчитанные по формуле (1) с учётом выражений (2), (3) и (4).

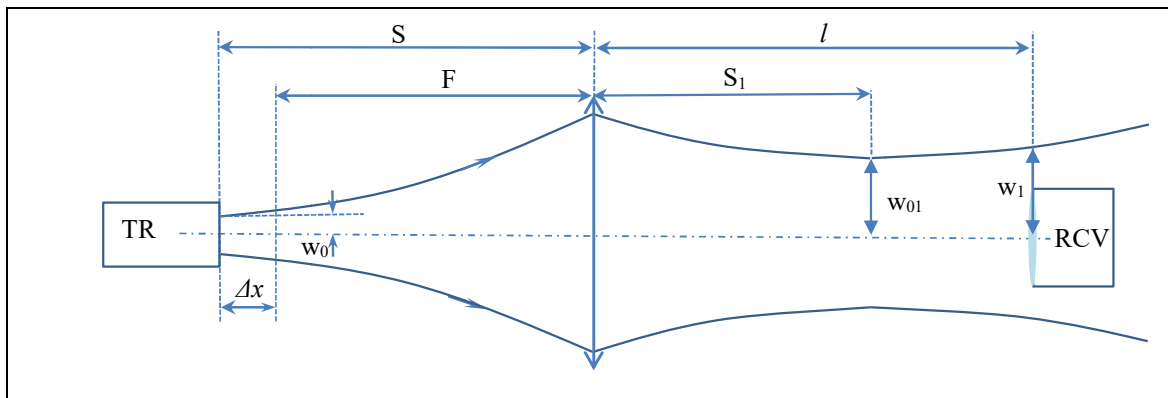


Рис. 1. Профиль Гауссова пучка на пути от передатчика до приёмника АОЛС

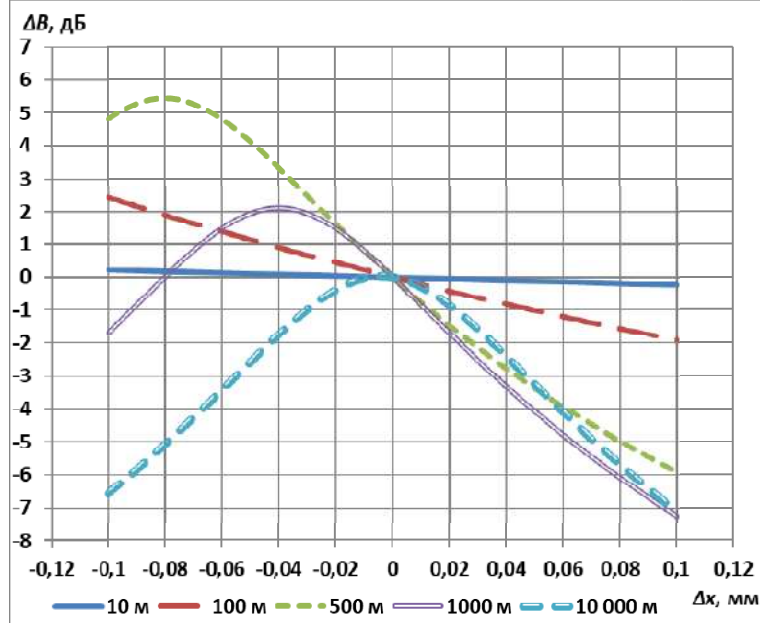


Рис. 2. Зависимость изменения ΔB от расстройки ОС для разных расстояний до между терминалами АОЛС

Следует отметить, что, как сказано выше, изменение бюджета совпадает с ΔB только на расстояниях, при которых диаметр пучка излучения на входе в приемную апертуру w_1 больше или равен её диаметру. Поэтому при использовании кривых на рис. 2 для оценки запаса бюджета линии следует принимать во внимание соотношение указанных диаметров для выбранного расстояния. Дальнейшие рассуждения будут исходить из того, что w_1 больше диаметра приёмной апертуры.

Из приведённых графиков видно, что при расстоянии 1 км бюджет линии увеличивается на 2 дБ при смещении торца волокна от фокальной плоскости (удалении от линзы) на 40 мкм. Это связано с совмещением положения перетяжки с входной апертурой приемника излучения. Для расстояния 10 км в любом случае диаметр перетяжки больше диаметра входной апертуры приемника, поэтому происходит снижение бюджета линии почти на 7 дБ при расстройке ± 100 мкм.

При дистанции 500 м изменение бюджета достигает почти 11 дБ. Так, при минусовых значениях расстройки бюджет увеличивается почти на 5 дБ, а при положительных значениях уменьшается на 6 дБ.

Для практики необходимо ввести критерий допустимого снижения бюджета линии за счёт расстройки. Во многом эта величина зависит от общего бюджета линии, для оценки атермальности была введена величина допустимого снижения бюджета линии не более 2 дБ.

Зависимость расстройки от температуры

При изменении температуры в оптической системе изменяются радиусы кривизны поверхностей, толщина линз и расстояние между ними, а также показатель преломления стекла и окружающей среды. Все это приводит к изменению фокусного расстояния и, что важно, заднего отрезка – расстояния между фокальной плоскостью и ближайшим к ней (последним) оптическим элементом. Любая конструкция оптической системы предполагает некий корпус с закрепленными оптическими элементами и закрепленным на этом корпусе источником излучения. При настройке всего оптического тракта добиваются того, чтобы задний отрезок точно соответствовал расстоянию от источника излучения до последнего оптического элемента.

Изменение заднего отрезка оптической схемы от температуры связано с изменением показателей преломления оптических элементов, изменением их радиусов, а также толщины оптических элементов.

Радиус кривизны поверхности оптических элементов при температуре t определяется как

$$r_t = r_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot (t - t_0)),$$

где r_{20} – радиус кривизны поверхности при $t_0 = 20^\circ\text{C}$.

Показатель преломления стекла при температуре t определяется как

$$n_t = n_{20} + \beta \cdot (t - t_0),$$

где n_{20} – показатель преломления при 20°C , β – температурный коэффициент показателя преломления, α – температурный коэффициент линейного расширения материала.

Показатель преломления стекла N-BK7 n_{20} составляет 1,500652 (на длине волны 1550 нм), $\alpha = 7,2 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$; $\beta = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Коэффициент β в свою очередь зависит от температуры и длины волны и определяется соотношением [2]:

$$\beta(\lambda, t) = \frac{n^2(\lambda, t_0) - 1}{2 \cdot n(\lambda, t_0)} \cdot \left(D_0 + 2 \cdot D_1 \cdot \Delta t + 3 \cdot D_2 \Delta t^2 + \frac{E_0 + 2 \cdot E_1 \cdot \Delta t}{\lambda^2 - \lambda_{\text{TK}}^2} \right),$$

где $n(\lambda, t_0)$ – показатель преломления стекла для заданной длины волны 1550 нм и при температуре $t_0 = 20^\circ\text{C}$, коэффициенты D_0, D_1, D_2, E_0, E_1 представлены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры стекла N-BK7 Schott [2]

$n(\lambda, T_0)$	1,500625
D_0	$1,86 \cdot 10^{-6}$
D_1	$1,31 \cdot 10^{-8}$
D_2	$1,37 \cdot 10^{-11}$
E_0	$4,34 \cdot 10^{-7}$
E_1	$6,27 \cdot 10^{-10}$
$\lambda_{TK}, \text{ мкм}$	0,170

На рисунке 3 показана зависимость коэффициента β от температуры для стекла N-BK7. Для реальной практики необходимо ввести критерий допустимого снижения бюджета линии за счет расстройки. Во многом эта величина зависит от общего бюджета линии, для оценки введём величину допустимого снижения бюджета линии не более 2 дБ.

Конструкция 1 (ОС1)

Рассмотрим оптическую систему 1 одной из моделей серийно выпускаемого FSO оборудования [2]. Крепление оптических элементов на кронштейне с указанием материалов показано на рисунке 4.

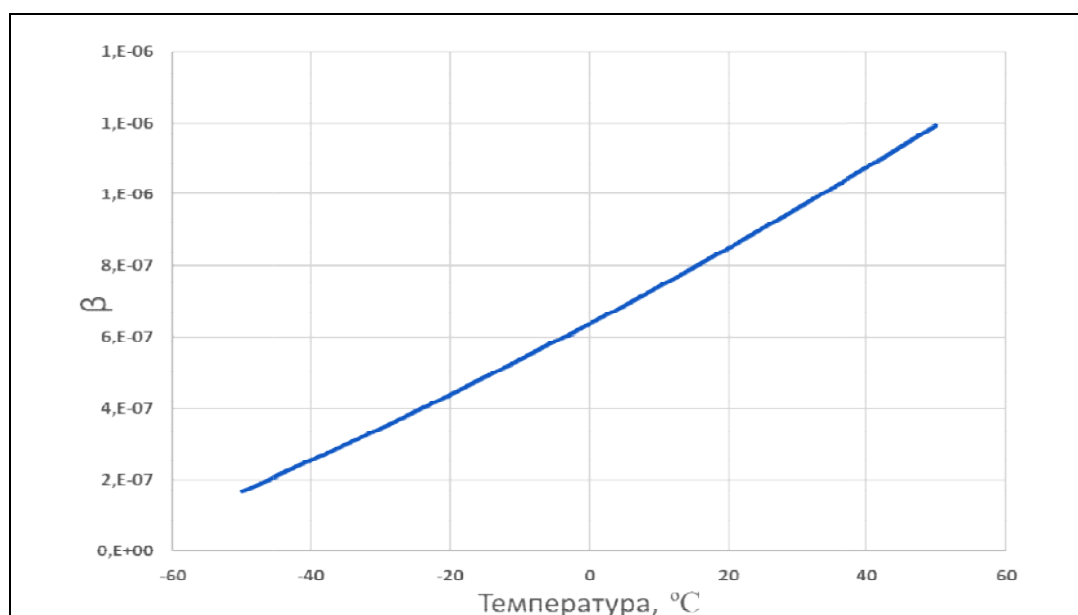
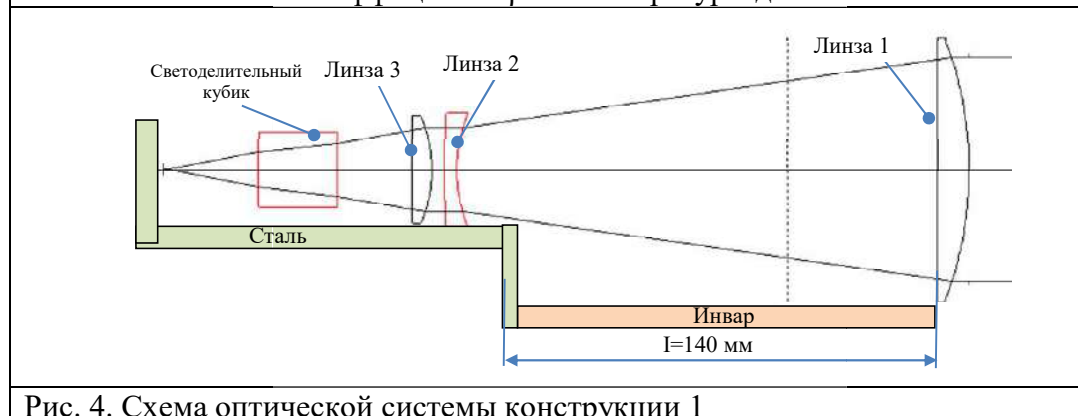
Рис. 3. Зависимость коэффициента β от температуры для стекла N-BK7

Рис. 4. Схема оптической системы конструкции 1

Данная оптическая система состоит из 3-х линз и светоделительного кубика из стекла N-BK7.

Следует отдельно отметить расстояние от светоделительного кубика до источника излучения. Данный размер не зависит от термооптических свойств оптики и определяется только длиной и КТЛР материала крепления источника излучения к оптической системе.

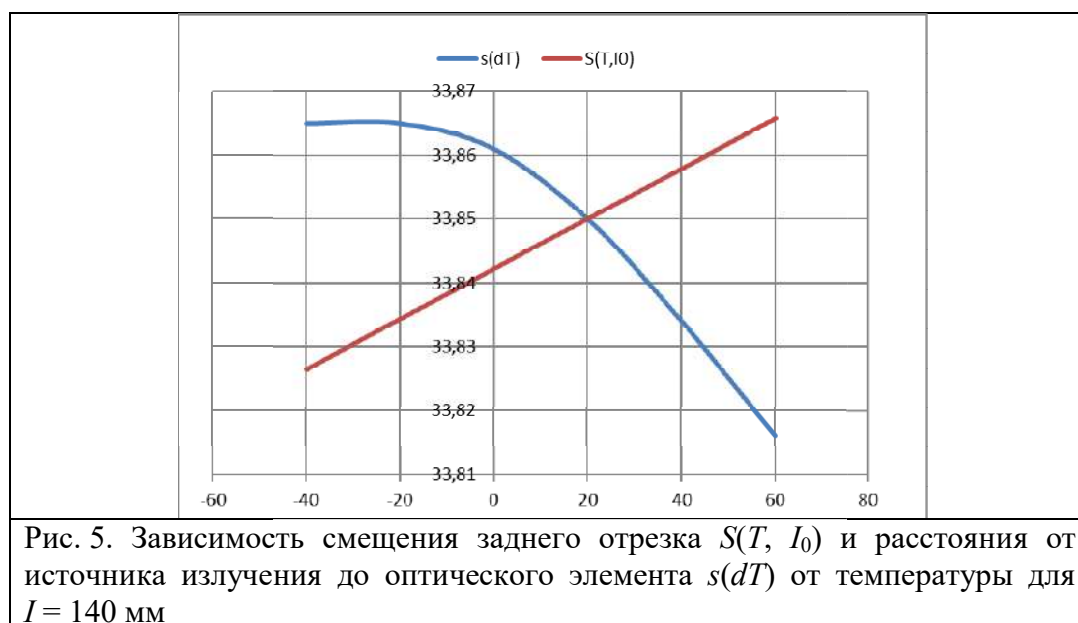
Исходя из приведенного анализа следует, что расстройка источника излучения и фокальной плоскости $dS(dT, I)$ при изменении длины инварового кронштейна и температуры, будет определяться следующим выражением:

$$dS(dT, I) = S_0(1 + \gamma_s dT) - S(dT, I), \quad (9)$$

где S_0 – величина заднего отрезка при настройке ($T = 20^\circ\text{C}$); $S(T, I)$ – величина заднего отрезка, по разному зависящая температуры для разных I , $dT = (T - 20)$.

При этом источник излучения геометрически точно совпадает с фокальной плоскостью. Эта величина не зависит от I для данной оптической системы.

Для расчета $S(T, I_0)$ была использована программа моделирования оптических систем WinLens3D. Для этого были рассчитаны в диапазоне температур от -40°C до $+60^\circ\text{C}$ все изменяющиеся параметры оптической системы: радиусы линз, толщины оптических элементов, расстояния между ними, показатели преломления стекла и воздуха. Атмосферное давление принималось постоянным (760 мм.рт.ст.). В результате получены зависимости $S(T, I_0)$ и $s(dT) = S_0(1 + \gamma_s dT)$, которые приведены на рисунке 5.



Из графиков на рисунке 5 следует, что в рамках данной конструкции при понижении температуры фокальная плоскость становится ближе к последнему оптическому элементу, чем расстояние до источника излучения. Эта разница достигает 33 мкм при температуре -40°C . Это приводит к фокусировке излучения на некотором расстоянии, а затем к увеличению расходимости. При повышении температуры источник излучения становится ближе к оптическому элементу, чем фокальная плоскость. Это приводит к увеличению расходимости. Общая расстройка составляет 90 мкм.

Конструкция 2 (ОС2)

В качестве второго примера рассмотрим аналогичную оптическую систему 2 (ОС 2) с расстоянием $I = 186$ мм (рис. 6). Параметры всех оптических элементов остались

прежними. Основное отличие от ОС 1 состоит в изменении расположения двух линз путем удлинения инварового цилиндра и изменения точки крепления его к стальному цилиндру, в котором расположены линзы. Таким образом, линзы располагаются на цилиндрическом (стаканном) компенсаторе.

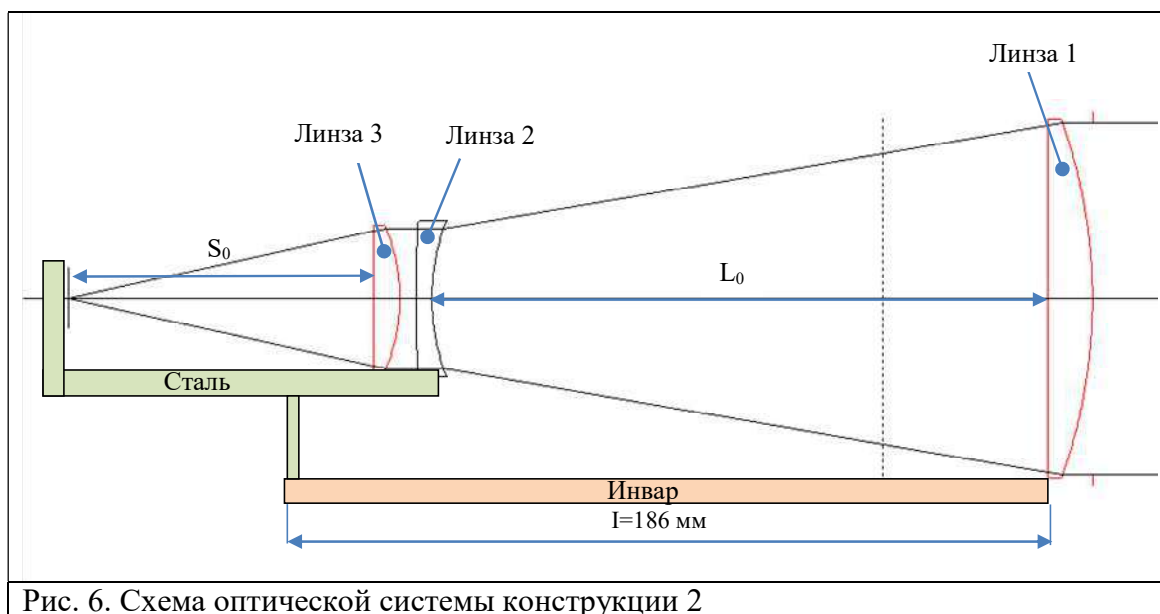


Рис. 6. Схема оптической системы конструкции 2

Приведем параметры оптической системы, показанной на рисунке 6.

Таблица 2

Параметры оптической системы конструкции 2

Обозначение	Материал	R – Радиус, мм	h – Толщина, мм	d – Зазор, мм
Линза 1	N-BK7	133,96		
h1		∞	10,3	
L_0	Инвар±сталь			153,66
Линза 2	N-BK7	-53,7		
h2		-328,5	4,0	
d2	сталь			4
Линза 3	N-BK7	46,13		
h3			6,6	
S_0	сталь			76,325
I_0	Инвар			186

Из рисунка 6 видно, что расстояние между задней поверхностью первой линзы и передней поверхностью второй линзы в зависимости от длины инварового кронштейна I и температуры можно определить следующим выражением:

$$L(dT, I) = I(1 + \gamma_i dT) - [L_0 - I(1 + \gamma_i dT)](1 + \gamma_s dT),$$

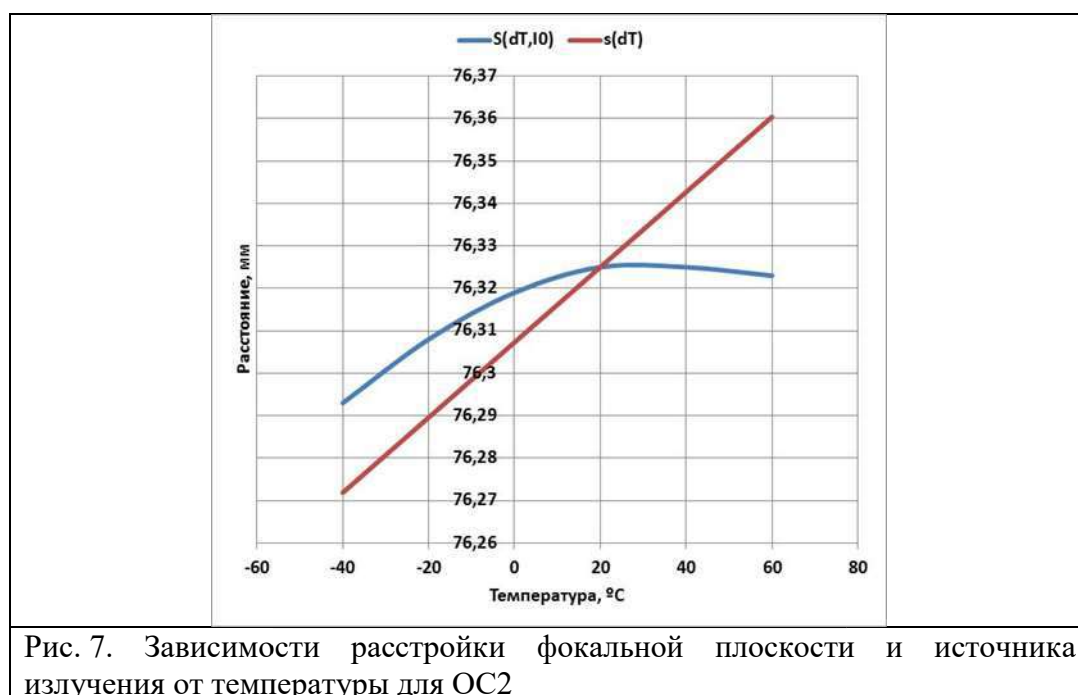
где γ_i – КТЛР инвара, γ_s – КТЛР стали, L_0 – расстояние между задней поверхностью первой линзы и передней поверхностью второй линзы при температуре настройки ($T_0=20^\circ\text{C}$).

КТЛР инвара составляет $1,0 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, КТЛР стали – $11,6 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Из приведенного соотношения следует, что динамика изменения расстояния между первыми линзами зависит от отношения длины инварового кронштейна I к расстоянию L_0 .

Если $I \gg L_0$, то при нагревании расстояние L будет уменьшаться, поскольку КТЛР инвара меньше КТЛР стали. При обратном соотношении L будет увеличиваться. Отметим, что расстояние между второй и третьей линзами полностью определяется термическим расширением стали.

На рисунке 7 приведены расчётные зависимости расстройки фокальной плоскости и источника излучения от температуры для ОС 1 при $I = 140$ мм и ОС2 при $I = 186$ мм.



Как видно из рисунка 7 диапазон расстройки ОС2 составляет около 33 мкм. При этом так же, как и в ранее рассмотренной оптической системе ОС1 отрицательные температуры приводят к фокусировке излучения на некоторой дистанции, а положительные — к увеличению расходимости излучения.

Оценка варианта термокомпенсации конструкции 2 показала, что введение цилиндрического (стаканного) компенсатора позволяет снизить диапазон расстройки [3] с 90 мкм до 33 мкм.

Сразу следует отметить характер изменения расстояния между первой и второй линзами. На рисунке 8 приведены зависимости изменения данного расстояния для длины инварового корпуса 186 мм (ОС2) и 140 мм (ОС1).

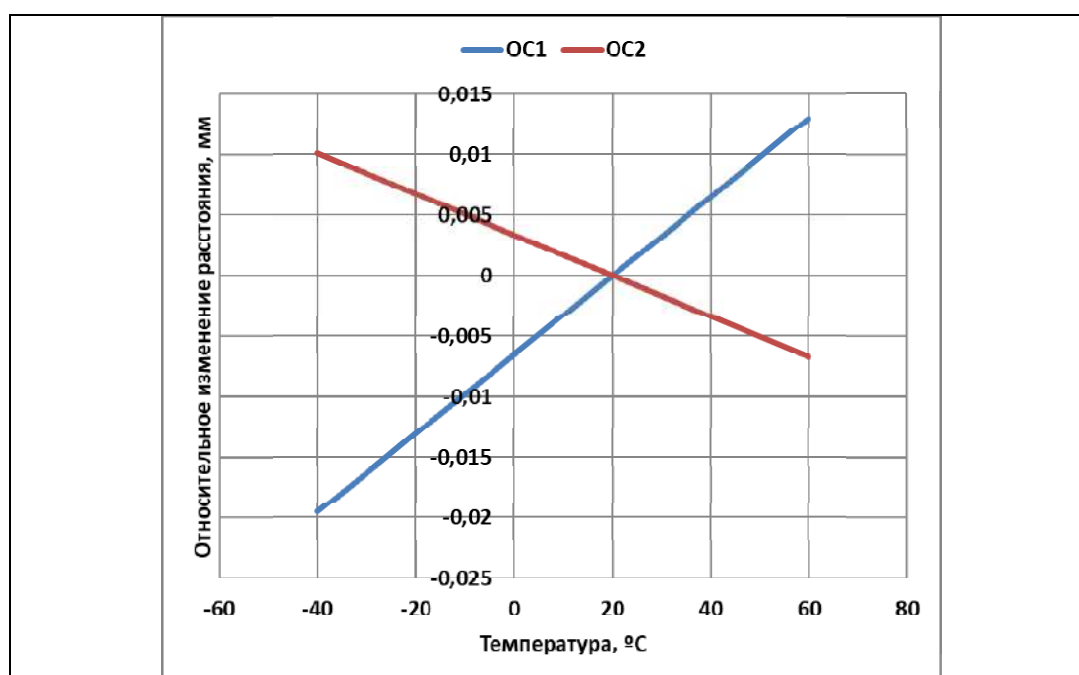


Рис. 8. Относительное изменение расстояния между первой и второй линзами от температуры для OC1 и OC2

Из графиков на рисунке 8 следует, что при использовании кронштейна из инвара длиной 140 мм (OC1) расстояние между линзами увеличивается с ростом температуры, а для 186 мм (OC2) – уменьшается. Это приводит к существенному различию динамики изменения заднего отрезка.

На рисунке 9 показано изменение бюджета линии от температуры для дистанций между приборами 1 и 10 км.

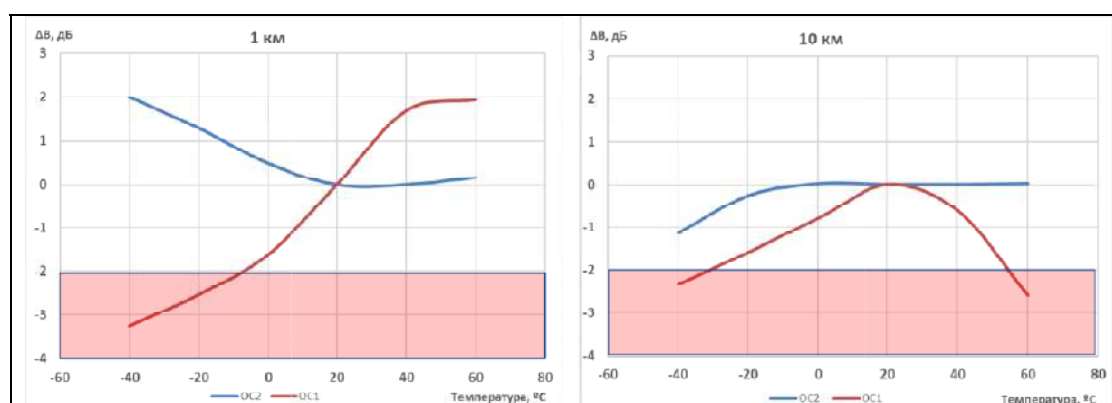


Рис. 9. Изменение бюджета линии от температуры для разных дистанций

Анализ результатов терморасстройки ОС показал, что при отрицательных температурах и дистанции 1 км бюджет линии с OC2 увеличивается. При отрицательных температурах бюджет линии с OC2 уменьшается более чем на 3 дБ. При работе на расстоянии 10 км бюджет линии с OC2 снизится на 3 дБ при как при отрицательных, так и при положительных температурах. Таким образом, расчёты показывают, что введение цилиндрического компенсатора в конструкцию OC2 делает её полностью атермальной по критерию 2 дБ.

Таким образом, методика оценки атермальности ОС, приведённая в данной работе, позволяет оценить влияние температуры на бюджет оптической линии связи. Приведённый способ анализа влияния температуры на параметры элементов оптической системы и её конструкции позволяет как оценить атермальность существующих конструкций систем беспроводной оптической связи, так и даёт возможность обоснованно выбрать механизм компенсации их терморасстройки.

Заключение

Таким образом можно сделать следующие выводы:

1. Предложенная методика оценки атермальности конструкции оптических систем лазерной связи позволяет учесть влияние температуры как на оптические параметры оптических элементов, так и на конструкцию ОС в целом.
2. Рассмотрены две конструкции оптических систем и показано их существенное различие с точки зрения воздействия температуры на запас бюджета лазерной линии связи.
3. Введение цилиндрического компенсатора в оптическую систему 1 позволило добиться её атермальности за счёт уменьшения диапазона расстройки с 90 мкм до 30 мкм, а также снизить диапазон потерь на дистанции 10 км с 2,5 дБ до 1 дБ.
4. Представленную методику можно эффективно применять для анализа влияния температуры на оптические системы.

Конфликт интересов

Авторы статьи заявляют, что у них нет конфликта интересов по материалам данной статьи с третьими лицами, на момент подачи статьи в редакцию журнала, и им ничего не известно о возможных конфликтах интересов в настоящем со стороны третьих лиц.

Список литературы

1. Бойко М. В. Гауссовы пучки и лазерные резонаторы // Новосибирск. 2004. 13 с.
2. Мостком. Стационарные терминалы [Электронный ресурс]. – 2022. URL: <http://www.mostkom.ru/ru/%d1%81%d1%82%d0%b0%d1%86%d0%b8%d0%be%d0%bd%d0%b0%d1%80%d0%bd%d1%8b%d0%b5-%d1%82%d0%b5%d1%80%d0%bc%d0%b8%d0%bd%d0%b0%d0%bb%d1%8b/> (Дата обращения 30.06.2022).
3. Гринкевич А. В, Медведев А. В., Князева С. Н. Атермализация объективов прицельно-наблюдательных комплексов как средство обеспечения жизнедеятельности объектов БТВТ / Фотоника №2/56/2016. С. 94–108.

Design of athermal optical systems for wireless laser communication

Baskakova A. V., Kuznetsov S. N., Shiobakin S. E.

JSC "Mostcom", Ryazan, Uritskogo, 35

The capabilities of the free-space optics (FSO) equipment are determined by the quality of the optical system and the stability of its parameters under the influence of external factors, the most

important of which is temperature. The paper presents a method for assessing the thermal stability of optical systems, which allows to assess the effect of temperature on the optical communication line margin.

Key words: free-space optics communication, optical system, athermality, margin.

ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ

doi: 10.51639/2713-0568_2022_2_3_20

УДК 543.424

ГРНТИ 29.31.27

ВАК 01.04.05

Рамановская спектроскопия для оценки твёрдых тканей зубов при лечении пародонтита

¹ Ионов А. Ю., ¹ Фролов О. О., ¹ Тимченко П. Е., ² Бажутова И. В., ¹ Тимченко Е. В.

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика
С. П. Королёва, 443086, Самара, Россия

² Самарский государственный медицинский университет, биотехнологический центр
«БиоТех», 443099, Самара, Россия

e-mail: artem.ionov.96@mail.ru, frolovaleh@gmail.com, timpavel@mail.ru, docba@mail.ru,
* laser-optics.timchenko@mail.ru

В данной работе представлены результаты исследований эмали и цемента зубов при пародонтите до и после кюретажа. В качестве метода оценки влияния кюретажа на твёрдые ткани зубов был использован метод спектроскопии комбинационного рассеяния. В результате проведённых исследований проведён спектральный анализ цемента и эмали зубов при пародонтите до и после лечения, были выявлены спектральные изменения в составе эмали и цемента зубов, которые связаны с изменением минерального состава и образованием органического матрикса.

Ключевые слова: Рамановская спектроскопия, спектроскопия комбинационного рассеяния, кюретаж, пародонтит.

Введение

Пародонтит — заболевание воспалительного характера, сопровождающееся деструктивным разрушением всех тканей пародонта. Клинические проявления пародонтита весьма разнообразны и зависят от тяжести течения и распространенности патологического процесса [1]. Кюретаж является одним из методов лечения данного заболевания. Целью кюретажа является удаление из периодонтального кармана грануляций, вегетирующего эпителия, зубного камня, пораженного цемента [2].

В настоящее время в литературе, нет однозначной информации о том, какое влияние оказывает операция кюретажа на ткани зубов.

Существует множество оптических методов оценки состояния зубов при пародонтите, такие как, ортопантомография, рентгенография, трёхмерная компьютерная томография и другие [3–6]. Тем не менее, данные методы не позволяют оценить состав и изменения структуры зубов после операции кюретажа, чтобы дополнительно можно было назначить лечение и восстановительную терапию для получения наилучшего результата.

Данную задачу можно решить с помощью метода спектроскопии комбинационного рассеяния, который получил широкое распространение в медицине [7–10]. Данный метод позволяет проводить оценку относительного состава биообъектов.

В работе [9] используется метод спектроскопии комбинационного рассеяния для оценки степени минерализации твёрдых тканей зубов.

В ранее опубликованной нашей работе [10] приведены результаты спектральных исследований тканей зубов при пародонтите. Введены критерии ранней диагностики данного заболевания.

Целью работы являлось применение метода спектроскопии комбинационного рассеяния для оценки твердых тканей зубов при пародонтите до и после лечения.

Первый раздел: материалы и методы

В качестве объектов исследований были использованы зубы, удалённые в связи с хроническим пародонтитом. Диагноз пародонтит ставился клинически и при анализе компьютерной конусно-лучевой томографии (КТ) (код заболевания по МКБ-10 (1997 г.) - K05.3). Выделены две основные группы образцов: первая группа – удалённые зубы пациентов до операции кюретажа; вторая группа – удалённые зубы тех же пациентов после проведения операции кюретажа. Была исследована эмаль и цемент исследуемых групп зубов.

Метод спектроскопии КР был реализован с помощью экспериментального стенда, состоящего из рамановского пробника RPB-785, совмещенного с лазерным модулем LuxxMasterLML-785.0RB-04 (мощность до 500 мВт, длина волны $784,7 \pm 0,05$ нм) и высокоразрешающего цифрового спектрометра Shamrocksr-303i, обеспечивающего спектральное разрешение 0,15 нм, со встроенной охлаждаемой камерой DV420A-OE [11]. Детальный анализ спектров КР осуществлялся в программной среде MagicPlotPro, а также с помощью метода дискриминантного анализа (LDA) в программе IBMSPSSStatistics [12].

Второй раздел: результаты исследований

На рисунке 1 приведены усредненные спектры КР цемента и эмали зубов при пародонтите до и после кюретажа.

Из рисунка видно, что для цемента зубов характерны изменения на линиях ~ 956 см⁻¹, соответствующих гидроксипатиту и ~ 1070 см⁻¹, соответствующая С-О плоскостному валентному колебанию карбонат-иона гидроксипатита CO₃²⁻(v1), так же происходят изменения на линиях ~ 1259 см⁻¹ (AmidIII), ~ 1570 см⁻¹ (амид II Parallel/Antiparallel β -sheestructure) и ~ 1745 см⁻¹ по сравнению с группой до проведения кюретажа. Спектральные изменения цемента зубов, после кюретажа, обусловлены восстановлением минеральных компонентов в тканях и образованием нового цемента за счёт удаления зубного камня и процессов реминерализации.

В то время для эмали зубов характерны спектральные изменения, связанные с изменением относительной интенсивности линий 956 см⁻¹ (ν_1 P–Osymmetricstretch (PO₄³⁻) и 1070 см⁻¹ (C–Oinplanestretch (CO₂³v1)). Данные линии связаны с изменением минерального состава. Также наблюдаются изменения интенсивности линий на 1449 см⁻¹ (Lipidsandproteins), 1036 см⁻¹ (phenylalanine (collagenassignment)), 854 см⁻¹ (Hydroxyprolinev(C–C) stretch), связанные с образованием органического матрикса.

Спектральные изменения, связанные с изменением минеральных компонент после проведения операции кюретажа связаны с тем, что в процессе кюретажа удаляется зубной камень соответственно, что приводит к уменьшению минерализации эмали.

Спектральные изменения, связанные с изменением органического состава, видимо, обусловлены восстановлением коллагена после данной операции.

Для повышения информативности полученных спектров КР был произведён нелинейный регрессионный анализ спектров, состоящий в их разложении на спектральные линии. На рисунке 2 представлен результат разложения спектрального контура на сумму распределений линий Гаусса

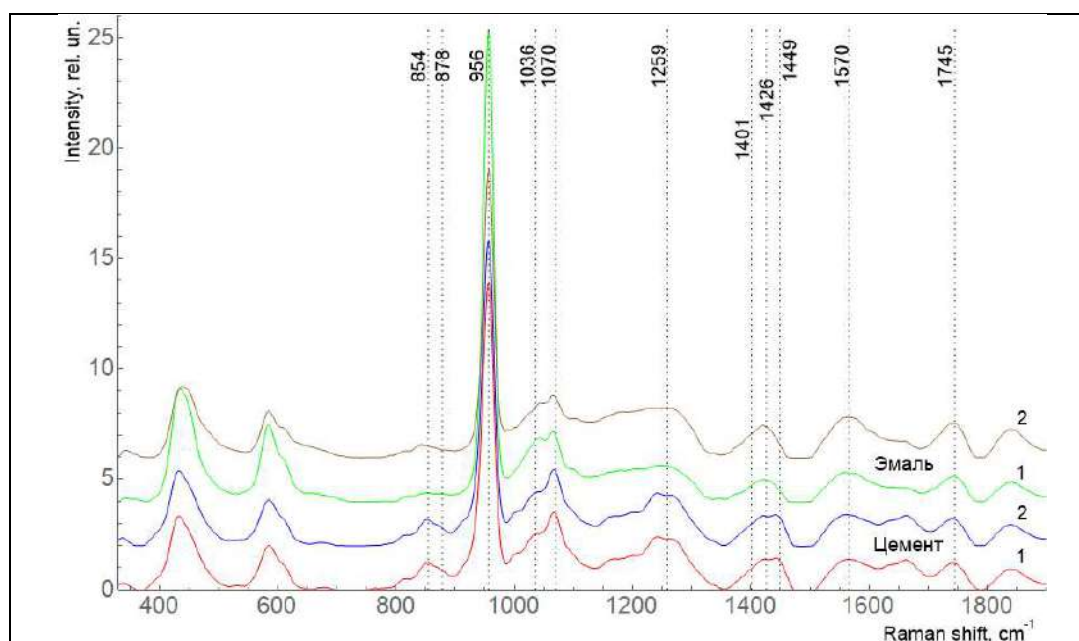


Рис. 1. Сравнение спектров эмали и цемента зубов при пародонтите до и после лечения: 1 – до кюретажа; 2– после кюретажа

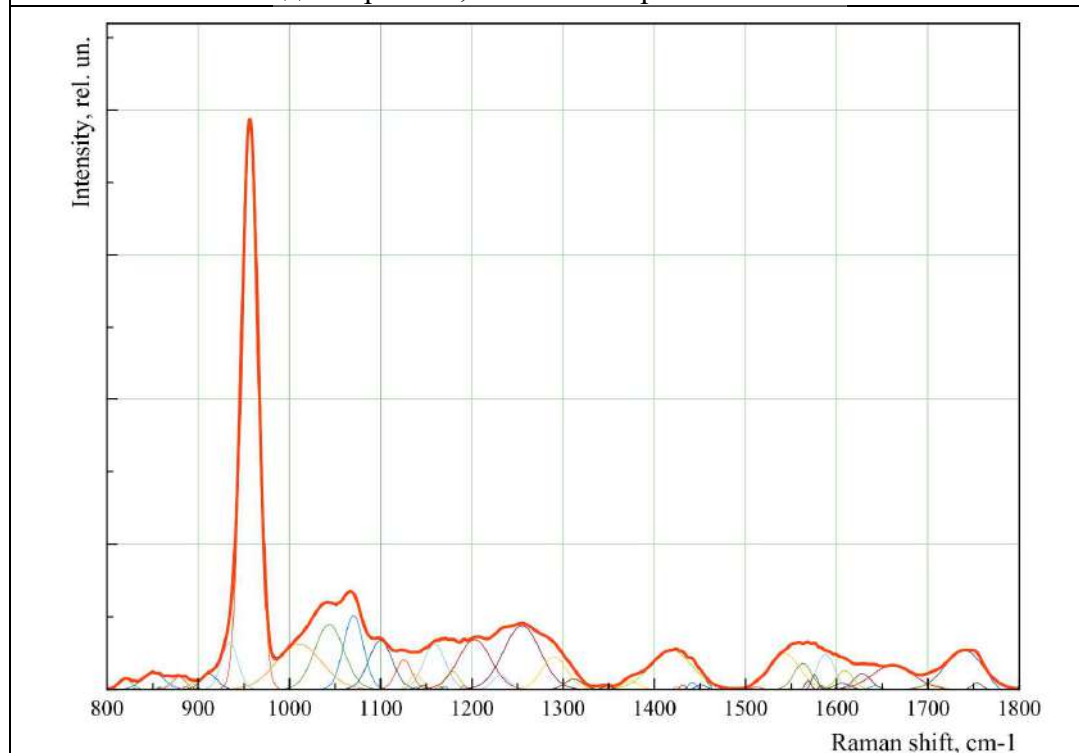


Рис. 2. Разложение спектрального контура для образцов эмали

Среднее значение коэффициента детерминации результирующего спектра от исходного в области $800...1780\text{ см}^{-1}$ составило $R^2 = 0,999$, относительная погрешность определения интенсивности спектральных линий а не превышает 5 %, усреднённое стандартное отклонение координаты линии x_0 составляет $0,1\text{ см}^{-1}$, усредненное стандартное отклонение ширины линии (HWHM) Гаусса dx составило $1,8\text{ см}^{-1}$.

Для относительной количественной оценки компонентного состава гидроксиапатита использовались абсолютные значения интенсивностей линий КР нормированных спектров.

Для дальнейшего анализа полученных после разделения спектральных линий исследуемых объектов был выбран метод линейного дискриминантного анализа в программной среде IBMSPSSStatistics.

На рисунке 3 представлены результаты LDA сравнения двух групп образцов эмали зубов. Проанализированы 30 спектров эмали. Дискриминантная функция LD-1 описывает дисперсию на 100 %. Положительные значения LD-1 характерны для спектров КР, полученных из эмали до кюретажа. Области групп не имеют пересечений.

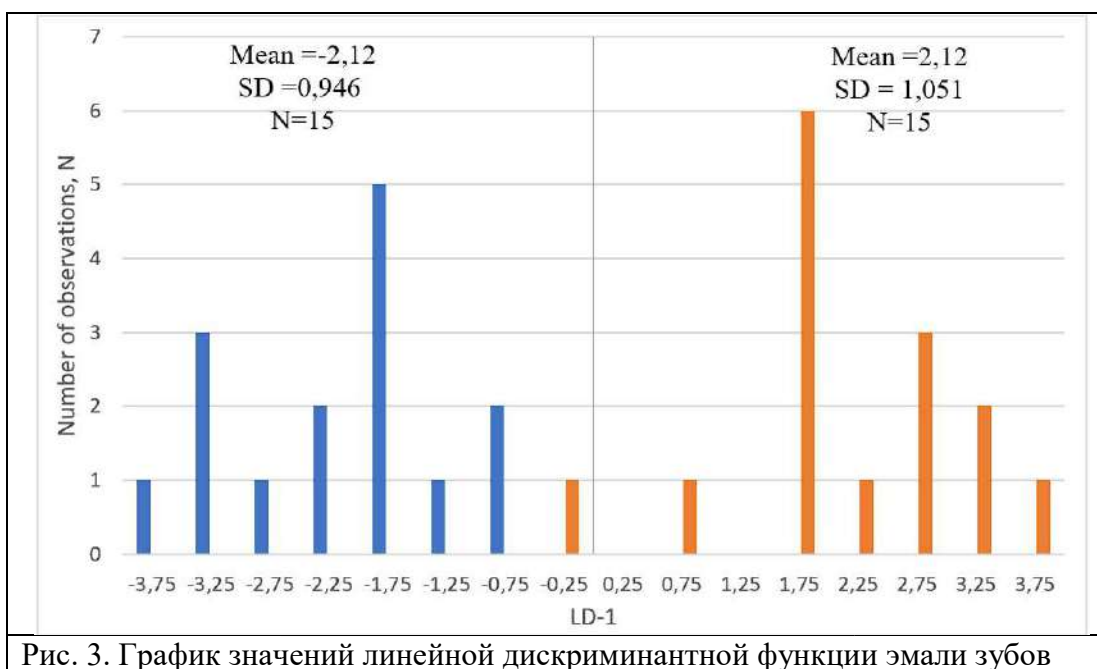


Рис. 3. График значений линейной дискриминантной функции эмали зубов

На рисунке 4 представлены результаты LDA сравнения двух групп образцов цемента зубов. Проанализировано 63 спектра цемента зубов. Положительные значения LD-1 характеризуют спектры комбинационного рассеяния цемента до лечения. Площади групп имеют небольшие пересечения. Дискриминантная функция LD-1 описывает дисперсию на 100 %.

На рисунке 5 показаны значения релевантных коэффициентов матрицы факторной структуры, имеющие физический смысл корреляции между переменными в модели и дискриминирующей функцией. Чем выше по модулю значение LD-1 для переменной, тем в большей степени она определяет разницу в дискриминационной модели между группами образцов.

Дискриминационная адекватность метода характеризуется значением $AUC = 1$, что свидетельствует об отличном качестве диагностического инструмента. Стандартная ошибка SE составила 0 %. Оптимальная точка отсечения для представленного алгоритма, определенная согласно условию баланса между чувствительностью и специфичностью,

соответствовала 0,824. Показатели чувствительности и специфичности диагностической модели в данной точке отсечения составили 100 %.

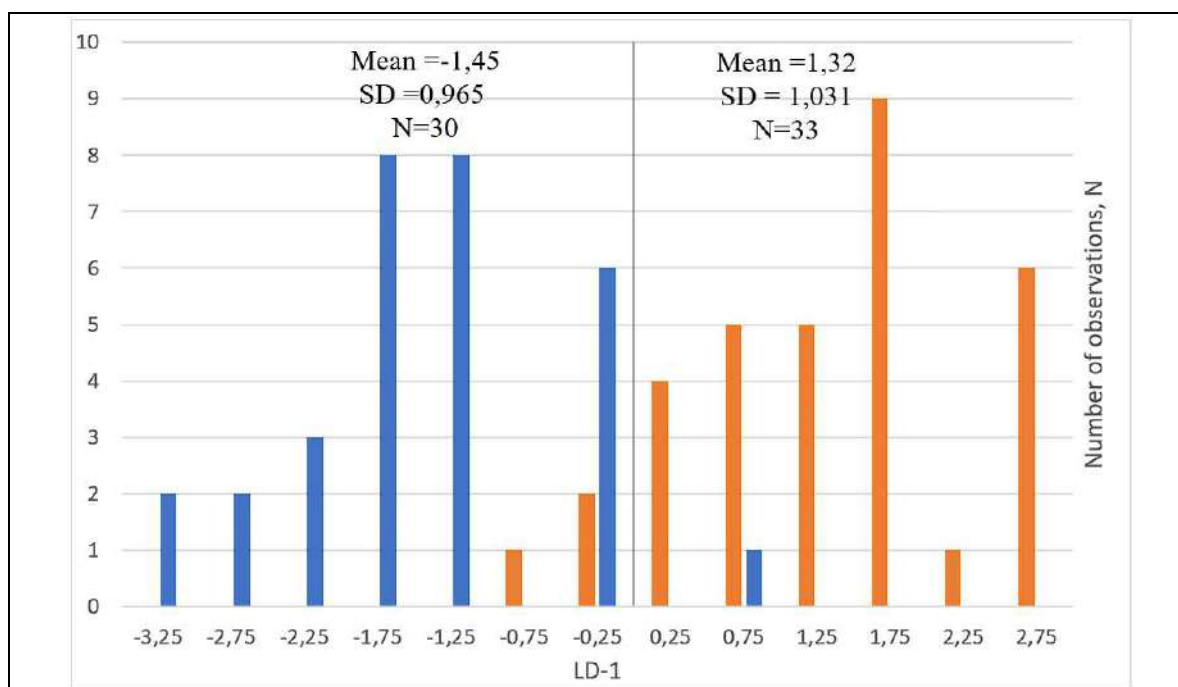


Рис. 4. График значений линейной дискриминантной функции цемента зубов

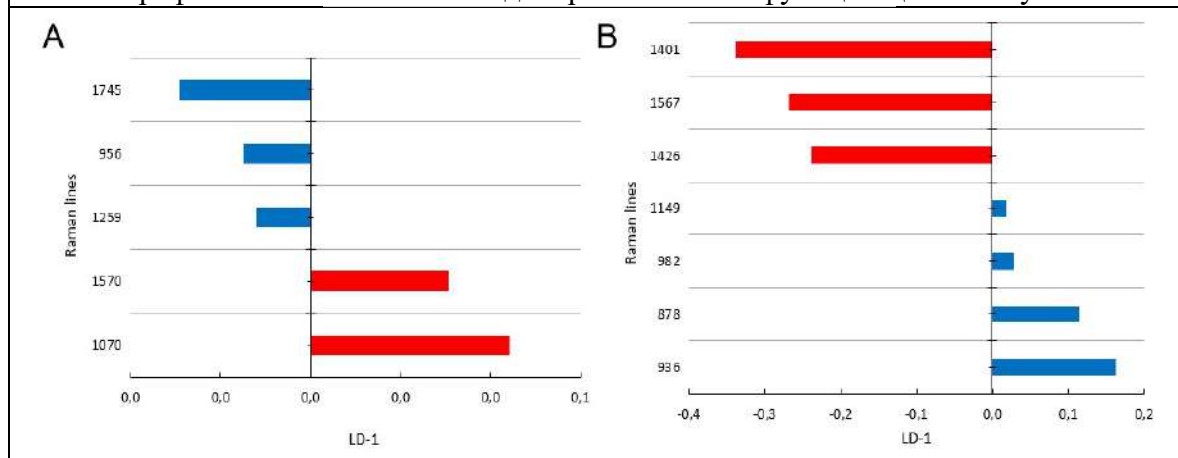


Рис. 5. Значения коэффициентов факторной структуры: А) цемент зубов; В) эмаль зубов

Заключение

В результате исследований проведен хеометрический анализ спектров комбинационного рассеяния эмали и цемента зубов до и после кюретажа. Были выявлены спектральные изменения. Установлено, что после проведения операции открытого кюретажа, в эмали зубов происходят спектральные изменения, связанные с изменением относительной интенсивности линий 957 см^{-1} (ν_1 P–Osymmetricstretch (PO_4^{3-})) и 1070 см^{-1} (C–Oinplanestretch ($\text{CO}_2^3\nu_1$)). Данные линии связаны с изменением минерального состава. Также наблюдаются изменения интенсивности линий на 1449 см^{-1} (Lipidsandproteins), 1036 см^{-1} (phenylalanine (collagenassignment)), 854 см^{-1} (Hydroxyproline(C–C) stretch), связанные с образованием органического матрикса. Спектральные изменения в цементе

зубов (усиление интенсивности на линиях $\sim 956 \text{ см}^{-1}$, соответствующих гидроксиапатиту и $\sim 1070 \text{ см}^{-1}$, соответствующая С-О плоскостному валентному колебанию карбонат-иона гидроксиапатита $\text{CO}_3^{2-}(\text{v}_1)$, так же происходят изменения на линиях $\sim 1259 \text{ см}^{-1}$ (AmidIII), $\sim 1570 \text{ см}^{-1}$ ((амидII Parallel/Antiparallel β -sheet structure) и $\sim 1745 \text{ см}^{-1}$) по сравнению с группой до проведения данной манипуляции. Спектральные изменения цемента зубов, после данных манипуляций, обусловлены восстановлением минеральных компонентов в тканях и образованием нового цемента за счёт удаления зубного камня и процессов реминерализации.

Данные спектральные изменения показывают восстановление тканей эмали зубов после данной операции.

Метод спектроскопии комбинационного рассеяния может быть в дальнейшем применён для оценки тканей зубов после кюретажа.

Конфликт интересов

Авторы статьи заявляют, что у них нет конфликта интересов по материалам данной статьи с третьими лицами, на момент подачи статьи в редакцию журнала, и им ничего не известно о возможных конфликтах интересов в настоящем со стороны третьих лиц.

Список литературы

1. Заболевания пародонта /под общей редакцией профессора Ореховой Л. Ю. М.: Поли Медиа Пресс, 2004. 432 с.
2. Велитченко А. Н. Заболевания периодонта: периодонтальная хирургия//Учебно-методическое пособие, Минск: БГМУ, 2021. 28 с.
3. Терапевтическая стоматология: учебник: в 3 ч. // Болезни пародонта. Ч. 2 / под ред. Барера Г. М. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2008. 224 с.
4. Мкртычев О. В. и др. Лазерная абляция нанокомпозитов // Научно-техн. Ведомости СПбПУ Физ.-Мат. науки 2015, № 1 (213) С. 128–135.
5. Привалов В. Е., Шеманин В. Г. Лидарное уравнение с учётом конечной ширины лазерной линии // Известия РАН. Серия Физическая. 2015. Т. 79. № 2. С. 170–180.
6. Привалов В. Е., Шеманин В. Г. Эксперимент. зондирование промыш. аэродисперс. потоков. // Научно-техн. Ведомости СПб Политех. Универ. Физ.-Мат. Науки. 2014, № 4 (206). С. 64–73.
7. Самонова А. Ю. и др. Метод спектроскопии комбинационного рассеяния в биохимии и медицине //Актуальные исследования в области биологии и смежных наук. 2018. С. 157–163.
8. Косынкина Д. Д. и др. Гемический компонент гипоксии в патогенезе хронического пародонтита // Актуальные проблемы биомедицины. 2020. С. 100–101.
9. Киселева Д. В. И др. Сравнительная оценка степени минерализации твердых тканей зубов методом рамановской спектроскопии //Труды Института геологии и геохимии им. академика А. Н. Заварицкого. 2015. № 162. С. 242–246.
10. Timchenko E, Timchenko P, Volova L, Frolov O, Zibin M, Bazhutova I. Raman Spectroscopy of Changes in the Tissues of Teeth with Periodontitis. Diagnostics// Diagnostics 2020 – 10 - 876 doi:10.3390.
11. Тимченко Е. В. и др. Оптические методы ранней экспресс-диагностики пародонтита// Международная конференция IEEE по электротехнике и фотонике (EEEPolytech). 2019 г. с. 298–300.

12. Тимченко П. Е., Тимченко Е. В., Волова Л. Т. и др. Спектральный анализ органических компонентов деминерализованных костных биотрансплантатов // Опц. Спектроск. 2019. 126, с. 769–775.

Raman spectroscopy for evaluation of dental hard tissues in periodontitis treatment

¹ Ionov A. Y., ¹ Frolov O. O., ¹ Timchenko P. E., ² Bazhutova I. V., ¹ Timchenko E. V.

¹ *Samara National Research University named after Academician S. P. Korolev
443086, Samara, Russia 1*

² *Samara State Medical University, BioTech Biotechnology Centre, 443099, Samara, Russia 2*

This paper presents the results of studies of tooth enamel and cementum in periodontitis before and after curettage. Raman spectroscopy was used as a method to assess the effect of curettage on dental hard tissues. Spectral analysis of the cementum and tooth enamel in periodontitis before and after treatment was carried out, spectral changes in the enamel and tooth cementum composition that were associated with changes in the mineral composition and the formation of the organic matrix were revealed.

Key words: Raman spectroscopy, Raman spectroscopy, curettage, periodontitis.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

doi: 10.51639/2713-0568_2022_2_3_27

УДК 535.8

ГРНТИ 47.35.31

ВАК 01.04.21

Прогнозирование оптической прочности полимерных покрытий при их лазерной абляционной деструкции

¹ Воронина Э. И., ¹ Чартий П. В., ^{1,2*} Шеманин В. Г.

¹ Новороссийский политехнический институт (филиал) Кубанского государственного технологического университета, 353900, Россия, Новороссийск, ул. К. Маркса, 12,

² Филиал БГТУ им. В. Г. Шухова в г. Новороссийске 353919, Россия, Новороссийск, Мысхаковское шоссе 75,

e-mail: * vshemanin@mail.ru

Исследование лазерной абляционной деструкции полимерных покрытий при мощном энерговыделении на мишени представляет интерес для разработки методов оценки и прогнозирования надежности или лучевой прочности этих покрытий. Предложена методика для оценки и прогнозирования надежности этих покрытий на основе статистической модели процесса деструкции и экспериментальных измерений значений пороговой плотности энергии этой деструкции. Полученные результаты позволяют прогнозировать надежность любого полимерного образца в зависимости от характера лазерного облучения без проведения большого объема экспериментальных измерений.

Ключевые слова: лазерная абляционная деструкция, полимерные покрытия, мишень, надежность или лучевая прочность, статистическая модель, пороговая плотность энергии.

Введение

Широкое использование полимерных материалов в качестве отражающих покрытий требует исследования механизма и параметров лазерной абляционной деструкции полимерного материала в диапазоне импульсной плотности энергии до 100 Дж/см^2 [1, 2]. В настоящее время зависимости скорости такого разрушения от параметров лазерного импульса и физических характеристик материала в широких диапазонах их изменения определяются на основании численных расчетов, использующих различные физико-математические модели взаимодействия лазерного импульса с веществом. Лазерная абляция (испарение) образцов наносекундными и микросекундными импульсами с плотностью энергии более 1 Дж/см^2 сопровождается образованием низкотемпературной плазмы (характерная температура порядка 10^4 К), в которой может поглощаться значительная часть энергии лазерного импульса [1, 3, 4], что влияет как на эффективность абляционного разрушения, так и параметры лазерного факела. При этом характеристики, определяющие оптическую толщину плазмы факела, – концентрация электронов, температура и размер плазменного облака – значительно изменяются в течение лазерного импульса, и это делает описание динамики поглощения лазерного излучения очень

сложной задачей. В работе [4] предложена модель лазерной абляции, позволяющая оценить поглощение излучения в нагревающейся плазме, на основе предположения о том, что увеличение поглощения вследствие нагревания плазмы определяется плотностью поглощенной энергии лазерного излучения F_a . Дальнейшее развитие теории распространения в твердом веществе ударной волны и абляционного разрушения материала при воздействии лазерного импульса сделано авторами [1] для диапазона изменения интенсивности, соответствующего гидродинамическому режиму абляции ($10^8 \dots 10^{14}$ Вт/см²). Причём в этой работе [1] под эффективностью абляционного разрушения вещества мишени подразумевается доля поглощённой лазерной энергии, которая в момент окончания лазерного импульса, содержится в веществе мишени и распространяется вглубь него ударной волной. Разрушение мишени под действием такой ударной волны, затухающей в веществе после окончания лазерного импульса обоснована в [3]. А в работе [1] получены аналитические зависимости глубины и времени абляционного разрушения материала от параметров лазерного импульса и физических констант материала. Однако экспериментальные измерения пороговых характеристик лазерной абляционной деструкции для различных твёрдых мишеней, полученные в ряде работ [5], часто противоречивы, а для исследуемых полимерных мишеней отсутствуют.

Экспериментальная лабораторная лазерная абляционная станция

Для экспериментального исследования зависимости надежности лазерной абляционной деструкции были выполнены соответствующие измерения пороговых значений плотности энергии при заданных значениях энергии падающего лазерного излучения и условиях фокусировки (размерный эффект) при деструкции мишеней из эпоксидного компаунда (ЭКС), полиметилметакрилата (ПММА) и стиросила. Наличие пробоя при лазерной абляции регистрировалось, как и ранее в [6] по измерению собственного свечения факела лазерной плазмы или появлению импульса давления на свободной поверхности мишени.

Для решения этой задачи была разработана и изготовлена лабораторная лазерная абляционная станция, далее Станция, которая была собрана на базе экспериментальной установки из [7–11]. В этой Станции излучение двух YAG: Nd лазеров с импульсами длительностью 10 нс и 100 мкс и энергиями до 0,3 и 1,2 Дж на длине волны 1064 нм фокусировалось специальным объективом на поверхность полимерной мишени. Изменение плотности энергии лазерного импульса в диапазоне от 0,1 до 100 Дж/см² достигалось как выбором фокусного расстояния объектива, так и ослаблением калиброванными нейтральными светофильтрами НС. Часть лазерного излучения лазера на длине волны 1064 нм через ИК светофильтр направлялась на фотодиод типа ФД-24К для контроля энергии лазерного импульса и синхронизации работы установки [4]. Интенсивность собственного свечения плазмы регистрировалась фотоумножителем типа ФЭУ-79 через световод и интерференционный светофильтр с максимумом на длине волны 532 нм [7–9, 11]. Импульс давления на свободной поверхности образца измерялся пьезодатчиком на основе ЦТС-керамики. Сигналы со всех измерительных каналов регистрировались через специальный контроллер [7, 8, 10] вводились в ПК. Сигналы с фотодиода использовались для запуска и синхронизации работы Станции.

На первом этапе, как это подробно описано в [8, 11], были выполнены калибровочные эксперименты для всех фотоприёмных модулей двух типов – на основе фотодиода и ФЭУ-79. Эти результаты дали возможность получать из амплитуды импульса с фотоприемника значение энергии лазерного импульса E и вычислить плотность энергии $F = E/S_F$, где S_F – площадь фокального пятна фокусирующего объектива. В дальнейших экспериментах плотность энергии в лазерном импульсе рассчитывалась как произведение пропускания

светофильтра НС на длине волны 1064 нм и максимального значения F для данной выборки измерений. Чтобы генерировать кривую вероятности лазерной абляционной деструкции необходимо сделать не менее 20 выстрелов при заданной энергии импульса и измерить число событий лазерной абляционной деструкции. Устанавливая новое значение плотности энергии и повторяя предыдущий процесс измерений, последовательно проходили весь диапазон значений вероятности лазерной абляции от 0 до 1,0. Если кривая вероятности лазерной абляционной деструкции от плотности энергии на графике не получается гладкой, то это означает, что недостаточно измеренных данных или значения плотности энергии статистически неразличимы из-за недостаточной точности измерений. Правильная интерпретация этой кривой вероятности лазерной абляционной деструкции важна для точного определения пороговых характеристик лазерной абляционной деструкции полимерных образцов. Эти экспериментально измеренные пороговые значения плотности энергии при вероятности 0,5 и служат для построения кривых динамики надежности.

Результаты экспериментов

На этой Станции были выполнены экспериментальные исследования зависимости вероятности лазерной абляции от плотности энергии лазерного импульса длительностью 10 нс для плоских образцов из ЭКС, ПММА и стиросила. На первом этапе были сделаны калибровочные эксперименты на мишени из ПММА и разработана процедура измерения пороговой плотности энергии на длине волны 1064 нм при наличии лазерного плазмообразования, сопровождающего лазерную абляционную деструкцию. Процедура включала точное позиционирование и перемещение полимерной мишени относительно оси лазерного луча, точную фокусировку лазерного излучения и изменение энергии импульса нейтральными светофильтрами. Наличие лазерной абляции регистрировалось по появлению свечения лазерной плазмы как и ранее в [5, 7, 8, 11, 12] и импульсу давления на свободной поверхности мишени. Полученная оптимальная геометрия облучения образца использовалась во всех дальнейших экспериментах. Зависимости вероятности пробоя P от плотности энергии лазерного импульса F были получены для всех четырёх образцов. Из-за стохастического характера лазерной абляционной деструкции каждая точка кривой определялась как отношение числа выстрелов с наличием пробоя и свечением плазмы к общему числу выстрелов. Для каждого значения плотности энергии были сделаны не менее 20 выстрелов, причем каждый раз в новую точку на поверхности мишени. Пороговые плотности энергии F_T были получены из этих зависимостей для условия равенства вероятности пробоя $P = 0,5$ в соответствии с ранними работами [5, 12] для длительности лазерных импульсов 10 нс. Эти пороговые значения для всех полимерных мишеней собраны в таблице 1. Далее, как и в работах [4, 7, 8], были выполнены экспериментальные исследования зависимости порогового уровня лазерной абляционной деструкции при облучении поверхности мишени лазерными импульсами длительностью 100 мкс для образцов из ЭКС, ПММА и стиросила. Полученные значения пороговых плотностей энергии лазерной абляционной деструкции также представлены в таблице 1. Надо отметить, что для такой длительности лазерного импульса получена чёткая 100 % граница наличия пробоя, что подтверждается данными [13].

Полученные результаты находятся в хорошем качественном соответствии с результатами [5, 7, 12] и результатами численного моделирования в [14].

Таким образом, выполненные эксперименты позволили получить значения пороговых плотностей энергии лазерной абляционной деструкции для длительности лазерных импульсов 10 нс и 100 мкс для трех исследованных образцов. Полученные результаты

могут стать основой для новых методов измерения пороговой плотности энергии лазерной абляционной деструкции для любых полимерных образцов или как в работе [15] для оптических кристаллов и оценку самих параметров, характеризующих механизм лазерной абляционной деструкции. Эти данные являются физическими константами для полимерных покрытий.

Таблица 1

Значения пороговых плотностей энергии лазерной абляционной деструкции
 для образцов из ЭКС, ПММА и стиросила.

Образец	Пороговая плотность энергии Q_T , Дж/см ² для 10 нс и $P=0,5$	Пороговая плотность энергии Q_T , Дж/см ² для 100 мкс
ПММА	14,5	22,9 (20,8*)
Стиросил	20,0	16,8
ЭКС	21,5	17,9

* – значение взято из [5]

Прогнозирование надежности полимерных покрытий при их лазерной абляционной деструкции

Статистический подход, развитый в [6, 12], для исследования лазерной абляционной деструкции полимерных покрытий позволяет построить кривую надежности лазерной абляционной деструкции в серии измерений вероятности пробоя для различных значений импульсной плотности энергии в одноимпульсном режиме облучения каждый раз новой точки поверхности [6]. Тогда вероятность лазерной абляционной деструкции определяется дефектами на поверхности или в объеме образца и поэтому вероятность лазерной абляционной деструкции может быть описана показательной функцией [6] в виде $P = 1 - \exp[-C(F)A]$, где $C(F)$ – концентрация дефектов, и A – площадь области, подвергнутой воздействию лазерного излучения с плотностью энергии F . Зная площадь воздействия луча лазера при лазерной абляционной деструкции, можно определить концентрацию дефектов и затем вычислять вероятности лазерной абляционной деструкции для фактического значения плотности энергии луча, используемого в лазерной системе.

Статистическая обработка результатов измерений согласно описанной в [12] процедуре позволили получить зависимость логарифма концентрации дефектов в мишени от логарифма плотности энергии лазерного импульса в предположении m – степенной функции этой зависимости согласно статистике Вейбулла [16, 17]. Линейный график такой зависимости дает значение m для концентрации дефектов в зависимости от плотности энергии в выражении (1). Распределение дефектов по поверхности в образце и является причиной лазерной абляционной деструкции материала образца, которое начинается с плазмообразования в точке фокусировки лазерного излучения. Для исследованных полимерных образцов этот показатель степени изменяется в диапазоне 6,5...7,2 в хорошем соответствии с данными [12].

Данные по пороговым характеристикам лазерной абляционной деструкции будут проанализированы с использованием статистики Вейбулла и используя этот подход и представления, развитые в [6] надежность полимерного покрытия при N лазерных импульсов в разных точках мишени будет равна

$$Q = \{\exp[-\ln 2(F / F_{0,5})^m]\}^{N/f} \quad (1)$$

Параметры $F_{0,5}$ и m определяются из экспериментов, а частота следования лазерных импульсов f задаётся условиями эксперимента. Полученная зависимость (1) позволяет прогнозировать надёжность полимерной мишени в течение времени t , в течение которого производится её облучение с частотой лазерных импульсов f .

В работах [6–8, 11, 13] были выполнены экспериментальные исследования зависимости порогового уровня плотности энергии лазерной абляционной деструкции при облучении поверхности мишени лазерными импульсами длительностью 10 нс и 100 мкс для полимерных образцов из ПММА, ЭКС и стиросила. На основании полученных экспериментальных данных и зависимости (1) для надёжности образца были выполнены расчёты и получены зависимости надёжности различных образцов Q от продолжительности облучения t и от плотности энергии облучения F при частоте следования лазерных импульсов f , равной 1 Гц. Полученные зависимости позволяют оценивать надёжность образца Q при плотности энергии лазерного облучения F меньше порогового уровня. Эти результаты представлены в виде графика зависимости $Q = f(t)$ для этих полимерных образцов в зависимости от плотности энергии облучения F на рис. 1 в качестве примера.

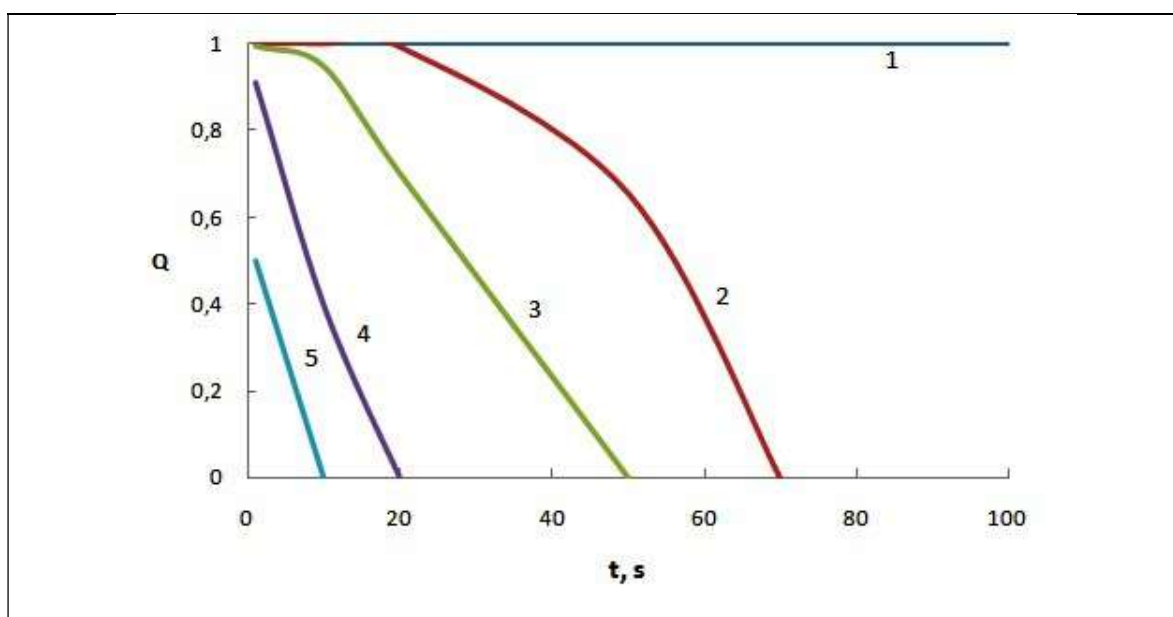


Рис. 1. Графики временной зависимости надёжности Q для значений отношения F/F_T равного 0.1 (1), 0.25 (2), 0.5 (3), 0.75 (4) и 1.0 (5)

По графикам можно прогнозировать надёжность полимерного образца в зависимости от характера лазерного облучения без проведения большого объёма экспериментальных измерений [1].

Полученные результаты позволяют прогнозировать надёжность любого полимерного образца в зависимости от характера лазерного облучения и определять время жизни образца, как время спада кривой в e раз. Кроме того, эти результаты могут стать основой для новых методов измерения пороговой плотности энергии лазерной абляционной деструкции для любых полимерных образцов, которые являются физическими константами для полимерных материалов [1, 4].

Заключение

На основании физической модели лазерной абляционной деструкции, описываемой законом распределения Вейбулла [16, 17], получена функциональная зависимость надежности полимерной мишени при её многократном лазерном облучении от плотности энергии и продолжительности, позволяющая прогнозировать надёжность образцов по известному пороговому значению плотности энергии лазерной абляционной деструкции полимерных покрытий, на основе которой разработана методика для оценки и прогнозирования надёжности этих покрытий. Полученные результаты позволяют прогнозировать надёжность любого полимерного образца в зависимости от характера лазерного облучения без проведения большого объёма экспериментальных измерений. Кроме того, эти результаты могут стать основой для новых методов измерения пороговой плотности энергии лазерной абляционной деструкции для любых полимерных образцов, которые являются для них физическими константами.

Конфликт интересов

Авторы статьи заявляют, что у них нет конфликта интересов по материалам данной статьи с третьими лицами, на момент подачи статьи в редакцию журнала, и им ничего не известно о возможных конфликтах интересов в настоящем со стороны третьих лиц.

Список литературы

- 1 Анисимов С. И., Лукьянчук Б. С. Избранные задачи теории лазерной абляции, // УФН. 2002.- Т. 172, С. 301.
- 2 Григорьянц А. Г., Соколов А. А. Лазерная обработка неметаллических материалов. М.:Высшая школа, - 1988. С. 18–55.
- 3 Гуськов К. С., Гуськов С. Ю. // Квантовая электроника. 2001, Т. 31, С. 305.
- 4 Анисимов С. И., Имас Ю. А., Романов Г. С., Ходыко Ю. А. Действие излучения большой мощности на металлы. М.: Наука. – 1970.
- 5 Колдунов М. Ф., Маненков А. А., Покотило И. Л. // Квантовая электроника, 2000. – Т. 30. – С. 592–596.
- 6 Воронина Э. И., Чартий П. В., Шеманин В. Г. // Физика экстремальных состояний вещества – 2005. Под ред. Фортова В.Е. и др. Черноголовка. ИПХФ РАН. 2005. С. 37.
- 7 Voronina E. I., Efremov V. P., Privalov V. E., Shemanin V. G // Proc. SPIE. 2003. V. 5381. P. 178.
- 8 Efremov V. P., Privalov V. E., Skripov P. V., Charty P. V., Shemanin V. G.// Proc. SPIE. 2004. V. 5447. P. 234.
- 9 Laktushkin G. V, Shemanin V. G. // Proc. SPIE. 1998. V. 3687. P. 53.
- 10 Лактюшкин Г. В., Привалов В. Е., Шеманин В. Г. // Приборы и системы управления. 1999. № 3. С. 31.
- 11 Воронина Э. И., Чартий П. В., Шеманин В. Г. // Физика экстремальных состояний вещества – 2003. Под ред. Фортова В.Е. и др. Черноголовка. ИПХФ РАН. 2003. С. 24.
- 12 Runkel M. Damage testing/ SPIE,s OEmagazin. – 2002.- No 5. – P. 48.
- 13 Воронина Э. И., Чартий П. В., Шеманин В. Г. // Физика экстремальных состояний вещества – 2005. Под ред. Фортова В. Е. и др. Черноголовка. ИПХФ РАН. 2005. С. 36.
- 14 Чартий П. В., Череп Е. И., Шеманин В. Г. // Физика экстремальных состояний вещества, Черноголовка, ИПХФ РАН. 2004. С. 128.
- 15 Казанцев С. Г. // Оптика атмосферы и океана. 2003. – Т. 16. – С. 390.

16 Free M. D., Genin F. Y. Proc. SPIE. – 1988.- V. 3492. – P. 188.

17 Надежность и эффективность в технике. В .10 т. Том. 2. Математические методы в теории надежности и эффективности. // Под ред. Б. В. Гнеденко. – М.: Машиностроение, 1987, 280 с.

Prediction of Optical Strength of Polymer Coatings during Their Laser Ablative Destruction

¹ Voronina E. I., ¹ Charty P. V., ^{1,2} Shemanin V. G.

¹ *Novorossiysk Polytechnic Institute (branch) of the Kuban State Technological University, 353900, Russia, Novorossiysk, 12 K. Marx st.*

² *Branch of the Belgorod State Technological University. V. G. Shukhov in Novorossiysk, 353919, Russia, Novorossiysk, Myskhakskoe shosse 75,*

The study of laser ablation destruction of polymer coatings under intense energy release on the target is of interest for the development of methods for assessing and predicting the reliability or radiation strength of these coatings. A technique is proposed for assessing and predicting the reliability of these coatings based on a statistical model of the destruction process and experimental measurements of the values of the threshold energy density of this destruction. The results obtained make it possible to predict the reliability of any polymer sample depending on the nature of laser irradiation without carrying out a large amount of experimental measurements.

Keywords: laser ablation destruction, polymer coatings, target, reliability or radiation strength, statistical model, threshold energy density.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

doi: 10.51639/2713-0568_2022_2_3_34

УДК 535.8

ГРНТИ 47.35.31

ВАК 01.04.21

Результаты экспериментальных исследований лазерного разрушения кристаллов для оптических волноводов ИК-спектра

Шеманин В. Г., * Мкртычев О. В.

*Филиал БГТУ им. В. Г. Шухова в г. Новороссийске
353919, Россия, Новороссийск, Мысхакское шоссе 75,*

e-mail: shemanin-v-g@nb-bstu.ru, * mkrtychev-o-v@nb-bstu.ru

Приводятся результаты экспериментальных исследований лазерного разрушения поверхностей кристаллов вида AgCl_xBr_y под действием лазерных импульсов длительностью 20 нс и 300 мкс с максимальной энергией до 100 и 250 мДж, соответственно.

Ключевые слова: лазерное разрушение, оптические материалы, волноводы ИК-спектра.

Авторы [1], изменяя химический состав кристаллов вида AgCl_xBr_y , имеют возможность получать требуемые оптические и прочностные свойства материала для оптических волноводов среднего ИК-спектра. По методике работ [2–6] были продолжены эксперименты по изучению зависимости пороговой плотности энергии F_{bn} лазерного разрушения поверхности оптических кристаллов под действием импульсного лазерного излучения с длительностями наносекундного и микросекундного диапазонов от мощности излучения. Длительность импульсов составляла 20 нс и 300 мкс. Максимальная интегральная энергия в импульсе достигала значений 55...100 мДж и 150...250 мДж в наносекундном и микросекундном диапазонах, соответственно.

В таблицах ниже приведены результаты экспериментов. В первой строке таблиц показаны значения энергии в мДж, во второй строке – вероятности пробоя. Для образца $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$ результаты для микросекундного и наносекундного диапазонов приведены в таблицах 1 и 2, соответственно. Аналогично, для образца $\text{AgCl}_{0,5}\text{Br}_{0,5}$ – в таблицах 3 и 4, для образца $\text{AgCl}_{0,75}\text{Br}_{0,25}$ – в таблицах 5 и 6.

Таблица 1

7,25	12,33	13,26	24,27	26,63	29,85	31,02	41,2	43,33	54,25
0	0,12	0,08	1	0,9	0,95	1	0,9	0,6	1

Таблица 2

0,127	0,222	0,25	0,29	0,371	0,444
0	0,02	0	0,05	0,18	1

Таблица 3

0,48	2,74	2,37	4,84
0	0,1	0,9	1

Таблица 4

0,21	0,27	0,37
0	0,8	1

Таблица 5

0,49	1,35	2,64	6,57	9,83
0	0,06	0,1	0,7	1

Таблица 6

0,244	0,661	0,871	1,249
0	0,1	0,9	1

На рис. 1 представлены фотографии поверхности одного из образцов до и после разрушения.



Рис. 1. Поверхность образца: слева – до разрушения, справа – после разрушения импульсами микросекундного диапазона.

Эти результаты позволяют прогнозировать надёжность работы оптических кристаллов в условиях лазерного облучения их поверхности. Соответственно, облегчаются работы по созданию оптических волноводов среднего ИК-спектра, так как вопросы лазерного разрушения материалов для разных диапазонов и длительностей лазерных импульсов, являясь хорошо проработанными в теоретическом плане, требуют постоянного экспериментального исследования для вновь создаваемых материалов [7–21].

Конфликт интересов

Авторы статьи заявляют, что у них нет конфликта интересов по материалам данной статьи с третьими лицами, на момент подачи статьи в редакцию журнала, и им ничего не известно о возможных конфликтах интересов в настоящем со стороны третьих лиц.

Список литературы

1. Zhukova L. V., Korsakov A. S., L'vov A. E., Salimgareev D. D. Waveduide fibers for the middle IR spectrum. Ekaterinburg: UMC UPI Publ. 2016, 247 p.
2. Atkarskaya AB, Mkrtychev OV, Privalov VE, Shemanin VG. Laser ablation of the glass nanocomposites studies. Optical Memory and Neural Networks (Information Optics) 2014;23:265–70.
3. Privalov VE, Shemanin VG, Mkrtychev OV. Method of Assessing the Optical Resistance of an Irradiated Surface Under Laser Ablation. Meas Tech 2018;61:694–8.
4. Shemanin V G and Mkrtychev O V 2018 Technical Physics 63 623–627.
5. Shemanin V G, Kolpakova E V, Atkarskaya A B and Mkrtychev O V. Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics 2019 10 632–636.
6. Mkrtychev O V, Privalov V E, Shemanin V G and Shevtsov Y V 2020 Optical Memory and Neural Networks (Information Optics) 29 142–146.
7. Соболев С. Л. Локально-неравновесные модели процессов переноса // УФН. 1997. Т. 167, № 10. С. 1095–1106.
8. Анисимов С. И., Лукьянчук Б. С. Избранные задачи теории лазерной абляции // УФН. 2002. Т. 172, № 3, С. 301–333.
9. Вейко В. П., Либенсон М. Н., Червяков Г. Г., Яковлев Е. Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. Силовая оптика / Под ред. В. И. Конова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 312 с.
10. Abraham F. F., Broughton J. Q. Pulsed Melting of Silicon (111) and (100) Surfaces Simulated by Molecular Dynamics // Phys. Rev. Lett. 1986.
11. Zhigilei V., Garrison B. J. Pressure Waves in Microscopic Simulations of Laser Ablation // Materials Research Society (MRS) Proc. V. 538. Cambridge University Press, 1998. P. 491–496.
12. Etcheverry J. I., Mesaros M. Molecular Dynamics Simulation of the Production of Acoustic Waves by Pulsed Laser Irradiation // Phys. Rev. B. 1999. V. 60, No. 13. P. 9430–9434.
13. Zhigilei L. V., Garrison B. J. Microscopic Mechanisms of Laser Ablation of Organic Solids in the Thermal and Stress Confinement Irradiation Regimes // J. Appl. Phys. 2000. V. 88, No. 3. P. 1281–1298.
14. Фокин В. Б. Континуально-атомистическая модель и ее применение для численного расчета воздействия одиночного и двойного фемтосекундного лазерного импульса на металлы. Дис. канд. ... физ.-мат. наук. М., 2017.
15. K. Bronnikov, A. Wolf, S. Yakushin, et al, Opt. Express 27, 38421 (2019).
16. K. Bronnikov, A. Dostovalov, V. Terentyev, et al, Appl. Phys. Lett. 119, 211106 (2021).
17. Yin F., Ye X., Yao H., Wei P., Wang X., Cong J., Tong Y. Surface forming criteria of Ti-6AL-4V titanium alloy under laser loading // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. 5406.
18. Inogamov N.A., Zhakhovskii V.V., Khokhlov V.A. Jet formation in spallation of metal film from substrate under action of femtosecond laser pulse // Journal of Experimental and Theoretical Physics. 2015. Vol. 120.
19. Ионин А. А., Кудряшов С. И., Самохин А. А. Абляция поверхности материалов под действием ультракоротких лазерных импульсов // Успехи физических наук. 2017. Т. 187. № 2.
20. Локтионов Е. Ю., Овчинников А. В., Протасов Ю. Ю. и др. О спектрально-энергетической эффективности фемтосекундной лазерной абляции полимеров. Доклады Академии наук. 2010. Т. 433. № 6.

**Results of experimental studies of laser destruction of crystals
for optical waveguides of the IR spectrum**

Shemanin V. G., Mkrtychev O. V.

*353919, Russia, Novorossiysk, st. Myskhakskoe highway, 75,
branch of the Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov in
Novorossiysk*

The results of experimental studies of laser destruction of the surfaces of crystals of the AgCl_xBr_y type under the action of laser pulses with a duration of 20 ns and 300 μs with a maximum energy of up to 100 and 250 mJ, respectively, are presented.

Key words: laser damage, optical materials, IR waveguides.