

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛУЧЕВОЙ ПРОЧНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В ЛАЗЕРНЫХ МЕДИЦИНСКИХ УСТАНОВКАХ

Е.А. Лявина, О.А. Коновалова

Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань

Лазеры, работающие в ближнем ИК диапазоне, получили широкое распространение в медицине, а многослойные диэлектрические зеркала, как известно, являются важным элементом лазерных установок. В процессе изготовления и при дальнейшей эксплуатации таких зеркал возникает существенная проблема – нестабильность их лучевой прочности. Стойкость к лазерному излучению вызывает высокий интерес в условиях постоянного роста требований к работе современных лазерных систем, поэтому данная статья предлагает ознакомиться с существующими методами исследования лучевой прочности прозрачных материалов различного класса в медицинской сфере применения.

Ключевые слова: лазерная медицина, оптические поверхности, воздействие излучения, *лучевая прочность*

Введение

Лучевая прочность (ЛП) – это свойство оптического материала (элемента) выдерживать кратковременное воздействие лазерного излучения и при этом выполнять функции и сохранять свои параметры после воздействия [1]. В общем случае исследование ЛП оптических материалов заключается в том, что определенная зона подвергается воздействию импульсного лазерного излучения, в процессе чего на этом покрытии фиксируются разрушения материала [2].

Все существующие методы исследования ЛП направлены на определение порога разрушения материала, то есть на определение такой плотности энергии лазерного излучения, при которой на исследуемом образце образуются пробои. Пробоем оптической поверхности (ОП) называют явление превращения прозрачной среды в поглощающую среду под воз-

действием лазерного излучения. Порог разрушения является одной из самых важных характеристик ОП, определяющих возможности их применения в медицине и зависящих от времени воздействия лазерного излучения и размеров зоны облучения. Поэтому при его измерении необходимо обязательно проводить контроль параметров импульса лазерного излучения [3].

При воздействии лазера на материал происходит поглощение излучения поверхностными слоями вещества. При взаимодействии излучения лазера (рис. 1) с образцами обычной чистоты широкого ряда хрупких материалов – стекло, кристаллический кварц, сапфир и др. – преобладает несобственный механизм поглощения, заключающийся в том, что эффективность поглощения зависит от количества и характеристик дефектов, определяющих оптическое качество материала.



Рис. 1. Принцип локального разрушения стеклянных материалов лазерным излучением [4]

Существует физическая модель описания действия лазерного излучения на мягкие ткани, которая признана многими исследователями и называется термомеханической [5]. Согласно этой модели, процесс представляется следующим образом. Быстрый разогрев твердого объекта лазерным излучением ведет к плавлению приповерхностного слоя ткани. Плавление идет неравномерно по структуре: сначала плавятся относительно низкоплавкие компоненты, а термостойкие кристаллосодержащие структуры на короткое время сохраняют твердое состояние. При относительно низких значениях плотности энергии излучения происходит импульсный взрывообразный выброс расплава и не успевших расплавиться твердых частиц, то есть происходит явление абляции механического типа. Тем самым частицы, образующиеся при таком явлении, попадают во внутреннюю структуру лазерной установки и налипают на защитное стекло лазера, вызывая при дальнейшем разрушение последнего, ввиду того, что идет сильное поглощение энергии в местах загрязнения защитного стекла и, соответственно, нарушения его целостности при дальнейшей работе лазера.

Одним из критических параметров, определяющих появление и размер разрушения в объеме и на поверхности прозрачного материала, является поглощенная энергия излучения. Она связана с размером разрушения и энергией, затраченной на разрушение.

Прочность многих прозрачных материалов в режиме многоимпульсного лазерного облучения обычно значительно ниже их прочности при одноимпульсном лазерном облучении. Такое снижение стойкости к настоящему вре-



Рис. 2. Взаимосвязь физических процессов при воздействии лазерного излучения на материалы [7]

мени обнаружено в материалах различных типов: в силикатных стеклах, кристаллах и даже полимерах. Физические причины снижения прочности в режиме многократного облучения могут быть связаны как с вероятностной природой разрушения, так и с накоплением необратимых изменений в материале под действием излучения [6].

Взаимосвязи физических процессов, сопровождающих процесс воздействия лазерного излучения на материалы, изображены на рис. 2. Стрелками показано возникновение обратных связей по оптическим свойствам, в частности, по поглотительной способности при нагреве материала, при плавлении.

Лучевая прочность

Лазерная медицина включает воздействие лазерного излучения на различные части тела: кожа, кости, мышцы, жировые ткани, сухожилия, внутренние органы, глаза, зубные ткани и т.п.

Все эти ткани имеют свои свойства, как оптические (спектральные характеристики, коэффициент отражения, глубина проникновения излучения), так и теплофизические (теплопроводность, температуропроводность, теплоемкость), отличные от свойств других биотканей. Поэтому различается и характер воздействия на них лазерного излучения. Соответственно, в каждом случае необходимо выбирать индивидуальные параметры режима облучения: длину волны, длительность воздействия, мощность, частоту следования импульсов и т.п.

Таблица 1

Параметры деградации зеркальных покрытий под действием лазерного излучения [9]

Материалы слоев зеркал	Число слоев	Длина волны, мкм	Порог разрушения, ГВт/см ²	
			Одиночный импульс	Многokратное воздействие при частоте повторения импульсов 100 Гц
TiO ₂ -SiO ₂	14	1,32	2	1,5
	22	1,06	1,5	1
	20	0,53	1-1,5	0,3-0,4
ZrO ₂ -SiO ₂	17	1,32	2	2
	25	1,06	2	2
	17	0,53	2	2

В последние годы стали применять импульсные лазеры (на красителе, на александриде $\lambda=755$ нм; Nd:YAG $\lambda=1,06$ мкм; Cr-Tu-No:YAG $\lambda=2,15$ мкм). Для проведения таких операций как литотрипсия в желчном пузыре и в мочевыводящих путях, больному вводят зонд к месту расположения камня, через него подводят световод, торец которого вводят в контакт с камнем. Затем, под рентгеновским контролем, подают энергию на лазер. Здесь очень важно не превышать определенных значений энергии, чтобы не допустить разрушения торца световода, что является очень серьезным осложнением операции и требует инструментального удаления осколков, которые могут впиваться в ткань [8].

В работах [9, 10] исследуется деградация зеркал на основе TiO₂-SiO₂ и ZrO₂-SiO₂, причем предпочтение отдается обычно первой системе из-за более высокого показателя преломления TiO₂. Это позволяет формировать покрытия, состоящие из меньшего числа слоев. Однако с точки зрения устойчивости к лазерному излучению, более эффективными являются зеркальные системы ZrO₂-SiO₂. Об этом свидетельствуют данные табл. 1, где приведены результаты измерений порога разрушения указанных зеркал в зависимости от длины волны лазерного облучения при длительности импульсов 10–14 нс и диаметре светового пятна 120 мкм.

При анализе спектральных характеристик была выбрана пара слоев ZrO₂-SiO₂ из-за более высокого показателя отражения на требуемой длине волны и минимального поглощения во всем оптическом диапазоне. При испытании зеркал ZrO₂-SiO₂ на лучевую прочность в импульсном режиме видимых дефектов не обнаружено при мощности излучения не менее 0,5 МВт/см² [10].

При работе на биоткани с CO₂-лазерами характер и масштаб тканевых изменений

принципиально зависит от мощности импульсов и их длительности. Изменение длительности импульса (в экспериментах от 50 до 250 мкс) и соответствующее изменение мощности при одинаковом значении энергии одного импульса (4 мДж при облучении роговицы) ведет к изменению массы удаленных при абляции продуктов разрушения ткани. Наблюдались следующие закономерности: а) при минимальном значении мощности излучения и максимальном значении длительности воздействия глубина термонекроза резко возрастала; б) масса продуктов разрушения была невелика, – при максимальном значении мощности излучения и минимальном длительности воздействия – наоборот [11].

Реализация технологических возможностей CO₂-лазеров как импульсного, так и непрерывного действия в ряде случаев ограничивается разрушением оптических материалов. Поэтому их применение обусловлено требованиями, основными из которых являются:

- ✓ малый коэффициент поглощения β для $\lambda=10,6$ мкм;
- ✓ высокая оптическая прочность, позволяющая достичь требуемых значений поверхностного и объемного порога разрушения и ресурса работы;
- ✓ минимальное изменение показателя преломления с изменением температуры;
- ✓ хорошая оптическая однородность, стабильная во времени в процессе эксплуатации;
- ✓ невысокая стоимость материала и др.

Полностью удовлетворяющие всем перечисленным требованиям материалы не созданы. Однако целый ряд материалов, прозрачных в ИК-области спектра, этим требованиям частично удовлетворяют. К ним относятся: тугоплавкие монокристаллы Ge, Si (применяется в основном в спектральном диапазоне 3–5 мкм); полупроводниковые соединения ZnSe,

CdTe, GaAs; монокристаллические растворы на основе солей таллия, известные под шифрами КРС-5 и КРС-6; щелочно-галогидные кристаллы KCl, NaCl, CaF₂, LiF, BaF₂; оптическая керамика типа КО₃ (на основе CaF₂), КО₄ (на основе ZnSe) и КО6 (на основе CdTe) [12].

В качестве материала для проходной оптики CO₂-лазеров ($\lambda=10,6$ мкм) применяют селенид цинка (ZnSe) и арсенид галлия (GaAs) [13]. Между этими двумя материалами идет конкуренция на пригодность к использованию в хирургических лазерах максимальной мощности. С одной стороны, GaAs обладает гораздо более высокой твердостью и теплопроводностью. С другой стороны, в производстве ZnSe наблюдается постоянный прогресс в вопросе снижения коэффициента объемного поглощения. Если двадцать лет назад лучшие образцы селенида цинка имели поглощение более $0,005 \text{ см}^{-1}$, то в настоящее время имеются сообщения о производстве селенида цинка с объемным поглощением менее $0,0001$.

Предельные значения лучевой прочности GaAs и ZnSe составляют величину порядка $(1,5-2,0) \text{ кВт/см}^2$ при нагрузках свыше одного кВт. Ни GaAs, ни ZnSe не могут быть использованы в системах с плотностью мощности свыше $(1-2) \text{ кВт/см}^2$ и апертурой луча в десятки квадратных сантиметров. Прогресс в изготовлении селенида цинка с предельно малыми значениями поглощения, вероятнее всего, может вытеснить такие материалы как хлорид калия или хлорид натрия, единственным достоинством которых является их невысокая стоимость.

Также исследование лучевой прочности проводилось на образцах кварцевого стекла КУ1, на которые были нанесены диэлектрические просветляющие покрытия SiO₂-Y₂O₅-SiO₂ [14]. В проведенном цикле измерений лучевой прочности диэлектрических покрытий диаметр лазерного пучка на длине волны 532 нм (Nd:YAG медицинский лазер) в плоскости фокусировки объектива составлял 29 мкм, погрешность позиционирования центра пучка не превышала 2 мкм. При осуществлении за 1 цикл сканирования порядка 100 выстрелов погрешность определения порога разрушения в выбранных объектах оценивалась как $\pm 10\%$. На рис. 3 приведен график зависимостей вероятности (P) появления лазерно-индуцированного пробоя просветляющего диэлектрического покрытия, нанесенного на поверхность плавленого кварца КУ1, от плотности энергии пада-

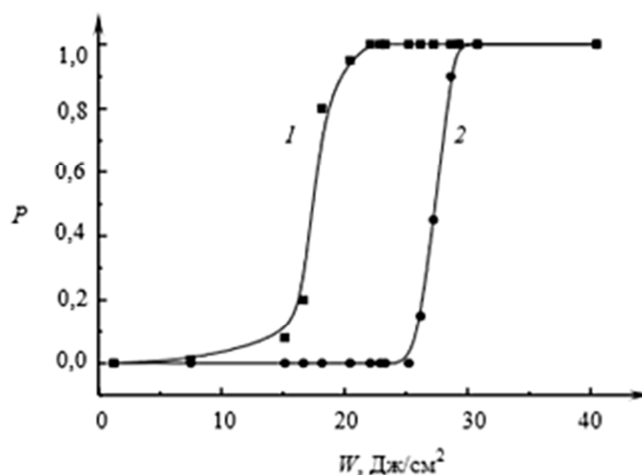


Рис. 3. График зависимостей вероятности (P) появления лазерно-индуцированного пробоя просветляющего диэлектрического покрытия от плотности энергии падающего излучения (W): 1 – образцы с оптическими поверхностями, обработанные в соответствии с ОСТ 3-6043-86; 2 – образцы с поверхностями, подвергнутыми дополнительной процедуре финишной полировки.

ющего излучения (W): кривая 1 соответствует образцам с ОП, обработанными методом глубокой шлифовки–полировки в соответствии с ОСТ 3-6043-86; кривая 2 характерна для аналогичных образцов, но с поверхностями, подвергнутыми дополнительной процедуре финишной полировки.

Измеренные значения порога разрушения диэлектрического просветляющего покрытия, определяемые по уровню 50 %-й вероятности появления разрушения в произвольной точке поверхности, составили соответственно $17,5+5/-10 \text{ Дж/см}^2$ и $27,5\pm 2,5 \text{ Дж/см}^2$ для исходных образцов и образцов, прошедших дополнительную обработку.

Как известно, длина волны является одной из наиболее важных характеристик лазерного излучения. При пороговых значениях разрушения (плотности энергии) для различных длин волн был проведен ряд экспериментов на кварцевом стекле марки К8, чтобы определить, как длина волны влияет на размер дефекта [15].

В диапазоне от 600 нм до 1200 нм излучение глубже проникает в ткань, с минимальными потерями на рассеяние и поглощение. В этом диапазоне можно достигнуть глубоко расположенных объектов. Но при этом результаты эксперимента показывают, что при увеличении длины волны до области дальнего ИК излучения, изменяется размер дефекта в сто-

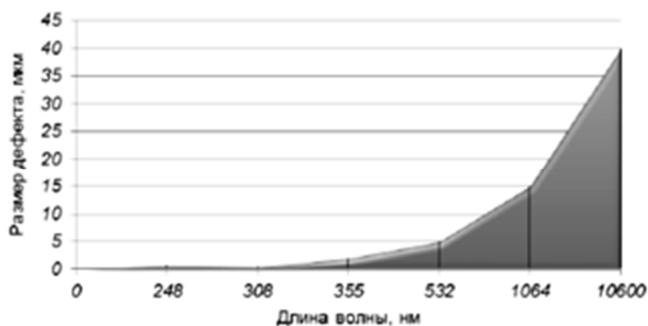


Рис. 4. Зависимость среднего размера дефекта от длины волны излучения при пороговых значениях плотности энергии для стекла марки К8 [15]

рону увеличения, так же как и диаметр сфокусированного луча (рис. 4).

Также необходимо учитывать влияние толщины слоев, формирующих диэлектрическое зеркало, на его лучевую прочность. Используемые в лазерной хирургии манипуляторы, которые доставляют лазерное излучение от источника к точке воздействия, содержат оптическую систему с диэлектрическими зеркалами. Было проведено исследование таких зеркал, состоящих из слоев диоксида кремния и гафния на кварцевой подложке, конструкторская толщина которых была кратна $\frac{1}{4}\lambda_0$, толщина крайнего слоя кварца на границе воздух-система составляла $\frac{1}{2}\lambda_0$, общее число слоев – 28 [16, 17]. Рабочая длина волны лазера составляла 1,54 мкм, диаметр пятна воздействия $d=0,28$ мм, площадь воздействия $S=6,16 \cdot 10^{-4}$ см².

Результаты эксперимента показали, что отклонение оптической толщины слоев от $\frac{1}{4}\lambda_0$ приводит к тому, что значение амплитуды электрической напряженности на границах раздела слоев в поверхностных слоях увеличивается, существенно повышая вероятность пробоя (и, следовательно, уменьшая значение лучевой прочности). Проведение определенных расчетов показало, что дисперсия показателя преломления пленкообразующего материала из разных партий не оказывает значительного влияния на лучевую прочность, поскольку значения поглощения были близки для всех образцов.

Для определения лучевой прочности оптического покрытия, состоящего из оксида циркония и диоксида углерода, был проведен эксперимент [18], результатом которого был график зависимости вероятности поврежде-

ния образца от плотности энергии лазерного излучения. Точки, соответствующие вероятности повреждения, равной нулю, свидетельствовали о том, что пробой на образце отсутствовал; равной единице – образование разрушения. Для исследуемого образца порог повреждения материала был примерно равен 13 Дж/см². По виду пробоя можно сделать выводы о причинах разрушения материала. В данной работе пробой имел характер расслоения, что говорило о том, что исследуемое покрытие обладало плохой межслойной адгезионной прочностью.

Были проведены экспериментальные исследования оптического пробоя в объеме натрий-кальций-силикатного стекла, а также определялось влияние поляризации на форму разрушений [19]. В ходе работы выяснилось, что величина энергии импульса в значительной степени определяет не только структуру зоны разрушения, но и его геометрические размеры. Например, при повышении энергии импульса с 8 до 16 мДж, поперечный размер зоны разрушения в среднем увеличивался в 1,5 раза. При постепенном увеличении энергии импульса продольный размер формируемых разрушений возрастал прямо пропорционально его поперечному размеру. На рис. 5 видно, что трещины направлены вдоль вектора поляризации, т.к. электроны ускоряются вдоль направления электрического поля, из-за чего преимущественное направление разрастания электронной лавины имело форму, вытянутую вдоль направления поляризации.

Определение пороговой интенсивности пробоя производилось на основании регистрации видимого сечения (искры) с последующим наблюдением изменений структуры материала, возникающих сразу же по достижении пороговой интенсивности разрушающего излучения, что позволило с достаточной точностью зафиксировать порог разрушения. Пробой экспериментальных образцов стекла достигался при среднем значении энергии импульса 10 мДж и его средней длительности 20 нс. При такой энергии импульса вероятность образования разрушения составляла 50 %.

Заключение

Трудности, возникающие при изучении процессов разрушения прозрачных материалов под действием мощных лазерных импуль-

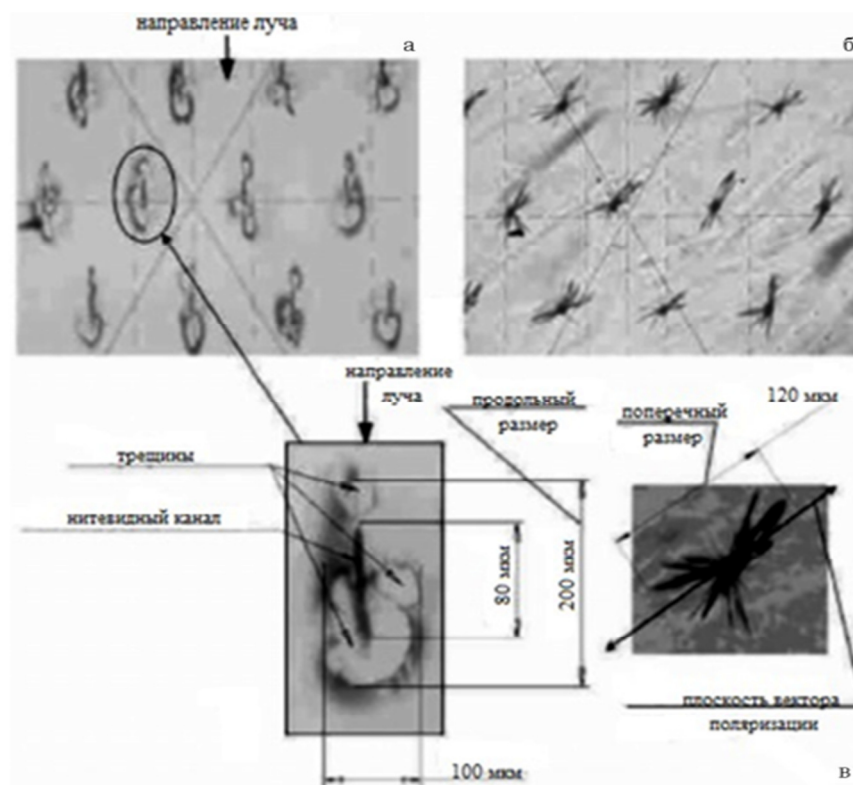


Рис. 5. Разрушение, образованное в листовом стекле толщиной 2 мм, импульсом с длительностью 20 нс и энергией 15 мДж: а – набор разрушений в продольном направлении; б – поперечное направление; в – увеличенное изображение разрушения [19]

сов, объясняются отчасти и тем фактом, что до сих пор в современной отечественной литературе нет монографии или учебного пособия, в котором были бы сведены воедино многочисленные экспериментальные результаты и сделаны необходимые обобщения, отражающие текущее состояние затронутой темы, которая актуальна как для мира физики, так и для медицинского сообщества.

Еще одна из возможных проблем недостаточной изученности данной темы в том, что исследование лучевой прочности оптических материалов преимущественно рассматривается в работах промышленных лазерных установок, а не медицинских. Поэтому возникает необходимость в сопоставлении, обработке и анализе имеющихся на сегодняшний момент результатов для медицинской сферы применения, что и было сделано в данной работе, которая позволит сформировать направления дальнейших исследований.

Список литературы

1. ОСТ 11-070.802-80. Материалы оптические и элементы твердосплавных лазеров. Метод определения лазерной прочности. 1981. 40 с.
2. Маненков А. А., Прохоров А. М. Лазерное разрушение прозрачных твердых тел // Успехи физ. наук. 1986. Т. 148. Вып. 1. С. 179–211.
3. Имас Я.А. Оптический пробой прозрачных диэлектриков. – Минск: Ин-т тепло- и массообмена АН БССР, 1982. 60 с.
4. Hulsenberg D., Harnisch A., Bismarck A. Microstructuring of Glasses. Ed. by Hull R., Osgood R., Parisi J., Warlimont H. – Springer. Springer Series in Materials Science. 2008. 336 pp.
5. Шахно Е.А. Физические основы применения лазеров в медицине. – СПб: НИУ ИТМО. 2012. 129 с.
6. Колдунов М.Ф., Маненков А.А., Покотило И.Л. Эффективность различных механизмов лазерного разрушения прозрачных

- твердых тел // Квантовая электроника. 2002. Т. 32. № 7. С. 623–628.
7. Либенсон М.Н., Яковлев Е.Б., Шандыбина Г.Д. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). Часть 2. Лазерный нагрев и разрушение материалов. – СПб: НИУ ИТМО. 2014. 181 с.
 8. Серебряков В.А. Лазерные технологии в медицине. – СПб: СПбГУ ИТМО. 2009. 266 с.
 9. Ершов А.В., Машин А.И. Многослойные оптические покрытия. Проектирование, материалы, особенности технологии получения методом электронно-лучевого испарения. – Н. Новгород: ННГУ. 2006. 105 с.
 10. Притоцкий Е.М., Притоцкая А.П., Панков М.А. Многослойные диэлектрические зеркала для мощных полупроводниковых лазеров // *Comput. Nanotechnol.* 2017. № 2. С. 94–96.
 11. Шахно Е.А. Аналитические методы расчета лазерных микро- и нанотехнологий. – СПб: СПбГУ ИТМО. 2009. 77 с.
 12. Тимченко Е.В. Оптика лазеров. – Самара: СГАУ им. С.П. Королева. 2013. 134 с.
 13. Котликов Е. Н., Варфоломеев Г.А., Лавровская Н.П. и соавт. Проектирование, изготовление и исследование интерференционных покрытий. – СПб: ГУАП. 2010. 189 с.
 14. Гагарский С.В., Ермолаев В.С., Сергеев А.Н., Пузык М.В. Исследование лучевой прочности диэлектрических покрытий, нанесенных на оптическую поверхность // *Изв. Вузов. Приборостроение.* 2012. Т. 55. № 7. С. 80–85.
 15. Григорьянц А.Г., Богданова М.А. Особенности взаимодействия лазерного излучения с прозрачными диэлектриками // *Электронное научно-техническое издание “Наука и Образование”.* 2012. № 3. С. 1–15.
 16. Макаричев Г.В. Влияние толщины слоев, формирующих диэлектрическое зеркало, на его лучевую прочность // *Изв. Вузов. Приборостроение.* 2012. Т. 55. № 4. С. 50–55.
 17. Макаричев Г.В., Путилин Э.С. Лучевая прочность диэлектрических зеркал для ближнего ИК диапазона. – СПб: НИУ ИТМО. 2012. 18 с.
 18. Митин А.О., Орешков В.И. Разработка и анализ методов исследования лучевой прочности оптических покрытий // *Вестник РГРТУ.* 2016. № 55. С. 172–177.
 19. Щукин А.С. Исследование структуры разрушений стекол при воздействии наносекундными лазерными импульсами // *Известия ТГУ. Естественные науки.* 2010. № 1. С. 150–159.

RESEARCH OF RADIATION ENDURANCE OF OPTIC MATERIALS IN LASER MEDICAL EQUIPMENT

E.A. Lyavina, O.A. Konovalova

Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

Lasers that work near-infra-red band are widely used in medicine. Multilayer dielectric mirrors are important part of laser equipment. During the preparation and exploitation of multilayer dielectric mirrors, there is a significant problem – instability of their radiation endurance. Endurance to the radiation arouses the wide interest in the conditions of the increasing requirements to the qualities of modern laser systems. This article describes existing methods of research of transparent materials radiation endurance for the use in medical practice.

Key words: *laser medicine, optical surfaces, radiation exposure, radiation strength*

E-mail: 2kat3@mail.ru