

# РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРЕВА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ НЕПРЕРЫВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

*В. М. Ямщиков, Д. С. Тимаев, Г. Н. Качалин, Е. А. Кудряшов, В. Г. Рогачев*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Приведены результаты экспериментов и численного моделирования по воздействию непрерывного лазерного излучения высокой интенсивности на оптические элементы с отражающим диэлектрическим покрытием, при котором наблюдался нагрев образцов. С использованием, разработанного в ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» программного комплекса «ЛЮ-ГОС», рассматривались различные комбинации интенсивности излучения и толщин диэлектрических слоев.

## Введение

Мощные непрерывные лазеры находят широкое применение в различных системах технологического назначения. В оптических системах данных лазеров используются различные оптические элементы (ОЭ). Одними из основных ОЭ являются зеркала с диэлектрическим покрытием. При нанесении покрытий важно соблюдение высокой технологической точности толщин слоев отражающего покрытия. Под воздействием мощного лазерного излучения даже при небольшом отклонении в толщине слоя возможен заметный нагрев ОЭ, в результате которого образуются искажения волнового фронта, что оказывает влияние на выходные характеристики лазера. Возможно также разрушение ОЭ.

В данной работе приведены результаты исследования нагрева оптических элементов с отражающим диэлектрическим покрытием в поле непрерывного лазерного излучения, при варьировании толщины слоев. Сформулированы требования по допустимым отклонениям толщины покрытий для уменьшения нагрева образцов.

## Эксперимент

### Экспериментальная установка

Экспериментальные исследования по воздействию непрерывного лазерного излучения ближнего инфракрасного (ИК) диапазона на оптические элементы с диэлектрическим покрытием были проведены на экспериментальном стенде, принципиальная схема которого представлена на рис. 1 [1].

Стенд, рис. 1, включает в себя: лазерную кювету с источником накачки 2, систему формирования излучения генерации (резонатор), систему измерения

параметров лазерного излучения 7, 9, оптическую систему формирования пространственных и угловых характеристик лазерного излучения 5 на исследуемом оптическом элементе 6.

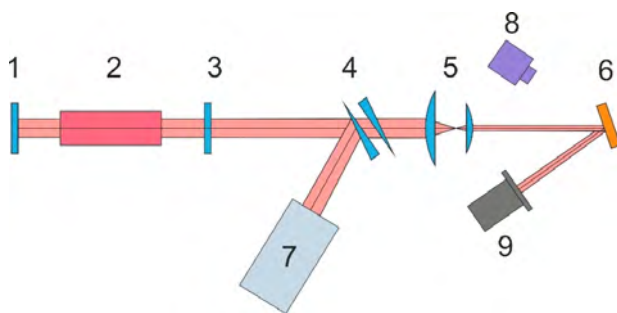


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального стенда по исследованию воздействия лазерного излучения на оптические элементы: 1, 3 – глухое и выходное зеркала резонатора, 2 – кювета лазера с источником накачки, 4 – два клина установленные в положении компенсации углового увода оптической оси лазерного излучения, 5 – перестраиваемая оптическая система, 6 – исследуемый оптический элемент, 7, 9 – система измерения параметров лазерного излучения, 8 – тепловизор

Для поддержания постоянного уровня выходной мощности лазерного излучения использовалось адаптивное глухое зеркало 1 [2–3]. Варьирование выходной мощности лазерного излучения проводилось посредством модуляции мощности накачки.

Часть излучения отводилась кварцевым клином 4 на систему измерения выходных параметров лазерного излучения. Для компенсации углового ухода луча в оптическую схему устанавливался дополнительный клин 4, с разворотом на угол 180 градусов относительно оси лазерного излучения. Обе грани второго клина были просветлены на длину волны лазерного излучения. По результатам измерений отражение от просветленной поверхности не превышало 0,2 %.

Измерение мощности генерации проводилось с помощью термоэлектрического измерителя ОРНИР FL500А. Точность измерения составляла  $\pm 3\%$ .

Воздействию подвергался образец с узкополосным отражающим диэлектрическим покрытием ( $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$  33 слоя), нанесенным на кварцевую подложку диаметром  $D = 100$  мм и толщиной  $h = 10$  мм. Рабочая поверхность образца до испытаний покрыта защитным лаком. Заявленный производителем ко-

Постановка задачи

Исходя из условий эксперимента, моделируемый оптический элемент, подвергавшийся воздействию непрерывного лазерного излучения, представлял собой диск, с плоскопараллельными торцами, изготовленный из кварца с малым коэффициентом поглощения с соответствующим диэлектрическим покрытием. Для иллюстрации на рис. 3 представлена геометрическая модель исследуемого образца.

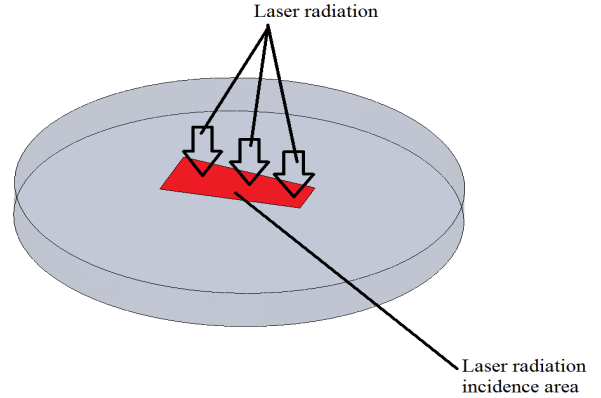


Рис. 3. Геометрическая модель исследуемого образца

Моделируемый оптический элемент имел следующие размеры: радиус  $R = 50$  мм, толщина  $h = 10$  мм. В расчеты закладывались теплофизические характеристики кварца ( $\text{SiO}_2$ ) и  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  [4].

Конвективный теплообмен с окружающей средой не учитывался. Моделирование проводилось с использованием пакета программ «ЛОГОС» [5]. Для построения расчетной сетки использовались неструктурированные сетки, состоящие из 8-узловых шестигранников.

Расчет нагрева образца с диэлектрическим покрытием

В соответствии с выдвинутыми ранее предположениями нагрев многослойного диэлектрического покрытия может объясняться двумя причинами:

- 1) объемное поглощение в слоях диэлектрического покрытия;
- 2) поверхностное поглощение одного или нескольких слоев при условии, что коэффициент отражения покрытия меньше заявленного.

Для расчета коэффициента объемного поглощения в слоях, как функции от толщины, необходим интегральный коэффициент отражения покрытия. Для его определения использовался матричный метод расчета распространения электромагнитного излучения в многослойных структурах [6].

эффциент отражения покрытия для ближнего ИК диапазона составлял  $R > 99,9$  %, лучевая прочность – не менее  $10 \text{ кВт/см}^2$ . Погрешность толщин при нанесении слоев составляла 2 %.

Длительность воздействия лазерного излучения на поверхность образца в экспериментах составляла 100 с. В процессе воздействия регистрировались: зависимость от времени мощности излучения, распределение интенсивности излучения в плоскости образца и температуры поверхности диэлектрического покрытия (измерялась тепловизором). Погрешность измерения температуры составляла  $\Delta T = \pm 1$  °C. Область воздействия на образце представляла собой равнобедренную трапецию с площадью  $S = 4,1 \text{ см}^2$ . Усредненная интенсивность излучения варьировалась от 1 до  $2,1 \text{ кВт/см}^2$ .

Результаты эксперимента

В результате экспериментов были зарегистрированы изменения температуры поверхности ОЭ за время воздействия  $\Delta T \approx 10\text{--}15$  °C при плотности мощности  $q = 1; 1,14 \text{ кВт/см}^2$  и  $\Delta T \approx 30$  °C при  $q = 1,52 \text{ кВт/см}^2$  (рис.2). Следует отметить, что при заявленном производителем коэффициенте отражения покрытия для  $R > 99,9$  % изменение температуры поверхности не должно превышать  $\Delta T \approx 1$  °C. Такое противоречие можно объяснить наличием области объемного поглощения в слоях (слое) диэлектрического покрытия (обусловленном наличием центров поглощения), или несоответствием величины коэффициента отражения покрытия заявленному значению.

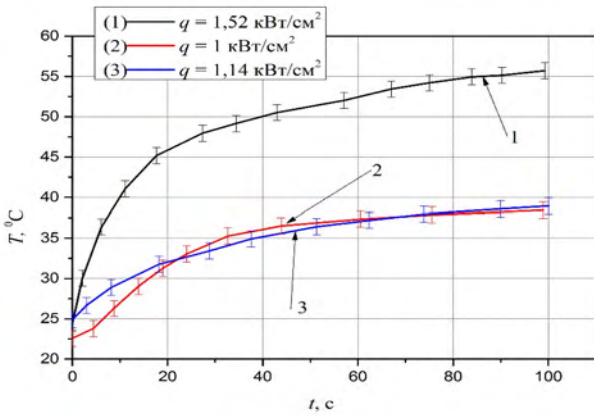


Рис. 2. Временная зависимость температуры поверхности диэлектрического напыления для разных значений интенсивности лазерного излучения

Для проверки данных предположений было проведено расчётное моделирование по воздействию непрерывного лазерного излучения высокой интенсивности на оптические элементы с отражающим диэлектрическим покрытием.

С использованием паспортных данных параметров слоев для исследуемого покрытия, рассчитана зависимость коэффициента отражения от длины волны лазерного излучения, приведенная на рис. 4 (рабочая длина волны нанесена вертикальной линией). Был определен коэффициент отражения  $R = 99,991\%$  для длины волны лазера. При учете погрешности в нанесении слоев коэффициент отражения может принять значения  $R_{\min} = 99,9869\%$  и  $R_{\max} = 99,993\%$ .

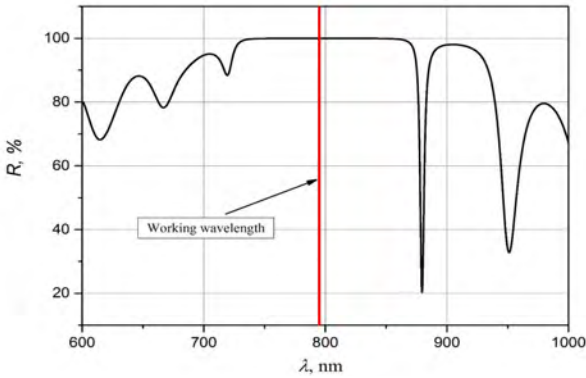


Рис. 4. Зависимость коэффициента отражения покрытия от длины волны

Зная показатель преломления  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ , а также значение толщин можно получить зависимость поглощения излучения от толщины слоя. Полагая, что изменение интенсивности лазерного излучения, при прохождении через поглощающий слой, подчиняется закону Бугера–Ламберта–Бэра, можно получить формулу для определения поглощенного излучения:

$$I_{\text{absorb}} = q_0 (1 - \exp(-\alpha h)), \quad (1)$$

где  $\alpha$  ( $\text{см}^{-1}$ ) – коэффициент поглощения,  $h$  (см) – толщина диэлектрического слоя,  $q_0$  ( $\text{Вт}/\text{см}^2$ ) – интенсивность лазерного излучения.

В данной работе  $\alpha h \ll 1$ , что позволяет пользоваться упрощенным выражением:

$$I_{\text{absorb}} = q_0 \alpha h. \quad (2)$$

Тогда количество поглощенной энергии в  $i$ -ом слое диэлектрика выразится следующим образом:

$$I_{\text{absorb}}(i) = q_0 \alpha h_i (1 - R_1)(1 - R_2) \dots (1 - R_i), \quad (3)$$

где  $R_i$  – интегральный коэффициент отражения  $i$ -го слоя,  $h_i$  (см) – толщина  $i$ -го слоя.

Расчет поглощенного излучения по формуле (3) позволяет получить зависимость поглощения излучения от толщины (рис. 5). На этом рисунке по оси ординат отложена поглощаемая интенсивность, которая нормирована на поглощаемую интенсивность в первом слое.

Объемное поглощение в покрытии может быть выражено зависимостью:

$$Q = q \delta W(z), \quad (4)$$

где  $\delta$  ( $\text{см}^{-1}$ ) – усредненный коэффициент объемного поглощения лазерного излучения,  $q$  ( $\text{Вт}/\text{см}^2$ ) – интенсивность лазерного излучения,  $W(z)$  – полиномиальная функция поглощения излучения от толщины.

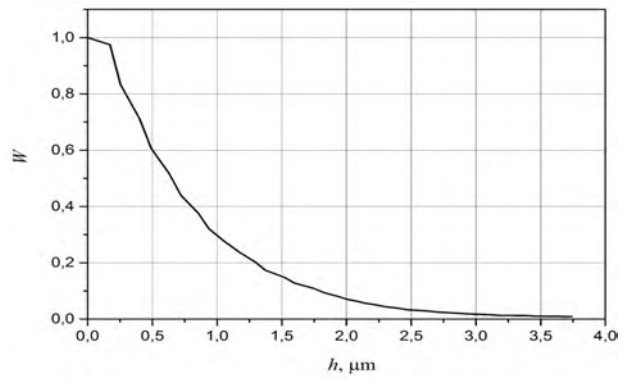


Рис. 5. Зависимость поглощения излучения от толщины покрытия

Моделирование проводилось в пакете программ «ЛОГОС». Покрытие рассматривалось, как единый материал с усредненными теплофизическими свойствами. Путем варьирования усредненного коэффициента объемного поглощения слоев необходимо получить температуры поверхностей ОЭ, наблюдаемые в эксперименте. Однако, даже при увеличении коэффициента до  $2 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$  предполагаемого нагрева не наблюдалось. Отсюда следует, что данный процесс не являлся причиной таких температур поверхностей.

Далее было сделано второе предположение о том, что коэффициент отражения покрытия меньше заявленного и часть проходящего излучения поглощается поверхностью одного или нескольких слоев из-за наличия в них центров поглощения.

В данном варианте расчетов в силу малости толщины покрытия и близких значений теплофизических свойств кварца и  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  использовались свойства кварца, а слои задавались единым целым вместе с подложкой. На область воздействия накладывалось граничное условие 2-го рода (тепловой поток) в виде:

$$q = q_f \varepsilon_f, \quad (5)$$

где  $q_f$  ( $\text{Вт}/\text{см}^2$ ) – интенсивность лазерного излучения,  $\varepsilon_f$  – коэффициент поверхностного поглощения.

Методом итерационных расчетов был подобран коэффициент поверхностного поглощения  $\varepsilon_f \approx 0,0003$ , при котором расчетный нагрев находился в хорошем согласии с экспериментальным. Результаты расчета приведены на рис. 6.

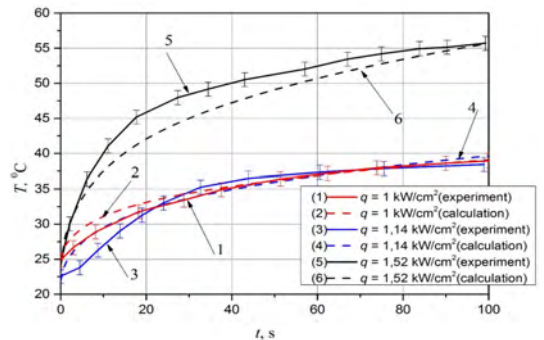


Рис. 6. Временная зависимость температуры поверхности образца с многослойным покрытием для различных значений интенсивности лазерного излучения

Из рис. 6 видно, что характер зависимости, как и значение температур поверхности, находятся в хорошем согласии с экспериментом. Данный факт означает, что выдвинутое предположение может объяснять полученные в экспериментах температуры поверхностей. Следует заметить, что возникновение поверхностного поглощения в слоях может наблюдаться только в случае, если коэффициент отражения покрытия отличается от заявленного. Такое может произойти при нанесении слоев с погрешностью порядка 5 % и более, в отчетных документах по покрытиям указывается погрешность в 2 %. Отсюда следует вывод, что для недопущения нежелательного нагрева образцов, нужно повышать требования по контролю толщин и качеству наносимых слоев.

### **Заключение**

Проведено расчетно-экспериментальное исследование нагрева кварцевой пластины с многослойным диэлектрическим покрытием непрерывным лазерным излучением.

Получены экспериментальные и расчетные зависимости температуры поверхности ОЭ от времени для различных вариантов интенсивности воздействия лазерного излучения.

Хорошее согласие расчетных и экспериментальных результатов указывает на то, что вероятной причиной нагрева ОЭ является наличие поверхностного поглощения одного или нескольких слоев. Возникновение поверхностного поглощения может быть связано с отклонением значения коэффициента отражения от заявленного, а также от качества нанесения самих слоев.

### **Литература**

1. Деркач И. Н., Кудряшов Е. А., Качалин Г. Н., Кирдяев Н. А., Ладейщикова В. В., Тимаев Д. С. // Письма в ЖЭТФ. 2018. Т. 108. Вып. 6. С. 404.
2. Garanin S., Khokhlov S., Manachinsky A., Starikov F. *Advances in Science and Technology*. Switzerland: Trans Tech Publications, 2013. Vol. 82. P. 75.
3. Гаранин С. Г., Маначинский А. Н., Стариков Ф. А., Хохлов С. В. *Автометрия* 48. 2012. № 2. С. 30.
4. Михеев М. А., Михеева И. М. *Основы теплопередачи*. М.: Энергия, 1967.
5. Пакет программ «ЛОГОС», версия 5. Свидетельство № 2017612306 от 20.02.2017.
6. Борн М., Вольф Э. *Основы оптики*. Изд. 2-е. перевод с английского. М.: Наука, 1973.