

**Шахно Е.А., Самохвалов А.А.**

**ЛАЗЕРНЫЕ МИКРО- И  
НАНОТЕХНОЛОГИИ**

**Учебно-методическое пособие по практическим  
работам**



**Санкт-Петербург  
2015**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**Шахно Е.А., Самохвалов А.А.**

**ЛАЗЕРНЫЕ МИКРО- И  
НАНОТЕХНОЛОГИИ**

**Учебно-методическое пособие по практическим  
работам**

**Санкт-Петербург  
2015**

**Шахно Е.А., Самохвалов А.А.** Лазерные микро- и нанотехнологии. Учебно-методическое пособие по практическим работам для студентов – СПб: Университет ИТМО, 2015. – 46 с.

Практические работы предназначены для магистрантов, проходящих обучение по курсу «Лазерные микро– и нанотехнологии». Рассмотрены математические модели различных физических процессов, возникающих вследствие воздействия лазерного излучения на твердые тела.

Настоящее учебное пособие может быть использовано студентами при самостоятельной работе в курсах «Лазерные микро- и нанотехнологии», «Оптотехнические основы фотонно-волновых технологий» и т.п., а также студентами–дипломниками и аспирантами.

Рекомендовано к печати Ученым советом факультета Лазерной и световой инженерии, протокол № 11 от 10.11.2015.

Рекомендовано УМО по образованию в области приборостроения и оптотехники в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки 12.04.05 – Лазерная техника и лазерные технологии, 12.04.02 – Оптотехника.



**Университет ИТМО** – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2015

© Шахно Е.А., Самохвалов А.А., 2015

## Оглавление

Введение.....	5
Практическая работа № 1. Определение характеристик температурного поля пленки методом интегральных преобразований в конечных пределах при ее локальном облучении импульсом наносекундного диапазона .....	6
Практическая работа № 2. Определение характеристик температурного поля пленки методом источников при ее локальном облучении импульсом наносекундного диапазона.....	12
Практическая работа № 3. Модель окисления пленки хрома сканирующим пучком непрерывного лазерного излучения .....	20
Практическая работа № 4. Исследование характеристик локального нагрева стеклокерамики при аморфизации излучением CO <sub>2</sub> лазера.....	27
Практическая работа № 5. Исследование процессов стеклования - кристаллизации стеклокерамики при воздействии непрерывного излучения Nd:YAG лазера .....	34

## **Введение**

Лазерные микро- и нанотехнологии являются интенсивно развивающейся областью человеческого знания. Большое число связанных между собой физических процессов, происходящих при лазерной микро- и нанообработке затрудняет их полное математическое описание, поэтому в каждом конкретном случае важно выделить основную причину наблюдаемого явления и получить количественные оценки параметров процесса с точностью лучшей, чем по порядку величины. Для решения такого рода задач используются численные методы, реализация которых является весьма трудоемкой, а полученные решения не всегда позволяют ясно представить общую физическую картину исследуемого процесса. Поэтому своего рода альтернативой являются аналитические и приближенные методы, которые позволяют получить и проанализировать основные закономерности физических процессов при лазерной микро- и нанообработке твердых тел.

Настоящее пособие содержит практически работы, служащие для закрепления знания, полученных в курсах лекций «Лазерные микро- и нанотехнологии», «Оптическое основы фотонно-волновых технологий». В представленных практических работах с помощью полученных для конкретных условий задачи аналитических решений уравнений в частных производных рассматриваются процессы лазерного нагрева, термохимического действия лазерного излучения, фазово-структурной модификации стеклокерамических материалов. В пособии также дано описание математических методов расчета, наиболее подходящих для рассматриваемых физических процессов при лазерной обработке.

## **Практическая работа № 1. Определение характеристик температурного поля пленки методом интегральных преобразований в конечных пределах при ее локальном облучении импульсом наносекундного диапазона**

Целью лабораторной работы является приобретение студентами представлений об особенностях формирования температурного изображения при лазерном нагреве тонких поглощающих пленок и навыков в расчете тепловых полей пленок.

### **Основные теоретические представления**

Лазерная обработка тонких пленок широко используется в электронном и оптическом приборостроении, в микроэлектронике, в информационных системах, в системах управления и средствах автоматизации и во многих других областях науки и техники. Сфера применения тонких пленок постоянно расширяется. Одновременно повышаются требования к их точности и качеству. Поскольку все технологии лазерной обработки пленок основаны на процессах нагревания их лазерным излучением, то в вопросах точности лазерной обработки принципиально важным становится вопрос термических искажений изображения.

Термические искажения определяются тепловым характером регистрации изображений на пленке и органически присущи всем термическим методам лазерной обработки. Термические искажения изображения заключаются в отклонении температурного изображения от оптического; различают термические искажения размеров и формы изображения. Искажения размеров изображения проявляются в изменении размеров элементов изображения (по сравнению с облученной областью) и перемычек между ними. Искажения формы изображения преимущественно заключаются в скруглении углов. Термические искажения изображения заключаются в отклонении температурного изображения (области, ограниченной изотермой соответствующей температуры) от оптического и проявляются в изменении размеров и формы элементов изображения и перемычек между ними. Для исследования термических искажений изображения необходимо определить характер пространственного распределения температуры пленки в зависимости от конфигурации облученной области на ее поверхности, а также зависимость температуры облучаемой пленки от параметров режима воздействия.

Рассмотрим локальное лазерное нагревание пленки импульсами наносекундного диапазона при прямоугольной форме облученной области, причем будем считать, что ее размеры  $l_x$  и  $l_y$  достаточно велики ( $l_x, l_y \gg \sqrt{a_1\tau} \sim 1$  мкм). В таких условиях пленку можно считать адиабатически изолированной от подложки. Температурное поле пленки может быть получено из решения краевой задачи:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = \begin{cases} \frac{qA}{\rho ch}, & \text{если } |x| \leq \frac{l_x}{2} \text{ и } |y| \leq \frac{l_y}{2} \\ 0, & \text{если } |x| > \frac{l_x}{2} \text{ и/или } |y| > \frac{l_y}{2} \end{cases} \quad (1.1)$$

$$T|_{t=0} = T_{нач}; \quad T|_{x=\pm L_x} = T|_{y=\pm L_y} = T_{нач}.$$

Здесь  $L_x$  и  $L_y$  – размеры пленки,  $T_{нач}$  – начальная температура (температура окружающей среды).

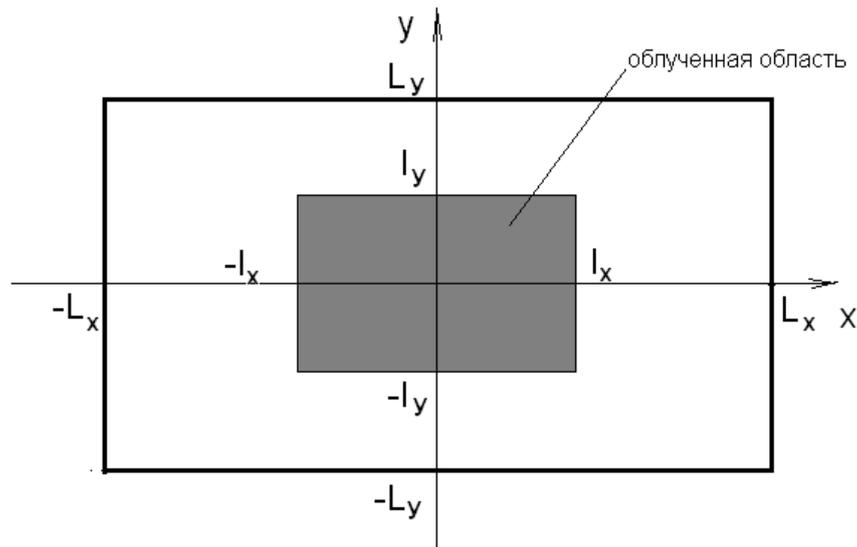


Рисунок 1.1. К постановке задачи работы 1.

Для решения системы (1.1) используем косинус-преобразование Фурье в конечных пределах по координатам  $x$  и  $y$ .

Интегральные преобразования в конечных пределах представляют собой разновидность интегральных преобразований – довольно широкого класса операций, устанавливающих взаимно однозначное соответствие между функциями-оригиналами некоторого аргумента и функциями-изображениями, зависящими от параметра. При решении задач теплопроводности правильный выбор вида интегрального преобразования позволяет существенно упростить уравнение теплопроводности, преобразовав уравнение в частных производных в обыкновенное дифференциальное уравнение. Примерами интегральных преобразований является преобразование Лапласа, преобразование Фурье, преобразование Ганкеля (см. например [4]).

Интегральные преобразования в конечных пределах отличаются тем, что изображение функции представлено набором бесконечного количества функций  $F_k$ , пределы интегрирования при переходе от функции-оригинала  $f$  к ее изображению  $F_k$  конечные, при этом обратный переход от функции-изображения к оригиналу представляет собой бесконечный сходящийся ряд.

В частности, для конечного косинус-преобразования Фурье

$$F_k = \int_0^b f(x) \cos \frac{k\pi}{b} x dx \quad (1.2)$$

$$f(x) = \frac{F_0}{b} + \frac{2}{b} \sum_{k=1}^{\infty} F_k \cos \frac{k\pi}{b} x \quad (1.3)$$

Величина  $b$  при решении задачи теплопроводности выбирается соответствующей размеру нагреваемого объекта.

Уравнение теплопроводности решается с помощью метода интегральных преобразований в конечных пределах по координатам  $x$  и  $y$ . Решение краевой задачи (1.1) имеет вид:

$$T|_{t=\tau} = \frac{q_0 A \tau}{\rho c h} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \left\{ \cos \left[ (2n+1) \pi \frac{x}{L_x} \right] \cos \left[ (2k+1) \pi \frac{y}{L_y} \right] \frac{B_{nk}}{\gamma_{nk}} (1 - e^{-\gamma_{nk}}) \right\} + T_{нач}, \quad (1.4)$$

где коэффициенты  $B_{nk}$  зависят от геометрии системы,  $\gamma_{nk}$  — от соотношения размеров образца и размеров области, прогретой за время действия импульса излучения:

$$B_{nk} = \frac{s \left[ i\pi(2n+1) \frac{l_x}{L_x} \right] s \left[ i\pi(2k+1) \frac{l_y}{L_y} \right]}{\pi^2 (2n+1)(2k+1)} \quad (1.5)$$

$$\gamma_{nk} = \left[ \frac{\pi(2n+1)}{L_x / \sqrt{a_1 \tau}} \right]^2 + \left[ \frac{\pi(2k+1)}{L_y / \sqrt{a_1 \tau}} \right]^2 \quad (1.6)$$

### Литература

1. Вейко В.П. Лазерная обработка пленочных элементов. Л.: Машиностроение, 1986.
2. Беляев Н.М., Рядно А.А. Методы нестационарной теплопроводности. М.: Высшая школа, 1978.
3. Шахно Е.А. Аналитические методы расчета лазерных микро- и нанотехнологий. Учебное пособие. Издание СПбГУ ИТМО, 2009.
4. Г.Корн, Т.Корн. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.:Наука, 1974.

### Задание

1. Исследовать пространственное распределение максимальной температуры пленки при ее импульсном лазерном облучении (облученная область имеет вид прямоугольника размерами  $l_x$  и  $l_y$ ) по линии  $y=0$  по координате  $x$  в диапазоне значений  $x$  от  $-1,5l_x$  до  $1,5l_x$ . Определить отношение температур на границе (в середине стороны) и в центре облученной области.

2. Исследовать пространственное распределение максимальной температуры пленки при ее импульсном лазерном облучении по стороне  $y=l_y$  в диапазоне значений  $x$  от  $-1,5l_x$  до  $1,5l_x$ . Определить отношение температур в углу облученной области и в середине стороны.

3. Исследовать пространственное распределение максимальной температуры пленки по стороне  $x=l_x$  в диапазоне значений  $y$  от  $-1,5l_x$  до  $1,5l_x$ .

4. При проведении расчетов число членов суммирования ограничить величиной  $N$ , обеспечивающей точность 0,1%. Определить величину  $N$ .

При проведении расчетов принять значения параметров:

$$T_{нач} = 20^\circ\text{C}$$

$$h = 10^{-7} \text{ м,}$$

лазер: Nd:YAG,

длина волны излучения  $\lambda = 1,06$  мкм,

$$\tau = 10^{-8} \text{ с.}$$

Значение параметров  $q_0, \rho, c, k, A, l_x, l_y, L_x$  и  $L_y$  выбрать в соответствии с вариантом исходных данных (Таблица 1.1).

### Используемые расчетные формулы

Выражение для определения температурного распределения в пленке, полученное с помощью метода интегральных преобразований в конечных пределах по координатам  $x$  и  $y$ :

$$T|_{t=\tau} = \frac{q_0 A \tau}{\rho c h} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \left\{ \cos \left[ (2n+1) \pi \frac{x}{L_x} \right] \cos \left[ (2k+1) \pi \frac{y}{L_y} \right] \frac{B_{nk}}{\gamma_{nk}} (1 - e^{-\gamma_{nk}}) \right\} + T_{нач},$$

где коэффициенты  $B_{nk}$  и  $\gamma_{nk}$

$$B_{nk} = \frac{s \left[ i\pi(2n+1) \frac{l_x}{L_x} \right] s \left[ i\pi(2k+1) \frac{l_y}{L_y} \right]}{\pi^2 (2n+1)(2k+1)},$$

$$\gamma_{nk} = \left[ \frac{\pi(2n+1)}{L_x / \sqrt{a_1 \tau}} \right]^2 + \left[ \frac{\pi(2k+1)}{L_y / \sqrt{a_1 \tau}} \right]^2.$$

**Таблица 1.1. Варианты исходных данных**

№ варианта	Плотность мощности падающего излучения $q_0$ , МВт/см <sup>2</sup>	Материал пленки	Размеры облученной области		Размеры участка пленки	
			$l_x$ , мкм	$l_y$ , мкм	$L_x$ , мкм	$L_y$ , мкм
1	50	Al	10	15	300	400
2	20	Fe	10	15	300	400
3	200	Au	10	15	300	400
4	200	Au	10	10	200	200
5	10	Cr	10	15	300	400
6	10	Cr	10	10	200	200
7	50	Cu	10	15	300	400
8	50	Cu	10	10	200	200
9	30	Ni	10	15	300	400
10	30	Ni	10	10	200	200

**Таблица 1.2. Для справки. Свойства материалов**

	Плотность $\rho$ , 10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup>	Теплоемкость $c$ , Дж/кг·К	Теплопроводность $k$ , Вт/м·К	Поглощательная способность $A$
Al	2,7	920	233	0,07
Fe	7,9	450	50	0,37
Au	19,3	128	300	0,02
Cr	7,1	460	45	0,43
Cu	8,2	386	373	0,09
Ni	8,7	440	68	0,26

**Алгоритм расчета***Подготовительные действия*

- Задать значения  $q_0$ ,  $\rho$ ,  $c$ ,  $k$ ,  $A$ ,  $l_x$ ,  $l_y$ ,  $L_x$ ,  $L_y$ ,  $T_{нач}$ ,  $h$ ,  $\tau$ .
- Вычислить значение  $a$ , используя значения  $\rho$ ,  $c$ ,  $k$ .

1. Исследовать пространственное распределение максимальной температуры пленки при ее импульсном лазерном облучении (облученная область имеет вид прямоугольника размерами  $l_x$  и  $l_y$ ) по линии  $y=0$  по координате  $x$  в диапазоне значений  $x$  от  $-1,5 l_x$  до  $1,5 l_x$ . Определить отношение температур на границе (в середине стороны) и в центре облученной области.

- Записать выражение для  $B_{nk}$  и  $\gamma_{nk}$ .
- Установить количество итераций цикла  $N=100$ .
- Рассчитать зависимость  $T(x, y=0)$  в диапазоне значений  $x$  от  $-1,5 l_x$  до  $1,5 l_x$  и построить график функции  $T(x, y=0)$ .

– Определить отношение температур на границе (в середине стороны) и в центре облученной области  $T(x=l_x, y=0)/T(x=0, y=0)$ .

2. *Исследовать пространственное распределение максимальной температуры пленки при ее импульсном лазерном облучении по стороне  $y=l_y$  в диапазоне значений  $x$  от  $-1,5l_x$  до  $1,5l_x$ . Определить отношение температур в углу облученной области и в середине стороны.*

– Рассчитать зависимость  $T(x, y=l_y)$  в диапазоне значений  $x$  от  $-1,5l_x$  до  $1,5l_x$  и построить график функции  $T(x, y=l_y)$ .

– Определить отношение температур в углу облученной области и в середине стороны  $T(x=l_x, y=l_y)/T(x=0, y=l_y)$ .

3. *Исследовать пространственное распределение максимальной температуры пленки по стороне  $x=l_x$  в диапазоне значений  $y$  от  $-1,5l_x$  до  $1,5l_x$ .*

– Рассчитать  $T(x=l_x, y)$  в диапазоне значений  $y$  от  $-1,5l_x$  до  $1,5l_x$  и построить график функции  $T(x=l_x, y)$ .

4. *Сделать выводы по полученным результатам.*

## Практическая работа № 2. Определение характеристик температурного поля пленки методом источников при ее локальном облучении импульсом наносекундного диапазона

Целью лабораторной работы является приобретение студентами представлений о лазерном нагреве тонких поглощающих пленок и навыков в расчете тепловых полей облучаемых лазером объектов и выборе адекватных значений плотности мощности лазерного излучения, необходимых для осуществления обработки.

### Основные теоретические представления

Формирование топологии пленочных элементов производится путем локального облучения поверхности пленки, находящейся на подложке, пучком лазерного излучения, сформированным оптической системой в соответствии с заданным технологическим рисунком. Длина волны лазерного излучения при этом должна лежать в спектральной области сильного поглощения излучения веществом пленки, чтобы обеспечить ее эффективное нагревание. Нагревание пленки в облученной области до заданной температуры вызывает в ней фазовые или структурные изменения или химические реакции. В результате в облученной области происходит формирование пленочной топологии, т.е. образование областей в соответствии с заданным рисунком, где пленка отсутствует или изменены ее физические свойства или химический состав. Таким образом, для осуществления качественной обработки тонких пленок необходимо знать пространственное распределение температуры в пленке, формирующееся при локальном импульсном воздействии на нее лазерного излучения.

Одним из наиболее распространенных методов исследования температурного поля является метод источников (метод функций Грина). Он позволяет определить распределение температуры в теле при заданных начальном и граничных условиях без непосредственного решения уравнения теплопроводности.

Из теории теплопроводности следует, что если в некоторой точке бесконечного  $n$ -мерного тела с нулевой начальной температурой в некоторый момент времени  $t'$  действует точечный мгновенный источник единичной энергии, то температурное распределение в бесконечном теле в момент времени  $t$  будет следующим:

$$T_{TM1} = \frac{1}{\rho c [4\pi a(t-t')]^{n/2}} \exp\left[-\frac{\Delta r^2}{4a(t-t')}\right], \quad (2.1)$$

где  $\rho$ ,  $c$ ,  $a$  – плотность, теплоемкость, температуропроводность тела,  $\Delta r$  – расстояние между точкой, в которой определяется температура, и точкой, в которой была выделена энергия.

Заметим, что с физической точки зрения в формуле (2.1) единица в числителе имеет размерность Дж/м<sup>3-n</sup>.

Решение конкретной задачи теплопроводности в области  $\Omega_0$  методом источников использует принцип суперпозиции температурных полей и сводится к отысканию совокупности точечных мгновенных источников, общее действие которых вызывает температурное распределение в бесконечном теле, которое в области  $\Omega_0$  тождественно температурному распределению в данной задаче, и последующему сложению (или интегрированию) температурных распределений для этой совокупности точечных мгновенных источников.

### Основные методики определения совокупности элементарных источников

Рассмотрим процедуру суммирования температур от элементарных тепловых источников более подробно.

1. Если энергия точечного мгновенного источника не единичная, а равна некоторому значению  $E$ , то температурное распределение от такого источника:

$$T_{TM} = ET_{TM1}. \quad (2.2)$$

2. Если точечный источник продолжительно действующий, то он может быть представлен в виде совокупности точечных мгновенных источников, действующих последовательно:

$$T_{TM} = ET_{TM1} = T_{TM1} P dt. \quad (2.3)$$

Таким образом, если в момент времени  $t$  источник еще действует, то

$$T_T = \int_0^t P(t') T_{TM1} dt'. \quad (2.4)$$

Для моментов времени после окончания действия источника ( $t > \tau$ ):

$$T_T = \int_0^{\tau} P(t') T_{TM1} dt'. \quad (2.5)$$

3. Если источник не точечный, а имеет какое-то распределение в области  $\Omega'$ , с координатами  $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$ , то он может быть представлен в виде совокупности точечных источников, распределенных в этой области:

$$T = \int_{\Omega'} T_T d\Omega = \iiint_{\Omega'} \int_0^t Q(x', y', z', t') T_{TM1} dx' dy' dz' dt', \quad (2.6)$$

где  $Q$  – объемная плотность мощности источника.

4. Размерность пространства определяется количеством координатных направлений, в которых распространяются тепловые потоки (см. рис. 2.1).

#### Примеры

а) Источник представляет собой область на поверхности полубесконечного тела: размерность пространства  $n=3$ .

б) Источник представляет собой полосу на поверхности полубесконечного тела: размерность пространства  $n=2$ .

в) Источник представляет собой плоскость – границу полубесконечного тела: размерность пространства  $n=1$ .

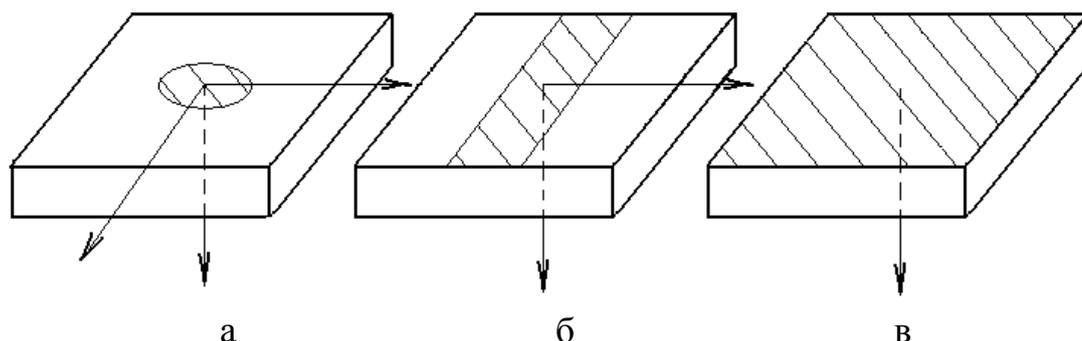


Рисунок 2.1. К определению размерности пространства в тепловой задаче. Штриховкой обозначена область источника (в частности, при нагреве металла лазерным излучением – облученная область): а)  $n=3$ , б)  $n=2$ , в)  $n=1$ .

5. Если тело занимает не все пространство, а только его часть – область  $\Omega_0$ , то точечные источники подбираются для бесконечного тела таким образом, чтобы результирующее температурное поле в области  $\Omega_0$  бесконечного тела было тождественно температурному полю ограниченного тела в задаче.

6. Если в реальной теплофизической задаче изменение температурного распределения происходит вследствие действия тепловых потоков на границах тела, то совокупность точечных источников подбирается таким образом, чтобы температурное распределение в бесконечном теле, обусловленное действием этих источников, соответствовало температурному распределению в реальной задаче.

7. Метод источников может быть использован при определении температуры тела, подвергнутого воздействию движущегося источника тепла (например, при обработке поверхности сканирующим пучком лазерного излучения). В этом случае расстояние  $\Delta r$  между источником и точкой, в которой определяется температура, становится зависящим от времени действия источника  $t'$ . Например, при прямолинейном движении точечного источника по оси  $x$  от точки  $x=0$  с постоянной скоростью  $V$  в трехмерном теле это расстояние определяется выражением  $\Delta r = (Vt' - x)^2 + y^2 + z^2$ .

#### Примеры решения конкретных задач

Пример 1. Производится облучение тонкой поглощающей пленки толщиной  $h$ . Облученная область представляет собой половину ее поверхности ( $x' \leq 0$ ). Плотность мощности излучения распределена равномерно по облученной области и во времени. Определить распределение температуры по поверхности пленки во время действия импульса излучения.

Проанализируем условия задачи:

1)  $n=1$ ;

- 2) источник продолжительного действия;
- 3) распределение источников – равномерное,  $x' \leq 0$ ;
- 4)  $\Delta r = x - x'$  ( $x'$  – координата точечного источника).

Температура одномерного тела при действии на него точечного мгновенного единичного источника:

$$T_{TM1}(x, t) = \frac{1}{\rho c [4\pi a(t-t')]^{1/2}} \exp\left[-\frac{(x-x')^2}{4a(t-t')}\right]. \quad (2.7)$$

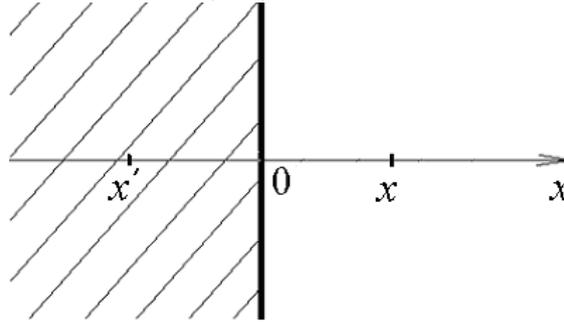


Рисунок 2.2. К задаче 1.

При действии источника с энергией  $\frac{q_0(1-R)dt'dx'}{h}$

$$T_{TM} = \frac{qdt'dx'}{\rho ch [4\pi a(t-t')]^{1/2}} \exp\left[-\frac{(x-x')^2}{4a(t-t')}\right]. \quad (2.8)$$

Интегрируя по  $t'$  и  $x'$ , определим зависимость  $T(x, t)$  во время действия излучения:

$$T = \int_{-\infty}^0 \int_0^t \frac{q_0(1-R)}{\rho ch [4\pi a(t-t')]^{1/2}} \exp\left[-\frac{(x-x')^2}{4a(t-t')}\right] dx' dt'. \quad (2.9)$$

В результате интегрирования получим:

$$T = \frac{2q_0(1-R)t}{\rho ch} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{at}}. \quad (2.10)$$

В этом выражении значение температуры отсчитывается от начального значения. Для вычисления температуры по реальной шкале (в градусах Цельсия или Кельвина) к полученному выражению следует прибавить значение начальной температуры.

Пример 2. Производится облучение тонкой поглощающей пленки толщиной  $h$ . Облученная область – квадрант ( $x' \geq 0, y' \geq 0$ ). Плотность мощности излучения распределена равномерно по облученной области и во времени. Определить температуру в точке ( $x=0, y=0$ ) в момент времени  $t \leq \tau$ .

Проанализируем условия:

- 1)  $n = 2$ ;
- 2) источник продолжительного действия;
- 3) распределение источника – равномерное в облученной области ( $x' \geq 0, y' \geq 0$ );
- 4)  $\Delta r^2 = (x')^2 + (y')^2$ .

Температура в точке  $(x = 0, y = 0)$  при действии точечного мгновенного единичного источника:

$$T_{TM1} = \frac{1}{\rho c [4\pi a(t-t')]} \exp\left[-\frac{x'^2 + y'^2}{4a(t-t')}\right], \quad (2.11)$$

При действии источника с энергией  $\frac{q_0(1-R)dt'dx'dy'}{h}$ :

$$T_{TM} = \frac{q_0(1-R)dt'dx'dy'}{\rho ch [4\pi a(t-t')]} \exp\left[-\frac{x'^2 + y'^2}{4a(t-t')}\right]. \quad (2.12)$$

Интегрируя по  $x', y', t'$ , определим  $T(x = 0, y = 0, t)$  при  $t \leq \tau$ :

$$T = \int_{t'=0}^t \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{q_0(1-R)}{\rho ch [4\pi a(t-t')]} \exp\left[-\frac{x'^2 + y'^2}{4a(t-t')}\right] dt'dx'dy' = \frac{q_0(1-R)t}{4\rho ch}. \quad (2.13)$$

В окончательном ответе, аналогично примеру 1, необходимо учесть значение начальной температуры.

### Литература

1. Вейко В.П. Лазерная обработка пленочных элементов. Л.: Машиностроение, 1986.
2. Шахно Е.А. Аналитические методы расчета лазерных микро- и нанотехнологий. Учебное пособие. Издание СПбГУ ИТМО, 2009.
3. Н.М.Беляев, А.А.Рядно. Методы нестационарной теплопроводности. М.: Высшая школа, 1978.

### Задание

1. Исследовать пространственное распределение температуры пленки в момент окончания импульса при ее импульсном лазерном облучении (облученная область имеет вид узкой длинной полосы шириной  $2b$ ) по координате  $x$  (в направлении, перпендикулярном длинной стороне облученной области) в диапазоне значений  $x$  от 0 до  $2b$  (см. рисунок 2.3).

Определить отношение температур на границе и в середине облученной области.

2. Определить распределение градиентов температуры по координате  $x$  в диапазоне значений  $x$  от 0 до  $2b$ . Отметить значение градиента температуры на границе облученной области.

3. Определить пороги плавления и испарения (в середине облученной области).

При проведении расчетов принять значения параметров:

$$T_{нач} = 20^\circ\text{C},$$

$$h = 10^{-7} \text{ м},$$

лазер: Nd:YAG,

длина волны излучения  $\lambda = 1,06 \text{ мкм}$ ,

$$\tau = 10^{-8} \text{ с}.$$

Значение параметров  $q_0$ ,  $\rho$ ,  $c$ ,  $k$ ,  $R$ ,  $T_{пл}$ ,  $T_{кин}$  и  $b$  выбрать в соответствии с вариантом исходных данных.

### Используемые расчетные формулы

Для облучения тонкой пленки импульсом длительностью порядка 10 нс теплоотвод в подложку незначителен и нагревание пленки можно считать адиабатическим. При достаточно больших размерах пленки и облученной области в виде длинной полосы на ее поверхности ( $-b \leq x \leq b$ )

- 1)  $n = 1$ ;
- 2) источник продолжительного действия;
- 3) распределение источников – равномерное, ( $-b \leq x \leq b$ );
- 4)  $\Delta r = x - x'$ .

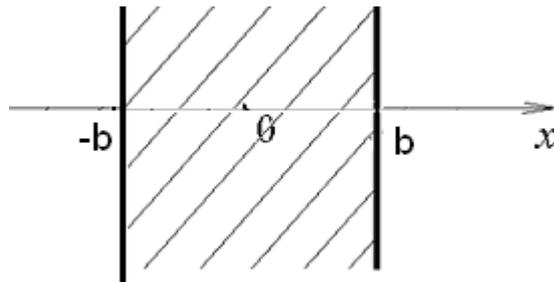


Рисунок 2.3. К заданию по работе 2.

Температура пленки в любой ее точке в момент окончания импульса излучения определяется путем интегрирования по  $t'$  и  $x'$ :

$$T = \frac{q_0(1-R)}{\rho ch} \int_{-b}^b \int_0^\tau \frac{1}{[4\pi a(\tau-t')]^{1/2}} \exp\left[-\frac{(x-x')^2}{4a(\tau-t')}\right] dx' dt' + T_{нач}.$$

Градиент температуры:

$$\begin{aligned} \text{grad} T &= \frac{dT}{dx} = \frac{q_0(1-R)}{\rho ch} \int_{-b}^b \int_0^\tau \frac{1}{[4\pi a(\tau-t')]^{1/2}} \frac{d}{dx} \left\{ \exp\left[-\frac{(x-x')^2}{4a(\tau-t')}\right] \right\} dx' dt' = \\ &= -\frac{q_0(1-R)}{\rho ch} \int_{-b}^b \int_0^\tau \frac{1}{[4\pi a(\tau-t')]^{1/2}} \frac{x-x'}{2a(\tau-t')} \left\{ \exp\left[-\frac{(x-x')^2}{4a(\tau-t')}\right] \right\} dx' dt' \end{aligned}$$

Порог начала плавления (в центре облученной области) определяется как плотность мощности излучения, при которой температура в центре облученной области  $x = 0$  достигает температуры плавления  $T_{пл}$ :

$$q_{0пл} = \frac{\rho ch(T_{пл} - T_{нач})}{(1-R) \int_{-b}^b \int_0^\tau \frac{1}{[4\pi a(\tau-t')]^{1/2}} \exp\left[-\frac{(x')^2}{4a(\tau-t')}\right] dx' dt'}$$

Аналогично по значению температуры кипения материала при нормальном давлении  $T_{кип}$  определяется порог начала испарения.

$$q_{0кип} = \frac{\rho ch(T_{кип} - T_{нач})}{(1-R) \int_{-b}^b \int_0^\tau \frac{1}{[4\pi a(\tau-t')]^{1/2}} \exp\left[-\frac{(x')^2}{4a(\tau-t')}\right] dx' dt'}$$

**Таблица 2.1. Варианты исходных данных**

№ варианта	Плотность мощности падающего излучения $q_0$ , МВт/см <sup>2</sup>	Полуширина облученной области $b$ , мкм	Материал пленки
1	50	1	Al
2	50	2	Al
3	200	1	Au
4	200	2	Au
5	10	1	Cr
6	10	2	Cr
7	50	1	Cu
8	50	2	Cu
9	30	1	Ni
10	30	2	Ni

**Таблица 2.2. Для справки. Свойства материалов**

	Плотность $\rho$ , 10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup>	Теплоемкость $c$ , Дж/кг·К	Теплопроводность $k$ , Вт/м·К	Коэффициент отражения $R$	Температура плавления $T_{пл}$ , °С	Температура кипения $T_{кип}$ , °С
Al	2,7	920	233	0,93	660	2447
Au	19,3	128	300	0,98	1063	2700
Cr	7,1	460	45	0,57	1903	2642
Cu	8,2	386	373	0,91	1083	2595
Ni	8,7	440	68	0,74	1453	2800

## Алгоритм расчета

### Подготовительные действия

- Задать значения  $q_0, \rho, c, k, R, b, T_{\text{пл}}, T_{\text{кип}}, T_{\text{нач}}, h, \tau$ .
- Вычислить значение  $a$ , используя значения  $\rho, c, k$ .

1. Исследовать пространственное распределение температуры пленки в момент окончания импульса при ее импульсном лазерном облучении (облученная область имеет вид узкой длинной полосы шириной  $2b$ ) по координате  $x$  (в направлении, перпендикулярном длинной стороне облученной области) в диапазоне значений  $x$  от 0 до  $2b$  (см. рисунок 2.3).

Определить отношение температур на границе и в середине облученной области.

- Записать выражение для  $T$ .
- Вычислить значение  $T$  при  $x=b$ .
- Вычислить значение  $T$  при  $x=0$ .
- Вычислить отношение  $T(x=b)/T(x=0)$ .
- Построить график функции  $T(x)$ .

2. Определить распределение градиентов температуры по координате  $x$  в диапазоне значений  $x$  от 0 до  $2b$ . Отметить значение градиента температуры на границе облученной области.

- Записать выражение для  $\text{grad}T$ .
- Вычислить значение  $\text{grad}T$  при  $x=b$ .
- Построить график функции  $\text{grad}T(x)$ .

3. Определить пороги плавления и испарения (в середине облученной области).

- Записать выражение для  $q_{0\text{пл}}$  при  $x=0$  и вычислить его.
- Записать выражение для  $q_{0\text{кип}}$  при  $x=0$  и вычислить его.

4. Сделать выводы по полученным результатам.

### **Практическая работа № 3. Модель окисления пленки хрома сканирующим пучком непрерывного лазерного излучения**

Целью лабораторной работы является приобретение студентами представлений о термохимическом действии лазерного излучения на металлические пленки и навыков в расчете результатов лазерного воздействия и в выборе адекватных значений параметров лазерной обработки.

#### **Основные теоретические представления**

Термохимическое действие лазерного излучения может быть положено в основу ряда технологических процессов записи на тонких пленках. Под действием локального лазерного нагрева в тонких пленках протекают химические процессы, локализованные в пределах нагреваемой зоны, т.е. образуется скрытое «термохимическое» изображение. Эта область отличается по своим физическим и химическим или оптическим свойствам от исходной пленки.

Для изготовления высококачественных дифракционных оптических элементов используется метод записи, включающий в себя экспонирование движущейся с постоянной скоростью подложки, покрытой пленкой хрома, и ее последующую химическую обработку в специальном селективном травителе. Экспонирование производится сфокусированным излучением мощного непрерывного лазера (видимого или УФ диапазона). Формирование изображения осуществляется в процессе кругового или спирального сканирования светового пятна. Особенностью записи изображения в полярной системе координат является то, что время экспонирования пленки в центре и на периферии существенно различаются, что обусловлено изменением скорости движения записывающего пучка. При записи на вращающуюся подложку время экспозиции меняется на несколько порядков. Большинство известных фотоматериалов не обладает линейным откликом в таком широком диапазоне изменения экспозиции. В особенности это относится к лазерным термохимическим методам. При записи структуры фотошаблона этим методом необходимо тщательно контролировать мощность записывающего лазерного пучка.

Рассмотрим окисление тонкой пленки хрома на подложке из стекла К-8, происходящее при воздействии сфокусированного на ее поверхности пучка непрерывного сканирующего лазерного излучения. При падении излучения на поверхность пленки происходит его частичное отражение, частичное поглощение в материале пленки. Воздействие на каждую точку происходит в течение некоторого времени, определяемого диаметром пучка и скоростью сканирования, когда пучок излучения проходит эту точку. Поглощение излучения приводит к нагреванию пленки в облученной области и вблизи нее. При нагревании пленки в ней активизируется целый ряд физико-химических процессов, таких как адсорбция кислорода на поверхности,

диффузия и электроперенос ионов металла и кислорода, химическая реакция окисления металла с образованием слоя оксида и т.п. Конкретная зависимость изменения толщины слоя оксида  $H$  от температуры  $T$  определяется соотношением скоростей указанных процессов. Окисление пленок хрома при микросекундном лазерном воздействии описывается вагнеровским законом окисления, согласно которому

$$\frac{dH}{dt} = \frac{B}{H} \exp\left(-\frac{T_a}{T}\right) \quad (3.1)$$

где  $B$  – константа параболического окисления,  $T_a$  – энергия активации диффузионных процессов, выраженная в Кельвинах,  $t$  – текущее время.

Для вычисления толщины слоя оксида в условиях неизотермического окисления воспользуемся подходом, разработанным М.Н.Либенсоном. Поскольку температура пленки оказывается существенно меньше значения  $T_a$ , то активационная экспонента резко растет с температурой и основной вклад в увеличение толщины окисной пленки вносят те моменты времени, когда температура  $T$  близка к своему максимальному значению  $T_{\max}$ . Это позволяет определить толщину слоя оксида в условиях лазерного (неизотермического) нагрева как эквивалентную толщине слоя оксида при изотермическом нагреве в течение некоторого эквивалентного времени (меньшего времени воздействия излучения)  $t_e$ :

$$H = \sqrt{2B \exp\left(-\frac{T_a}{T_{\max}}\right) t_e}. \quad (3.2)$$

Значение времени  $t_e$  определяется характером изменения во времени температуры при лазерном воздействии. В частности, если максимум температуры достигается в момент времени  $t_0$  внутри интервала лазерного воздействия, то

$$t_e = \sqrt{\frac{2\pi T_{\max}^2}{T_a |T''(t_0)|}} \quad (3.3)$$

Таким образом, определение зависимости температуры пленки от времени в каждой точке пленки позволяет определить структуру образующегося оксида.

Последующее травление пленки формирует ее топологию за счет удаления участков пленки, не защищенных слоем оксида достаточной толщины. Значение этой критической толщины зависит от процесса травления и обычно составляет примерно 2 нм.

#### Расчет толщины слоя оксида при действии сканирующего пучка непрерывного лазерного излучения

Рассмотрим нагревание металлической пленки толщиной  $h$ , находящейся на диэлектрической подложке, пучком непрерывного

сканирующего лазерного излучения с гауссовым распределением интенсивности. Будем рассматривать квазистационарный режим нагревания. Предварительно проведенные оценочные расчеты дают соотношение тепловых потоков из облученной области в пленку  $P_1$  и в подложку  $P_2$ :

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{2h}{r_0} \sqrt{\frac{a}{a_s}} \quad (3.4)$$

где  $r_0$  - радиус пучка излучения,  $a$  - температуропроводность пленки,  $a_s$  - температуропроводность подложки. Для большинства практически важных случаев  $\frac{P_1}{P_2} > 1$ , в частности, для пленки хрома толщиной 100 нм на подложке

из стекла К-8 при радиусе облученной области 0,25 мкм  $\frac{P_1}{P_2} \approx 4$ .

Это позволяет рассматривать пленку, нагреваемую лазерным излучением как адиабатически изолированную, пренебрегая теплоотводом в подложку.

Уравнение теплопроводности для пленки имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = \frac{P(1-R)}{\pi r_0^2 \rho c h} \exp \left[ -\frac{(x-Vt)^2 + y^2}{r_0^2} \right], \quad (3.5)$$

где  $P$  - мощность лазерного излучения,  $T$  - температура пленки,  $\rho$  - плотность пленки,  $c$  - теплоемкость пленки,  $V$  - скорость сканирования,  $R$  - коэффициент отражения пленки,  $r_0$  - характерный размер гауссова распределения интенсивности излучения в пучке,  $t$  - текущее время. Оси  $x$  и  $y$  лежат в плоскости поверхности пленки, причем ось  $x$  совпадает с направлением сканирования и проходит через центр облученной области, ось  $y$  перпендикулярна ей.

Решение уравнения (3.5) получено путем перехода к движущейся системе координат с последующим применением преобразования преобразованием Ганкеля 0-го порядка [2].

$$T = G \int_0^\infty \frac{\xi}{\xi^2 + b^2} e^{-\frac{\xi^2}{4}} J_0 \left( \xi \frac{r}{r_0} \right) d\xi, \quad (3.6)$$

где  $G = \frac{P(1-R)}{2\pi k h} e^{\frac{b^2}{4}}$ ,  $b = \frac{V r_0}{2a}$ ,  $J_0$  - функция Бесселя 1-го рода 0-го порядка, значение температуры отсчитывается от начального значения.

Вторая производная по времени для  $r = y$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial t^2} = -\frac{GV^2}{r_0} \int_0^\infty \frac{\xi^2}{\xi^2 + b^2} e^{-\frac{\xi^2}{4}} \frac{J_1 \left( \xi \frac{y}{r_0} \right)}{y} d\xi, \quad (3.7)$$

где  $J_1$  - функция Бесселя 1-го рода 1-го порядка.

Для упрощения дальнейших вычислений при определении температуры и ее второй производной по времени используется разложение функций Бесселя в ряд:

$$T = \frac{G}{2} \left[ \exp\left(\frac{b^2}{4}\right) E_1\left(\frac{b^2}{4}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{nn!} \left(\frac{y}{r_0}\right)^{2n} \right] \approx \frac{G}{2} \left[ -\gamma - \ln\left(\frac{b^2}{4}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{nn!} \left(\frac{y}{r_0}\right)^{2n} \right], \quad (3.8)$$

где  $E_1$  – интегральная показательная функция,  $\gamma = 0,5772156649\dots$  – постоянная Эйлера

$$\frac{\partial^2 T}{\partial t^2} = -\frac{GV^2}{r_0} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(n+1)!} \left(\frac{y}{r_0}\right)^{2n} \quad (3.9)$$

Исследования показывают, что в зависимости от скорости сканирования мощность излучения должна изменяться в определенных пределах, чтобы, с одной стороны, толщина оксидной пленки превышала требуемое критическое значение, и, с другой стороны, не происходило плавление. Уменьшение толщины слоя образующегося оксида в сторону от его середины (оси движения пучка излучения) происходит значительно более резко, чем уменьшение максимальной температуры, что является предпосылкой достижения минимальных размеров и, соответственно, высокой разрешающей способности.

### Литература

1. М.Н.Либенсон. Лазерно-индуцированные оптические и термические процессы в конденсированных средах и их взаимное влияние. Спб.:Наука, 2007.
2. Veiko V. P., Shakhno E. A., Poleshchuk A. G., Korolkov V. P., Matyzhonok V.M. Local laser oxidation of thin metal films: Ultra-resolution in theory and in practice. JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering, vol. 3, No. 3, 2008, pp. 201–205.
3. Котов Г.А., Либенсон М.Н. Теория роста тонких окисных пленок на поверхности металла при импульсном нагревании. Электронная техника, сер.6, вып.4(44), 1973, с.56–64.
4. Г.Корн, Т.Корн. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.:Наука, 1974.

### Задание

1. Исследовать зависимость максимальной температуры и толщины слоя оксида от мощности излучения для центральной точки области воздействия излучения  $y=0$ .

2. Для одного из значений мощности определить зависимость максимальной температуры и толщины слоя оксида от координаты  $y$  в диапазоне значений  $y$  (от 0 до  $2r_0$ ). Определить ширину полосы – скрытого изображения на пленке, в котором толщина слоя оксида равна или превышает 2 нм. Определить разрешающую способность обработки.

3. Из графиков  $h(P)$ ,  $T_{\max}(P)$  определить диапазон значений мощности излучения, при котором образуется слой оксида толщиной, большей 2 нм (устойчивый при травлении), но температура в середине полосы ( $y=0$ ) не достигает температуры плавления  $T_{пл}$ .

При проведении расчетов принять значения параметров:

$$B = 0,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^4 / \text{с},$$

$$T_a = 32500 \text{ К},$$

$$R = 0,55,$$

$$k = 47 \text{ Вт/м} \cdot \text{К},$$

$$a = 0,22 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 / \text{с},$$

$$T_{пл} = 2236 \text{ К},$$

$$T_{нач} = 293 \text{ К}.$$

При проведении расчетов число членов ряда ограничить значением  $N=10$ . Ориентировочные значения мощности излучения составляют 1 – 100 мВт.

Значение параметров  $h$ ,  $V$  и  $r_0$  выбрать в соответствии с вариантом исходных данных.

### Используемые расчетные формулы

Данная модель позволяет определять пространственное и временное распределение температуры тонкой пленки и распределение толщины слоя оксида на поверхности пленки при действии сканирующего пучка непрерывного лазерного излучения.

Толщина слоя оксида  $H$  определяется вагнеровским законом окисления, в соответствии с которым в условиях нестационарного лазерного нагрева

$$H = \sqrt{2B \exp\left(-\frac{T_a}{T_{\max}}\right) t_e},$$

где  $B$  – константа параболического окисления,  $T_a$  – энергия активации диффузионных процессов, выраженная в Кельвинах,  $T_{\max}$  – максимальное значение температуры, достигаемое в данной точке поверхности, в Кельвинах,  $t_e$  – эффективное время нагрева, определяемое выражением

$$t_e = \sqrt{\frac{2\pi(T_{\max} - T_{нач})^2}{T_a |T''|}},$$

$T''_{tt}$  – вторая производная температуры по времени в данной точке поверхности пленки в момент, когда температура в этой точке достигает своего максимального значения  $T_{\max}$  :

$$T_{\max} \approx \frac{G}{2} \left[ -\gamma - \ln\left(\frac{b^2}{4}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{nn!} \left(\frac{y}{r_0}\right)^{2n} \right] + T_{\text{нач}},$$

$$T''_{tt} = -\frac{GV^2}{r_0} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(n+1)!} \left(\frac{y}{r_0}\right)^{2n},$$

$$G = \frac{P(1-R)}{2\pi kh} e^{\frac{b^2}{4}},$$

$$b = \frac{Vr_0}{2a},$$

$T_{\text{нач}}$  – начальная температура,

$\gamma = 0,5772156649\dots$  – постоянная Эйлера,

$P$  – мощность лазерного излучения,

$V$  – скорость сканирования,

$R$  – коэффициент отражения пленки,

$h$  – толщина пленки хрома,

$k$  – теплопроводность пленки хрома,

$a$  – температуропроводность пленки хрома,

$y$  – расстояние от линии движения центра облученной области до точки,

$r_0$  – характерный размер гауссова распределения интенсивности излучения в пучке.

**Таблица 3.1. Варианты исходных данных**

№ варианта	Толщина пленки, $h$ , нм	Скорость сканирования, $V$ , м/с	Характерный размер гауссова распределения интенсивности излучения в пучке, $r_0$ , мкм
1	100	1	0,25
2	100	0,3	0,25
3	100	0,1	0,25
4	50	1	0,25
5	50	0,3	0,25
6	50	0,1	0,25
7	100	1	0,5
8	100	0,3	0,5
9	100	0,1	0,5
10	50	1	0,5

## Алгоритм расчета

### Подготовительные действия

– Задать значения  $B$ ,  $T_a$ ,  $R$ ,  $k$ ,  $a$ ,  $T_{пл}$ ,  $T_{нач}$ ,  $h$ ,  $V$ ,  $r_0$ ,  $\gamma$ ,  $N$ . Значения температур задавать в К.

1. Исследовать зависимость максимальной температуры и толщины слоя оксида от мощности излучения для центральной точки области воздействия излучения  $y=0$ .

- Записать выражение для  $b$ .
- Записать выражение для  $G$ .
- Записать выражение для  $T_{max}$ .
- Записать выражение для  $T''$ .
- Записать выражение для  $H$ .
- Задать значение  $y=0$ .
- Построить график функции  $T_{max}(P)$ , выбрав значения  $P$  такие, чтобы температура  $T_{max}$  не превышала температуры плавления. Ориентировочные значения  $P$  – порядка 1 – 1000 мВт.
- Построить график функции  $H(P)$  при тех же значениях  $P$ .

2. Для одного из значений мощности определить зависимость максимальной температуры и толщины слоя оксида от координаты  $y$  в диапазоне значений  $y$  (от 0 до  $2r_0$ ). Определить ширину полосы – скрытого изображения на пленке, в которой толщина слоя оксида равна или превышает 2 нм. Определить разрешающую способность обработки.

- Из полученных графиков выбрать произвольно значение мощности, при котором толщина слоя оксида  $h > 2$  нм.
- Построить график функции  $T_{max}(y)$  в диапазоне значений  $y$  от 0 до  $2r_0$ .
- Построить график функции  $h(y)$  в диапазоне значений  $y$  от 0 до  $2r_0$ .
- По графику определить ширину полосы, где толщина слоя оксида равна или превышает 2 нм. Определить соответствующее значение разрешающей способности.

3. Из графиков  $h(P)$ ,  $T_{max}(P)$  определить диапазон значений мощности излучения, при котором образуется слой оксида толщиной, большей 2 нм (устойчивый при травлении), но температура в середине полосы ( $y=0$ ) не достигает температуры плавления  $T_{пл}$ .

- Из графиков, полученных при выполнении п.1, определить минимальное значение мощности, когда в точке  $y=0$  толщина слоя оксида  $H$  равна 2 нм.
- Из графиков, полученных при выполнении п.1, определить максимальное значение мощности, когда в точке  $y=0$  температура пленки равна температуре плавления.

4. Сделать выводы по полученным результатам.

## **Практическая работа № 4. Исследование характеристик локального нагрева стеклокерамики при аморфизации излучением CO<sub>2</sub> лазера**

Целью лабораторной работы является приобретение студентами представлений о лазерном нагреве и особенностях структурных переходов в стеклокерамических материалах при локальном воздействии на них излучения CO<sub>2</sub> лазера и навыков проведения оценочных расчетов.

### **Основные теоретические представления**

Локальная структурная модификация стеклокерамики под действием лазерного излучения является в последние годы актуальным предметом исследований в связи с возможными новыми приложениями в областях аналитической и космической техники, оптической памяти.

Стеклокерамики представляют собой поликристаллический материал, полученный из стекла. В отличие от обычных стекол, свойства которых определяются в основном их химическим составом, для стеклокерамик решающее значение имеет почти идеальная поликристаллическая структура исключительной мелкозернистости и фазовый состав. Помимо общности технологий производства, разнообразные стеклокерамики объединяют еще и кремнекислородная химическая природа, а также особое сочетание стеклообразной и кристаллической фаз.

Таким образом, стеклокерамика представляет собой класс микрокристаллических стекломатериалов, получаемых путем направленной (катализируемой) кристаллизации стекол специальных составов. Стеклокерамики состоят из одной или нескольких кристаллических фаз, равномерно распределенных в стекловидной фазе. Главная особенность стеклокерамик – тонкозернистая равномерная стеклокристаллическая структура, обуславливающая сочетание высокой твердости и механической прочности с отличными электроизоляционными свойствами, высокой температурой размягчения, термической и химической стойкостью и т.д.

Такие свойства стеклокерамик как механическая прочность, высокие диэлектрические показатели, химическая пассивность, биосовместимость и т.д. делают их популярными для биомедицинских применений. Возможность локальной аморфизации стеклокерамики наряду с изменением поверхностной топологии из-за увеличения удельного объема при аморфизации и оптической прозрачности определяет их перспективность для микро- и нанофотоники. Большая разница химической растворимости и ионнообменных свойств в зависимости от структуры, соответствующей фазовому состоянию, позволяют одинаково хорошо получать как на поверхности, так и внутри стеклокерамического объема структуры для разнообразных применений, таких как микроаналитические чипы, так называемые «наносателлиты», дифракционные решетки и т.д.

Длина волны излучения CO<sub>2</sub>-лазера (10,6 мкм) лежит в области фундаментального поглощения силикатных стеклокерамик, поэтому

поглощательная способность стеклокерамики на этой длине волны весьма велика и практически одинакова в аморфном и кристаллическом состоянии. В случае воздействия излучения  $\text{CO}_2$ -лазера, которое поглощается в тонком слое на поверхности стеклокерамики, расплавленная область образуется посредством теплопроводности. Температура на границе этой области соответствует температуре плавления. Внутри области температура повышается по мере воздействия излучения, причём максимальная температура локализуется в области поглощения излучения на поверхности стеклокерамической пластины. Поскольку механизм образования расплавленной области теплопроводный, то в процессе проплавления стеклокерамики вглубь пластины расплавленная область расширяется также и радиально. После полного проплавления стеклокерамической пластины вглубь (её просветления) процесс поглощения излучения и радиального расширения расплавленной области продолжается до достижения стационарного температурного поля всей заготовки (см. рисунок 4.1).

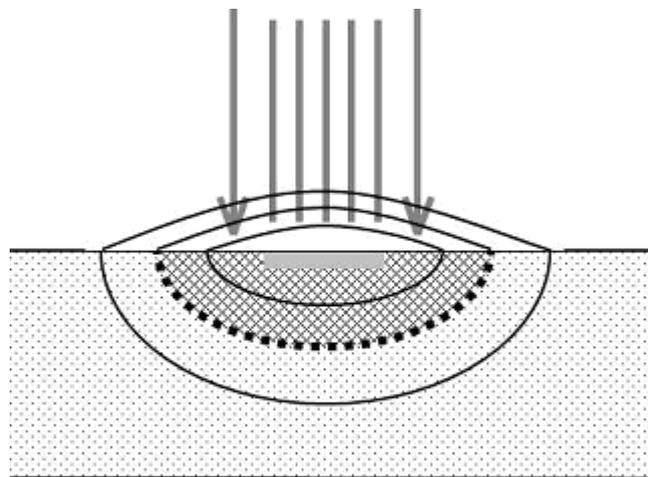


Рис. 4.1. Принципиальная схема роста аморфизированной области ситалла СТ-50-1 при воздействии излучения  $\text{CO}_2$ -лазера, где

- границы фронта аморфизации (оптической прозрачности);
- температура приблизительно равна температуре плавления;
- XXXX температура выше температуры плавления;
- зона поглощения излучения.

Экспериментально было установлено, что под действием излучения  $\text{CO}_2$ -лазера фазово-структурные модификации в стеклокерамике проходят очень быстро за время порядка нескольких секунд. При этом скорости нагревания и охлаждения играют решающую роль для реализации процессов локальной аморфизации (и рекристаллизации) стеклокерамик. Если скорость изменения температуры выше критической, то неизбежным является образование трещин (режим растрескивания). При меньших темпах изменений температуры (нагревания 30 – 80 К/с и охлаждения 50 – К/с),

можно осуществить лазерную аморфизацию образцов. В этом случае температура поверхности образцов достигает температуры расплавления, а темп охлаждения достаточно высок для замораживания расплава и формирования стабильной и свободной от механических напряжений аморфной фазы. Таким образом, процессы, происходящие в стеклокерамике под действием лазерного излучения, определяются кинетикой ее нагревания и остывания в зоне воздействия.

Для исследования характеристик температурного поля при облучении тонкой керамической пластины пучком излучения  $\text{CO}_2$  лазера круглого сечения с равномерным распределением интенсивности излучения по пятну применим преобразование Ганкеля нулевого порядка по радиальной координате.

Преобразование Ганкеля является одним из видов интегральных преобразований, широко используемых в решении уравнений теплопроводности. Преобразование Ганкеля – это такая операция, при которой функции  $f(r)$ , определенной при  $r > 0$ , ставится в соответствие некоторая функция  $F(s)$  переменной  $s$ , причем эта операция совершается посредством интегрирования:

$$F(s) = \mathcal{K}_m [f(r)] = \int_0^{\infty} f(r) r J_m(sr) dr. \quad (4.1)$$

Одно из важнейших свойств преобразования Ганкеля,

$$\mathcal{K}_m \left[ f''(r) + \frac{1}{r} f'(r) - \frac{m^2}{r^2} f(r) \right] = -s^2 \mathcal{K}_m [f(r)], \quad (4.2)$$

позволяет эффективно использовать его в решении уравнений теплопроводности, записанных в различных системах координат, в частности преобразование Ганкеля 1-го порядка ( $m=2$ ) – в полярной системе координат.

В нашем случае уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} + a_1 \left[ \frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r} \right] = \frac{q(1-R)}{\rho ch} \begin{cases} 1 & \text{при } 1 \leq r \leq r_0 \\ 0 & \text{при } r > r_0 \end{cases}. \quad (4.3)$$

принимает вид:

$$\frac{\partial \bar{T}_1}{\partial t} + as^2 \bar{T}_1 = \frac{q(1-R)}{\rho ch} \varphi(s), \quad (4.4)$$

где  $\bar{T}$  – изображение по Ганкелю температуры  $T_1$ , отсчитываемой от начального значения ( $T_1 = T - T_{\text{нач}}$ ),  $s$  – параметр преобразования Ганкеля,  $a$  – температуропроводность стеклокерамики,  $\rho$  – плотность стеклокерамики,  $c$  – теплоемкость керамики,  $q$  – плотность мощности лазерного излучения на поверхности стеклокерамической пластины,  $h$  – толщина

стеклокерамической пластины,  $R$  – коэффициент отражения,  $\varphi(s) = \frac{r_0}{s} J_1(r_0 s)$  – изображение ступенчатой функции при преобразовании Ганкеля,  $J_1$  – функция Бесселя первого рода первого порядка,  $r_0$  – радиус облученной

области,  $t$  – время, отсчитываемое с начала воздействия излучения. Начальное условие:

$$\bar{T}_1|_{t=0} = 0. \quad (4.5)$$

Решение системы (4.4, 4.5) дает значение

$$\bar{T}_1 = \frac{q(1-R)r_0}{khs^3} J_1(r_0s) (1 - \exp(-as^2t)). \quad (4.6)$$

Обратное преобразование Ганкеля, определяемое по формуле

$$f(r) = \mathcal{K}_m^{-1}[F(s)] = \int_0^\infty F(s) s J_m(sr) ds, \quad (4.7)$$

дает выражение для определения температуры:

$$T = \frac{q(1-R)r_0}{kh} \int_0^\infty \frac{J_1(r_0s) J_0(rs) (1 - \exp(-as^2t))}{s^2} ds + T_{нач}, \quad (4.8)$$

где  $r$  – радиальная координата точки (расстояние от центра облученной области),  $J_0$  – функция Бесселя первого рода нулевого порядка,  $T_{нач}$  – начальная температура (температура подогрева).

Скорость роста температуры во времени:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{q(1-R)r_0}{\rho ch} \int_0^\infty J_1(r_0s) J_0(rs) \exp(-as^2t) ds. \quad (4.9)$$

Остывание стеклокерамики после окончания воздействия излучения определяется аналогично:

$$\frac{\partial \bar{T}_1}{\partial t} + as^2 \bar{T}_1 = 0, \quad (4.10)$$

$$\bar{T}_1|_{t=0} = \frac{q(1-R)r_0}{khs^3} J_1(r_0s) (1 - \exp(-as^2\tau)), \quad (4.11)$$

где  $\tau$  – продолжительность лазерного воздействия,  $k$  – теплопроводность стеклокерамики, время  $t$  отсчитывается в данном случае от момента окончания импульса излучения.

Значение температуры и скорости остывания:

$$T = \frac{q(1-R)r_0}{kh} \int_0^\infty \frac{J_1(r_0s) J_0(rs) (1 - \exp(-as^2\tau)) \exp(-as^2t)}{s^2} ds + T_{нач}, \quad (4.12)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{q(1-R)r_0}{\rho ch} \int_0^\infty J_1(r_0s) J_0(rs) (1 - \exp(-as^2\tau)) \exp(-as^2t) ds. \quad (4.13)$$

## Литература

1. Скиба П.А. Лазерная модификация стекловидных материалов. Минск, изд. БГУ, 1999.
2. Вейко В.П., Шахно Е.А., Яковлев Е.Б. Физические механизмы быстрой структурной модификации стеклокерамики при воздействии

- излучения CO<sub>2</sub>-лазера. Квантовая электроника, т.39 , № 2, 2009, с. 185–190.
3. Вейко В.П., Киеу К. Лазерная аморфизация стеклокерамик: основные закономерности и новые возможности изготовления микрооптических элементов. Квантовая электроника, т.37, №1, 2007, 92.
  4. Г.Корн, Т.Корн. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.:Наука, 1974.

### Задание

1. Исследовать радиальное распределение максимальной температуры тонкой стеклокерамической пластины при ее лазерном облучении (в момент окончания воздействия) в диапазоне значений  $r$  от 0 до  $3r_0$ . Определить, достигается ли температура плавления и в какой области.

2. Определить зависимость температуры и скорости нагрева от времени в центре облученной области в диапазоне времени  $t$  от 0 до  $\tau$ .

3. Определить зависимость температуры и скорости охлаждения от времени в центре облученной области в диапазоне времени  $t$  от 0 до  $2\tau$ .

При проведении расчетов принять значения параметров:

$$T_{нач} = 450^\circ\text{C}$$

$$h = 0,6 \text{ мм,}$$

$$\text{длина волны излучения } \lambda = 10,6 \text{ мкм,}$$

параметры стеклокерамики СТ-50:

$$\rho = 2,65 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$c = 840 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$$

$$k = 1,45 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$$

$$R = 0,1$$

$$T_{пл} = 770^\circ\text{C}$$

При интегрировании верхний предел принять равным  $N = 1000000$ .

Значение параметров  $q$ ,  $\tau$ ,  $r_0$  выбрать в соответствии с вариантом исходных данных.

### Используемые расчетные формулы

Средняя по толщине стеклокерамической пластины температура, при ее облучении пучком излучения CO<sub>2</sub> лазера круглого сечения с равномерным распределением интенсивности излучения по пятну, в зависимости от радиальной координаты  $r$  и времени:

$$T = \frac{q(1-R)r_0}{kh} \int_0^\infty \frac{J_1(r_0s)J_0(rs)(1-\exp(-as^2t))}{s^2} ds + T_{нач}.$$

Скорость роста температуры во времени:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{q(1-R)r_0}{\rho ch} \int_0^\infty J_1(r_0s)J_0(rs)\exp(-as^2t) ds.$$

Значение температуры после окончания воздействия излучения и скорости остывания:

$$T = \frac{q(1-R)r_0}{kh} \int_0^\infty \frac{J_1(r_0s)J_0(rs)(1-\exp(-as^2\tau))\exp(-as^2t)}{s^2} ds + T_{нач},$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{q(1-R)r_0}{\rho ch} \int_0^\infty J_1(r_0s)J_0(rs)(1-\exp(-as^2\tau))\exp(-as^2t) ds$$

( $t$  отсчитывается в данном случае от момента окончания импульса излучения).

**Таблица 4.1. Варианты исходных данных**

№ варианта	Плотность мощности лазерного излучения $P$ , кВт/см <sup>2</sup>	Длительность воздействия $\tau$ , с	радиус облученной области $r_0$ , мм
1	2	8	0,1
2	1	15	0,1
3	2	10	0,15
4	0,8	8	0,15
5	1,1	15	0,15
6	1,2	8	0,12
7	1	10	0,12
8	1,2	12	0,12
9	3	10	0,08
10	2,8	8	0,08

### Алгоритм расчета

#### Подготовительные действия

- Задать значения  $\rho$ ,  $c$ ,  $k$ ,  $R$ ,  $T_{пл}$ ,  $T_{нач}$ ,  $h$ ,  $q$ ,  $\tau$ ,  $r_0$ ,  $N$ .
- Вычислить значение  $a$ , используя значения  $\rho$ ,  $c$ ,  $k$ .

1. Исследовать радиальное распределение максимальной температуры тонкой стеклокерамической пластины при ее лазерном облучении (в момент окончания воздействия) в диапазоне значений  $r$  от 0 до  $3r_0$ . Определить, достигается ли температура плавления и в какой области.

- Записать выражение для температуры пластины во время действия излучения.
- Установить верхний предел интегрирования  $N=1000000$ .
- Рассчитать  $T(r, t=\tau)$  в диапазоне значений  $r$  от 0 до  $3r_0$  и построить график функции  $T(r, t=\tau)$ .
- Определить, достигается ли температура плавления, если достигается, определить радиус, при котором температура равна температуре плавления.

2. *Определить зависимость температуры и скорости нагрева от времени в центре облученной области в диапазоне времени  $t$  от 0 до  $\tau$ .*

– Записать выражение для скорости нагрева  $V_{нагр} = \frac{\partial T}{\partial t}$ .

– Рассчитать  $T(r=0, t)$  и  $V_{нагр}(r=0, t)$  в диапазоне значений в диапазоне значений  $t$  от 0 до  $\tau$  и построить графики функций  $T(r=0, t)$  и  $V_{нагр}(r=0, t)$ .

3. *Определить зависимость температуры и скорости остывания от времени в центре облученной области в диапазоне времени  $t$  от 0 до  $2\tau$ .*

– Записать выражение для температуры пластины после окончания импульса излучения.

– Записать выражение для скорости остывания  $V_{ост} = \frac{\partial T}{\partial t}$ .

– Рассчитать  $T(r=0, t)$  и  $V_{ост}(r=0, t)$  после окончания импульса излучения в диапазоне значений в диапазоне значений  $t$  от 0 до  $2\tau$  и построить графики функций  $T(r=0, t)$  и  $V_{ост}(r=0, t)$ .

4. *Сделать выводы по полученным результатам.*

## **Практическая работа № 5. Исследование процессов стеклования - кристаллизации стеклокерамики при воздействии непрерывного излучения Nd:YAG лазера**

Целью лабораторной работы является приобретение студентами представлений о лазерном нагреве и особенностях структурных переходов в стеклокерамических материалах при локальном воздействии на них излучения Nd:YAG лазера.

### **Основные теоретические представления**

Лазерный нагрев стеклокерамических сред приводит к изменению их структурно-фазового состояния. При локальной аморфизации (стекловании) стеклокерамики, находящейся в кристаллической фазе, происходит локальное изменение её физических (в частности, плотности) и оптических свойств (в частности, прозрачности в видимом и ближнем ИК диапазонах), что создаёт широкие перспективы для создания элементов фотоники и микрооптики. Возможность возвращения материала в исходную поликристаллическую фазу при повторном воздействии лазерного излучения (обратная кристаллизация) ещё больше расширяет возможности этого метода.

Воздействие на стеклокерамику излучения видимого и ближнего ИК диапазона существенно отличается от случая воздействия излучения CO<sub>2</sub>-лазера. Поглощательная способность стеклокерамики в кристаллическом состоянии вследствие сильного рассеяния достаточно велика, что приводит к её быстрому разогреву в облучённой области. Однако по достижении температуры плавления вещество переходит в расплавленное стеклообразное состояние и в области воздействия показатель поглощения света уменьшается на несколько порядков. В результате зона поглощения смещается на границу фронта просветления. Таким образом, резкое изменение оптических свойств материала приводит к радикальному изменению поглощения света, а также распределения падающего светового потока, температурного поля в стеклокерамике и кинетики структурных изменений. Кроме того, возникновение обратных связей между темпом разогрева и оптическими свойствами (поглощательной способностью и показателем поглощения) приводит к возникновению специфических термооптических эффектов. При воздействии излучения YAG:Nd-лазера непрерывного действия процесс просветления стеклокерамической пластины происходит следующим образом. В начале излучение также поглощается в поверхностном слое пластины и вызывает её нагревание вблизи области поглощения. Но как только температура поверхностного слоя достигает температуры плавления и начинается плавление, эта расплавленная область становится прозрачной для излучения. Проходя ванну расплава беспрепятственно вглубь, излучение поглощается в кристаллической части стеклокерамики на переднем фронте изотермы плавления (аморфизации).

Таким образом, температура как в области расплава так и вне его не превышает температуры плавления, достигая максимального значения (температуры плавления) в области поглощения – непосредственно на фронте просветления. Механизм формирования расплавленной области в этом случае носит не теплопроводностный, а термооптический характер, так как область прозрачности растёт при нагреве её дна до температуры плавления. Соответственно, радиальное расширение области расплава здесь также имеет не теплопроводностную, а термооптическую природу (расширение области поглощения излучения вследствие значительного рассеяния, характерного для воздействия на стеклокерамику в этой области спектра).

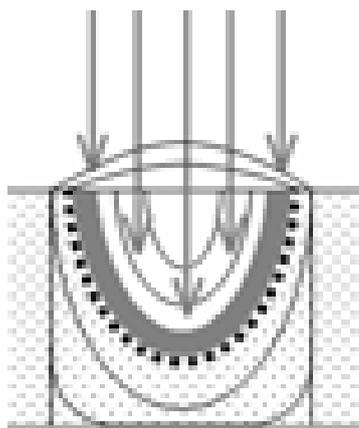


Рисунок 5.1. Принципиальная схема роста аморфизированной области ситалла СТ-50-1 при воздействии излучения Nd:YAG лазера, где  
 — границы фронта аморфизации (оптической прозрачности);  
 ..... температура приблизительно равна температуре плавления;  
 x x x x температура выше температуры плавления;  
 ■ зона поглощения излучения.

По мере проплавления глубже расположенных слоёв стеклокерамики область поглощения смещается вниз. Когда толщина оставшегося кристаллического слоя пластины под ванной расплава становится сравнимой с глубиной проникновения излучения в стеклокерамику ( $1/\alpha = 105$  мкм, где  $\alpha$  – показатель поглощения), процесс замедляется вследствие уменьшения поглощения.

При полном проплавлении стеклокерамической пластины на всю глубину она становится совершенно прозрачной в области падения излучения, пучок проходит через неё без поглощения и процесс нагревания прекращается. После этого, вследствие постепенного оттока тепла из нагретой (расплавленной) области происходит возникновение кристаллических структур в расплаве стеклокерамики. Поглощательная способность резко увеличивается, а прозрачность уменьшается. Стеклокерамика опять начинает поглощать излучение и процесс повторяется. Таким образом изменение пропускания получает колебательный характер.

При проведении расчетов были сделаны следующие основные допущения. Температура стеклокерамической пластины принималась постоянной по толщине. Принималось, что пластина насквозь расплавлена, если средняя по толщине температура в центре облучённой области достигает значения температуры плавления (т.к. при воздействии Nd:YAG - лазера температура в расплавленной области примерно равна температуре плавления, а вне её – ниже температуры плавления). Аналогично принималось, что пластина кристаллизовалась, если её средняя по толщине температура в центре облучённой области упала до значения температуры кристаллизации. Затраты тепла на плавление и выделение энергии при кристаллизации не учитывались. Поглощательная способность считалась постоянной на протяжении каждой ступени процесса. Плотность мощности излучения считалась постоянной в пределах облученной области. Потери тепла в окружающую среду не принимались во внимание.

Таким образом, изменение структурных и оптических свойств облучаемой стеклокерамической пластины в области воздействия (изменение фазового состояния и поглощательной способности) определяется по значению средней по толщине температуры пластины в центре облучённой области  $T$ .

Температура  $T$  определяется из задачи нагревания до температуры плавления  $T_{пл}$  при поглощении излучения, после чего поглощение прекращается (вследствие стеклования ситалла) и происходит остывание до температуры кристаллизации  $T_{кр}$  за счёт радиального теплоотвода, после чего вещество кристаллизуется, поглощение резко возрастает (до прежнего значения или близкого к нему) и процесс повторяется. Таким образом, процесс является существенно нелинейным, т.е. величина воздействия излучения (пропорциональная поглощающей способности) зависит от температуры, а кинетика изменения поглощающей способности – от времени достижения температурой значений  $T_{пл}$  и  $T_{кр}$ .

Задача решается методом источников (см. пояснения к практической работе 2).

Для исследования процессов стеклования - кристаллизации стеклокерамики при действии непрерывного излучения Nd:YAG лазера рассмотрим локальное нагревание тонкой стеклокерамической пластины при поглощении излучения до температуры плавления и дальнейшее остывание за счет теплоотвода в стороны вследствие прекращения поглощения при проплавлении (просветления) до температуры кристаллизации. Значение средней по толщине пластины температуры в центре облученной области в любой момент времени в процессе нагревания до температуры плавления  $T_{пл}$  определяется методом источников:

$$T = \int_0^{t_0} \int_0^{r_0} \frac{q(1-R)}{\rho ch} \frac{\exp\left[-\frac{r^2}{4a(t-t')}\right]}{4\pi a(t-t')} r dr dt' + T_{нач}, \quad (5.1)$$

где  $a$  – температуропроводность стеклокерамики,  $\rho$  – плотность стеклокерамики,  $c$  – теплоемкость керамики,  $q$  – плотность мощности лазерного излучения на поверхности стеклокерамической пластины,  $h$  – толщина стеклокерамической пластины,  $R$  – коэффициент отражения,  $r$  – радиус (расстояние от центра облученной области),  $r_*$  – радиус области поглощения излучения (радиус облученной области плюс длина рассеяния излучения),  $t$  – время, отсчитываемое с начала воздействия излучения.

Выражение (5.1) приводится к виду

$$T = \frac{q(1-R)t}{\rho ch} \left[ 1 - E_2 \left( \frac{r_*^2}{4at} \right) \right] + T_{нач} \quad (5.2)$$

или

$$T \approx \frac{P(1-R)}{4\pi kh} \left[ 1 - \gamma + \ln \frac{4at}{r_*^2} \right] + T_{нач}, \quad (5.3)$$

где  $k$  – теплопроводность стеклокерамики,  $P$  – мощность излучения.

После момента  $t_{пл}$  достижения температуры плавления (когда  $T=T_{пл}$ ) поглощение излучения прекращается и средняя по толщине в центре облученной области температура пластины при ее охлаждении радиальным теплоотводом определяется выражением:

$$T = \int_0^{t_{пл}} \int_0^{r_*} \frac{q(1-R)}{\rho ch} \frac{\exp \left[ -\frac{r^2}{4a(t-t')} \right]}{4\pi a(t-t')} r dr dt' + T_{нач}. \quad (5.4)$$

Выражение (5.4) справедливо для моментов времени  $t$  от  $t_{пл}$  до  $t_{кр}$  ( $t_{кр}$  – момент времени от начала воздействия излучения, когда температура падает до значения температуры кристаллизации  $T=T_{кр}$ ). В формуле (5.4), как и выше, время отсчитывается от начала воздействия излучения.

Выражение (5.4) приводится к виду

$$T = \frac{q(1-R)}{\rho ch} \left[ t - t E_2 \left( \frac{r_*^2}{4at} \right) + (t - t_{пл}) E_2 \left( \frac{r_*^2}{4a(t - t_{пл})} \right) \right] + T_{нач}, \quad (5.5)$$

$$T \approx \frac{P(1-R)}{4\pi kh} \ln \frac{t}{t - t_{пл}} + T_{нач}. \quad (5.6)$$

После того, как температура  $T$  падает до значения температуры кристаллизации, стеклокерамика кристаллизуется, начинается поглощение излучения и процесс повторяется.

## Литература

1. Скиба П.А. Лазерная модификация стекловидных материалов. Минск, изд. БГУ, 1999.
2. Вейко В.П., Новиков Б.Ю., Шахно Е.А., Яковлев Е.Б. Возникновение волны просветления в стеклокерамике СТ-50-1 под действием излучения Nd:YAG-лазера. Квантовая электроника, т. 39, № 1, 2009, с. 59–62.

3. Вейко В.П., Киеу К. Лазерная аморфизация стеклокерамик: основные закономерности и новые возможности изготовления микрооптических элементов. Квантовая электроника, т.37, №1, 2007, 92.
4. Шахно Е.А. Аналитические методы расчета лазерных микро- и нанотехнологий. Учебное пособие. Издание СПбГУ ИТМО, 2009.

### Задание

1. Построить график зависимости температуры тонкой стеклокерамической пластины от времени при поглощении ею лазерного излучения. Определить время достижения температура плавления.

2. Построить график зависимости температуры тонкой стеклокерамической пластины от времени при остывании ее после локального расплавления лазерным излучением. Определить время достижения температура кристаллизации.

3. Исследовать зависимости температуры стеклокерамической пластины при ее нагревании и остывании от мощности излучения в диапазоне 0,5 – 2 от заданного значения мощности. Определить, в каком диапазоне значений мощности достигается температура плавления.

4. Исследовать зависимости температуры стеклокерамической пластины при ее нагревании и от величины радиуса зоны поглощения излучения  $r_*$  в диапазоне 0,5 – 2 от заданного значения  $r_*$ . Определить, в каком диапазоне значений  $r_*$  достигается температура плавления.

При проведении расчетов принять значения параметров:

$$h=0,6 \text{ мм,}$$

длина волны излучения 1,06 мкм,

параметры стеклокерамики СТ-50:

$$a=6,51 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$$

$$k=1,45 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$$

$$R=0,5$$

$$T_{\text{пл}}=770^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{кр}}=670^\circ\text{C}$$

Значение параметров  $P$ ,  $r_*$ ,  $T_{\text{нач}}$  выбрать в соответствии с вариантом исходных данных.

### Используемые расчетные формулы

Средняя по толщине пластины температура в центре облученной области в любой момент времени до достижения температуры плавления:

$$T \approx \frac{P(1-R)}{4\pi kh} \left[ 1 - \gamma + \ln \frac{4at}{r_*^2} \right] + T_{\text{нач}},$$

$\gamma = 0,5772156649\dots$  – постоянная Эйлера.

После момента  $t_{\text{пл}}$  достижения температуры плавления (когда  $T=T_{\text{пл}}$ ) поглощение излучения прекращается и средняя по толщине в центре

облученной области температура пластины при ее охлаждении радиальным теплоотводом определяется выражением:

$$T \approx \frac{P(1-R)}{4\pi kh} \ln \frac{t}{t-t_{пл}} + T_{нач} .$$

Последнее выражение справедливо для моментов времени  $t$  от  $t_{пл}$  до  $t_{кр}$ , когда температура падает до значения температуры кристаллизации  $T=T_{кр}$ . Время отсчитывается от начала воздействия излучения.

**Таблица 5.1. Варианты исходных данных**

№ варианта	Мощность лазерного излучения $P$ , Вт	Начальная температура $T_{нач}$ , °С	Радиус области поглощения излучения $r_*$ , мм
1	1,2	400	0,5
2	1	500	0,5
3	0,9	550	0,5
4	2,4	400	0,7
5	2	500	0,7
6	1,8	550	0,7
7	1,1	400	0,3
8	0,9	500	0,3
9	100	0,1	0,5
10	2	400	1

### Алгоритм расчета

#### Подготовительные действия

– Задать значения  $h$ ,  $a$ ,  $k$ ,  $R$ ,  $T_{пл}$ ,  $T_{кр}$ ,  $T_{нач}$ ,  $P$ ,  $r_*$ ,  $\gamma$ .

1. Построить график зависимости температуры тонкой стеклокерамической пластины от времени при поглощении ей лазерного излучения. Определить время достижения температура плавления.

– Записать выражение для температуры пластины во время действия излучения и построить график функции  $T(t)$ .

– Определить время достижения температура плавления.

2. Построить график зависимости температуры тонкой стеклокерамической пластины от времени при остывании ее после локального расплавления лазерным излучением. Определить время достижения температура кристаллизации.

– Записать выражение для температуры пластины после окончания импульса излучения и построить график функции  $T(t)$ .

– Определить время достижения температура кристаллизации.

3. Исследовать зависимость температуры стеклокерамической пластины при ее нагревании до температуры плавления от мощности

излучения в диапазоне  $0,5 - 2$  от заданного значения мощности. Определить, в каком диапазоне значений мощности достигается температура плавления. Определить зависимость времени нагревания пластины до плавления от мощности излучения.

– Построить график функции  $T(P)$ . Определить, в каком диапазоне значений  $P$  достигается температура плавления.

– Построить график функции  $t_{\text{пл}}(P)$ .

4. Исследовать зависимость температуры стеклокерамической пластины при ее нагревании до температуры плавления от величины радиуса зоны поглощения излучения  $r_*$  в диапазоне  $0,5 - 2$  от заданного значения  $r_*$ . Определить, в каком диапазоне значений  $r_*$  достигается температура плавления. Определить зависимость времени нагревания пластины до плавления от величины  $r_*$ .

– Построить график функции  $T(r_*)$ . Определить, в каком диапазоне значений  $r_*$  достигается температура плавления.

– Построить график функции  $t_{\text{пл}}(r_*)$ .

5. Сделать выводы по полученным результатам

**Миссия университета** – генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

---

## **КАФЕДРА ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНИКИ**

Лазерные технологии не случайно называют технологиями XXI века. Открытые в середине прошлого века, лазеры сегодня широко проникли в промышленность, связь, строительство, транспорт, медицину, биологию, экологию, искусство, шоу-бизнес и другие сферы жизни. Лазерные принтеры, оптические диски (CD, DVD, Blu-ray и др.), лазерные торговые сканеры и лазерные шоу сегодня известны всем. Менее известны широкой публике, но не менее важны лазерные технологии в микроэлектронике для нанесения и структурирования тонких пленок, для резки и сварки брони, закалки инструментальных сталей, декоративной обработки дерева, камня и кожи, при лечении болезней глаз, сосудов, опухолей и т.д., а в ближайшей перспективе – для избавления человечества от очков и морщин (да, да – сотни операций по лазерной полировке роговицы глаза и кожи уже проведены). На повестке дня сегодня – создание трехмерных объектов за счет прямой трансформации виртуального (компьютерного) образа в материальный объект при взаимодействии лазерного излучения с веществом, разработка лазерного управляемого термоядерного синтеза, лазерных реактивных двигателей, и многое-многое другое.

### **История кафедры ЛТиЛТ.**

Кафедра была создана 15 мая 2015 года путем объединения двух кафедр — Лазерной техники и биомедицинской оптики (ЛТБМО) и Лазерных технологий и экологического приборостроения (ЛТЭП). Совместная история двух кафедр начинается в 1963 году, когда, всего через три года после создания первого лазера, К.И. Крыловым была создана кафедра квантовой радиоэлектроники, впоследствии получившая название «Кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики». Кафедра первой в России начала подготовку и выпуск специалистов по новому направлению в науке и технике – квантовой электронике, лазерной физике и технике. С самого начала создания кафедры серьезное внимание было уделено фундаментальной подготовке в области математики и физики, физическому эксперименту, учебно-исследовательской работе студентов. В кратчайшие сроки была создана проблемная научно-исследовательская лаборатория, а затем и отраслевая лаборатория, что значительно расширило круг проводимых научных исследований и обеспечило их высокий научный

уровень. Основными научными направлениями кафедры стали оптика лазеров, силовая и нелинейная оптика, радиооптика, неразрушающий контроль материалов и изделий, биомедицинская оптика.

В 1965 г. В.П.Вейко в ИТМО была организована лаборатория лазерных технологий (совместно с ЛКТБ «Светлана»), которая в 1975-76 г.г. была преобразована в отраслевую (двух министерств – Высшего образования и Электронной промышленности), а впоследствии в 1980 г. на базе лаборатории была создана кафедра, которая в дальнейшем получила название кафедры «Лазерных технологий и экологического приборостроения». В 1976 г. научные работы отраслевой лаборатории по «Физическим основам лазерной обработки тонких пленок» удостоены Премии Президиума АН СССР за лучшую научную работу в области «Фундаментальных проблем микроэлектроники». В 1983 и 1984 гг. работы кафедры Лазерных технологий и экологического приборостроения удостоены Премий Минвуза СССР за лучшую научную работу, а в 1986 г. совместно с рядом других организаций - Государственной Премии СССР в области науки и техники за «Разработку и широкое внедрение в промышленность процессов лазерной обработки тонких пленок».

С 1994 г. Г.Б. Альтшулером был создан учебно-научно-производственный "Лазерный центр ИТМО", который функционирует и в настоящее время. На его базе проводятся совместные исследования и выполняются различные проекты с организациями таких стран, как США, Франция, Австрия, Австралия, Болгария, Германия, Китай, Корея. На базе Научно-исследовательского института лазерной физики (НИИ ЛФ) создан филиал кафедры ЛТБМО, совместно с которым создана научно-педагогическая школа "Оптика лазеров".

С 2000 г. лаборатория и кафедра Лазерных технологий и экологического приборостроения признаны Ведущей научной школой Российской Федерации по «Фундаментальным основам лазерных микро- и нанотехнологий», этот статус ежегодно подтверждается. В 2005 г. кафедра явилась инициатором организации новой специальности «лазерная техника и лазерные технологии», по которой начинает подготовку и систематический выпуск специалистов ряд кафедр ИТМО и других ВУЗов России. В 2010 г. работы кафедры совместно с рядом других организаций удостоены Премии Правительства России в области образования за «Создание инновационной системы подготовки специалистов по лазерной обработке материалов».

За время существования кафедр подготовлено более двух тысяч специалистов в области лазерной техники и лазерных технологий, свыше 80 выпускников и сотрудников кафедр защитили кандидатские и докторские диссертации и более 20 имеют учёное звание профессора. По результатам работ кафедр издано более 15 монографий. Результаты исследований сотрудников изложены более чем в 500 научных статьях и 50 патентах и авторских свидетельствах.

В настоящее время кафедра ЛТиЛТ активно сотрудничает с университетами и институтами Германии, Китая, Франции, Италии и других стран.

### **Основные научные направления кафедры ЛТиЛТ:**

Фундаментальные исследования в области взаимодействия лазерного излучения с веществом: лазерная абляция и конденсация металлических и композиционных пленок.

Термохимическое действие лазерного излучения.

Фазово-структурные переходы в функциональных материалах под действием лазерного излучения.

Лазерная локальное осаждение и обработка тонких пленок.

Лазерная инженерия поверхности.

Лазерные технологии прецизионной размерной обработки.

Сверхкороткие лазерные воздействия и их применение.

Создание новых оптических материалов и элементов фотоники, микро- и волоконной оптики на базе лазерных технологий.

Лазерная очистка и дезактивация в промышленности.

Лазерный трехмерный синтез объемных изделий.

Промышленные (индустриальные) инновационные технологии на основе волоконных лазеров для различных областей машиностроения и приборостроения.

Взаимодействие лазерного излучения с конструкционными, функциональными материалами и биологическими тканями.

Лазерные-оптические системы для объемных изображающих технологий: визуализация медицинских изображений и систем создания и сохранения культурного наследия, Laser 3D Ent. and Light Shows.

Лазерная очистка и реставрация произведений культурно-исторического наследия.

Лазерные биомедицинские технологии (флуоресцентная диагностика и фотодинамическая терапия).

Лазерная стоматология и офтальмология.

Лазерная дезактивация радиоактивно-загрязненных поверхностей.

Лазерные микро- и нанотехнологии для различных направлений: механики, электроники, фотоники (оптики), флюидики, газоаналитики, фармацевтики, медицины и биологии.

Нелинейно-оптические процессы и материалы в лазерной физике и технике.

Интеллектуальные оптические и лазерные системы.

Лазеры и оптика в космических технологиях.

Лазерные технологии в ядерных и термоядерных технологиях.

Лазерные дальнометры и высотометры, лазеры для стандартов частоты и времени.

Лазерное освещение.

Петабитная оптическая память.

Лазерное управление структурой и свойствами поверхности (структура, морфология, физико–химические свойства).

Лазерная очистка и сопутствующая обработка поверхности (в том числе дезактивация, флексовалы, биосовместимость, прокатные валы).

Волоконные лазерные технологии.

Многофункциональные нанозонды.

Лазерные технологии на основе сверхкоротких лазерных импульсов.

Лазерное наноструктурирование методами лазерной термохимии и др.

Заведует кафедрой лазерных технологий и лазерной техники Заслуженный деятель науки России, Лауреат Государственной Премии СССР и Премии Правительства РФ, действительный член Академии Инженерных Наук РФ, д.т.н., профессор В.П. Вейко. Среди преподавателей кафедры Почетный работник высшей школы, д.т.н., профессор Е.Б. Яковлев, д.т.н., профессор Е.А. Шахно, Почетный работник высшей школы, к.ф.–м.н., доцент Г.Д. Шандыбина, д.т.н. профессор В.Ю. Храмов, д.ф.–м.н. профессор А.В. Беликов. Занятия по основам биомедицинской оптики проводят ведущие специалисты Санкт–Петербургского Государственного медицинского университета им академика И.П. Павлова: д.б.н. профессор И.А. Михайлова, д.м.н. профессор В.И. Томсон, к.б.н. доцент Л.А. Александрова. Также занятия проводят: к.ф.–м.н. доцент А.В. Скрипник, к.ф.–м.н., доц. Ю.И. Копилевич, к.т.н., доцент А.А. Петров, к.т.н. доцент К.В. Шатилова, к.т.н. доцент А.Е. Пушкарева, к.т.н. доцент Д.Ю. Сачков, молодые научные сотрудники, кандидаты наук Э.И. Агеев, А.А. Самохвалов, Г.В. Одинцова и др.

Кафедра ЛТиЛТ осуществляет подготовку бакалавров и магистров по направлению 12.04.05 «Лазерная техника и лазерные технологии», бакалавров по направлению 16.03.01 «Техническая физика», магистров по направлению 12.04.02 «Оптотехника», кандидатов и докторов наук по специальностям 05.11.07 "Оптические и оптико–электронные приборы", 05.11.27 "Квантовая электроника" и 01.04.05 "Оптика".

Шахно Елена Аркадьевна  
Самохвалов Андрей Александрович

**ЛАЗЕРНЫЕ МИКРО- И НАНОТЕХНОЛОГИИ**  
**Учебно-методическое пособие по практическим работам**

В авторской редакции  
Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО  
Зав. РИО  
Подписано к печати  
Заказ №  
Тираж  
Отпечатано на ризографе

Н.Ф. Гусарова

**Редакционно-издательский отдел**  
**Университета ИТМО**  
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49