

## Динамика нагревания металлов под действием лазерных импульсов со сложной временной формой

С. В. Васильев, У. С. Гончаревич, А. Ю. Иванов, А. Л. Ситкевич

Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Гродно, Беларусь,  
e-mail: [ion\\_ne@mail.ru](mailto:ion_ne@mail.ru)

Проведено исследование воздействия лазерного излучения умеренной интенсивности на образцы из металлов (титан, медь, кадмий) при стандартных условиях атмосферного давления ( $10^5$  Па) и температуры (300 К) через некоторое время после начала лазерного воздействия на твердое тело. Проведены расчеты нагревания облучаемого участка плоской поверхности образцов при различных значениях энергии отдельных пиков лазерного излучения. Построены временные зависимости температур на поверхности всех образцов. Получено удовлетворительное согласие результатов расчета с данными экспериментальных исследований. Приведенная в работе приближенная модель расчета периодического нагревания и охлаждения облучаемого образца может быть использована для качественного описания нагревания рассмотренных материалов, по крайней мере в случае небольшого числа воздействующих на образец импульсов лазерного излучения.

**Ключевые слова:** импульсное лазерное излучение; поглощение излучения; нагревание; охлаждение; металл.

## Heating of metals dynamics under action of laser pulses with complicated temporal form

S. V. Vasiliev, U. S. Goncharevich, A. Yu. Ivanov, A. L. Sitkevich

Yanka Kupala State University of Grodno, Belarus, e-mail: [ion\\_ne@mail.ru](mailto:ion_ne@mail.ru)

An investigation of the action of laser radiation with temperate intensity on the metal samples (titanium, cooper, cadmium) on the standard conditions of atmospheric pressure ( $10^5$  Pa) and temperature (300 K) after some time from the beginning of laser action on solid is described. The scheme of experimental plant used in this work is described. The calculations of heating of irradiated area of flat surfaces of the samples on the different values of energy of separate peaks of laser radiations were carried out. The duration of laser treating of matter leading to destruction of polymer to monomers and as a result evaporation and flaring out of PMMA was obtained. The temporal dependences of temperature on the surfaces of every sample were constructed. A satisfactory agreement between the results of calculation and the data of experimental investigations was obtained. It is indicated that approximate model of calculation of periodical heating and cooling of irradiated sample described in this work can be used for qualitative description of heating of examined matters at least in the case of small number of laser radiation pulses treating a sample.

**Keywords:** pulsed laser radiation; absorption of radiation; heating; cooling; metal.

### Введение

Воздействие лазерного излучения на материал является чувствительным к группе сложных физических взаимосвязанных явлений, возникающих в процессе обработки материала. К ним относятся: нагрев поверхности мишени, приводящий к оптическим и теплофизическим изменениям свойств поверхности материала в об-

ласти пятна фокусировки лазерного излучения, а именно температуры, коэффициента поглощения, температуропроводности, коэффициента теплопроводности, плотности; изменения фазового состояния: твёрдое вещество – жидкость – пар – плазма. В ряде случаев образовавшаяся плазма экранирует мишень от воздействующего лазерного излучения. При этом излучение плазмы может вносить различный, от малого до большого, вклад в нагревание материала. Всё это приводит к уменьшению энерговклада излучения воздействующего лазера на мишень. Окончательный результат воздействия лазерного излучения на вещество зависит не только от состояния поверхности материала, но и от параметров лазерного излучения (длина волны, пространственно-временная структура), которые могут изменяют свои значения, при прохождении излучения через образующийся на поверхности образца плазменный факел. Взаимосвязь вышеперечисленных процессов создаёт более чем сложный образ протекания лазерной обработки материалов.

Целью данной работы является моделирование временной зависимости температуры  $\Delta T$  в пределах пятна фокусировки излучения на поверхности твердого тела под воздействием лазерного импульса.

### 1. Динамика нагрева металлов под действием лазерных импульсов

Облучение образцов осуществлялось рубиновым лазером ГОР-100М. Форма лазерного импульса имела сложную временную структуру, что, в свою очередь, имеет определяющую роль для расчёта изменения температуры на поверхности облучаемых образцов. Продолжительность воздействия лазерного импульса в режиме свободной генерации достигала  $\tau = 1,2$  мс. Энергия отдельно взятых пиков ЛИ длительностью  $\sim 1$  мкс варьировалась в промежутке  $E = 2 - 6$  Дж. Нагревание материала описывается уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t} = a^2 \Delta T(\vec{r}, t) + f(\vec{r}, t) \quad (1)$$

Решение уравнения (1) с начальным условием

$$T(\vec{r}, 0) = T_0 = 300K \quad (2)$$

и граничным условием

$$(n \cdot \text{grad } T(\vec{r})) = 0, \quad (3)$$

описывающего нагревание плоской пластины непосредственно в ходе воздействия лазерного импульса (до «включения» механизма теплопроводности), имеет вид:

$$\Delta T = b \frac{d^2}{16l^2} \quad (4)$$

где:  $b = \frac{E}{d^2} \frac{1 - \rho_{om}}{c\gamma\sqrt{\alpha\tau}}$ ,  $E$  – энергия лазерного импульса (2 – 6 Дж),  $d$  – диаметр пятна фокусировки ЛИ,  $l$  – толщина образца,  $\rho_{om}$  – коэффициент отражения,  $c$  – удельная теплоемкость,  $\alpha$  – коэффициент температуропроводности,  $\tau$  – время импульса,  $\gamma$  – плотность вещества.

Предполагается, что нагревание образцов происходит именно только в момент воздействия лазерного излучения, во все другие времена идет процесс охлаждения (остывания) материала мишени.

Предложенная модель для расчёта изменения температуры поверхности образцов качественно описывает нагревание области пятна фокусировки ЛИ, хоть и не учитывает некоторые процессы, такие как затраты энергии на фазовые переходы, а также другие процессы, протекающие не только в облучаемых материалах, но и непосредственно вблизи их поверхности. В промежутке времени  $t \sim 10$  мкс между пиками лазерного импульса происходит охлаждение пластины посредством теплопередачи, которая в свою очередь является достаточно сложным процессом, состоящим из таких способов переноса теплоты, как кондуктивный (теплопроводность), тепловое излучение и естественная конвекция.

Аналитическое решение уравнения теплопроводности (1) описывающего охлаждение плоской пластины приводится в безразмерном виде и имеет вид

$$\theta = \sum_1^{\infty} \frac{2 \sin(\mu_n)}{\mu_n + \sin(\mu_n) \cos(\mu_n)} \cos(\mu_n \cdot X) \exp(-\mu_n^2 \cdot F_0) \quad (5)$$

Здесь  $\theta = \frac{T(t) - T_0}{T_0 - T_0}$ ,  $T(t)$  – температура в момент времени  $t$  в точке  $x$ ,  $T_0$  – начальная температура пластины,  $T_0$  – температура охлаждающего воздуха (жидкости),

$X = \frac{x}{L}$ ,  $F_0 = \frac{a \cdot t}{L^2}$  – число Фурье,  $a = \frac{\lambda}{C \cdot \rho}$  – коэффициент температуропроводности,  $\mu_n$  –  $n$ -ный корень уравнения:  $\text{ctg}(\mu) = \frac{\mu}{Bi}$ , где  $Bi = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda}$  – число Био.

Временные зависимости температуры в области пятна фокусировки лазерного излучения на поверхности металлов при энергии воздействующего лазерного импульса  $E = 2$  Дж представлены на рис. 1–3.

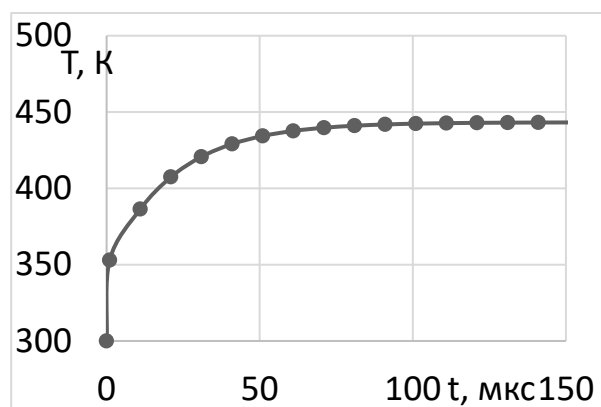


Рис. 1. Временная зависимость температуры в области пятна фокусировки ЛИ на поверхности пластины из титана в момент окончания воздействия излучения при энергии импульса  $E = 2$  Дж

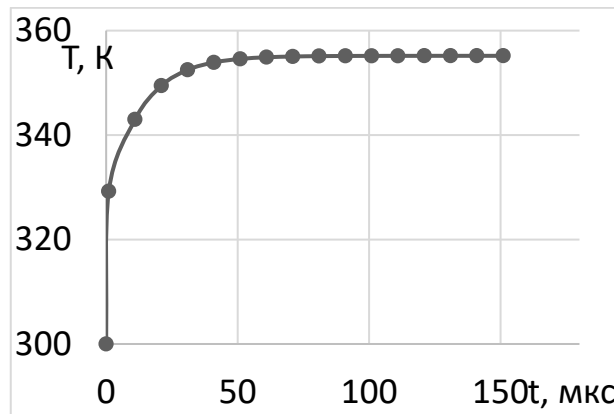


Рис. 2. Временная зависимость температуры в области пятна фокусировки ЛИ на поверхности пластины из кадмия в момент окончания воздействия излучения при энергии импульса  $E = 2$  Дж

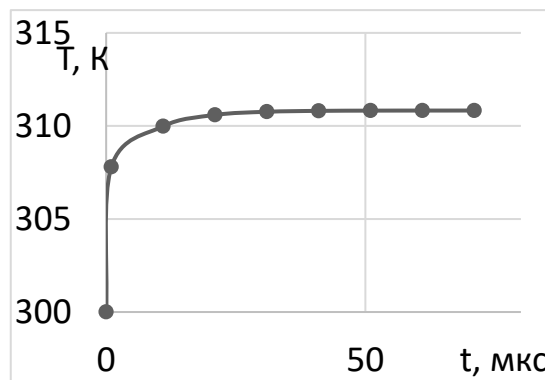


Рис. 3. Временная зависимость температуры в области пятна фокусировки ЛИ на поверхности пластины (медь) в момент окончания воздействия излучения из меди при энергии импульса  $E = 2$  Дж

### Заключение

Проведены расчеты нагревания облучаемого участка плоской поверхности образцов из металлов и диэлектрика (ПММА) при различных значениях энергии отдельных пиков лазерного излучения. Определены времена воздействия, при которых происходит разложение ПММА на мономеры и, как следствие, испарение и возгорание облучаемого материала. Построены временные зависимости температуры для всех образцов, а также рассчитаны максимально возможные достигаемые температуры при энергии лазерного импульса 2 – 6 Дж.

Подобная модель расчёта изменения температуры на поверхности металлов под воздействием лазерных импульсов не учитывает затрат энергии на испарение и плавление образца и ряд других процессов, протекающих как в облучаемом образце, так и у его поверхности. Тем не менее, подобная модель может быть использована для качественного описания нагревания рассмотренных материалов, по крайней мере в случае небольшого числа воздействующих на образец импульсов лазерного излучения.