

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВРЕМЕННОЙ ФОРМЫ ИСТОЧНИКА ПРИ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ МАТЕРИАЛОВ

И. Сархадов¹, З.К. Тухлиев¹, Х.Г. Муроди²

¹ Объединенный институт ядерных исследований

² Худжандский государственный университет имени академика Бободжона Гафурова

В работе представлены результаты численного исследования процесса лазерной абляции при воздействии источника излучения непрерывного действия и импульсов сложной временной структуры, задаваемой через функцию источника. Для этого в уравнение теплопроводности интенсивность излучения лазера вводится как произведение двух функций определяющие временную и пространственную зависимости действия на образец, при котором возможно изменение структуры действующего источника. Это позволило, численным моделированием, установить разницу воздействия формы источника на процесс абляции, при сохранение одинакового значения флюенса энергии излучения лазера. Установлено, что при наличии импульсной составляющей в излучении непрерывного лазера процесс лазерной абляции выходит из стационарного состояния и через определенный интервал времени вновь возвращается к нему.

Ключевые слова: абляция, флюенс энергии, теплопроводность, источник излучения, профиль температуры, кратер, импульс, скорость, длительность, испарение, стационарные состояния.

МОДЕЛСОЗИИ РАҚАМИИ ТАЪСИРИ ШАКЛИ ВАҚТИИ МАНБАИ ЛАЗЕРИ АБЛЯСИЯИ ЛАЗЕРИ МАВОДҲО

И. Сархадов, З.К. Тухлиев, Х.Г. Муроди

Дар ин мақола натиҷаҳои таҳқиқоти рақамии аблятсияи лазерӣ таҳти таъсири манбаи мавҷи лазерӣ бефосила ва импульсӣ сохти мураккаби вақтӣ дошта, ки аз ҷониби функсияи манбаъ муайян карда мешавад, пешниҳод карда шудааст. Барои ин, иқтидори нури лазер ба муодилаи гузаронандагии гармӣ ҳамчун ҳосили зарби ду функсия, ки вобастагии вақтӣ ва фазоии таъсирро ба намуна муайян мекунад, ворид карда мешавад, ки он имкони тағйир додани сохти таркибии манбаъро таъмин менамояд. Ин имкон дод, ки фарқияти таъсири шакли манбаъро ба раванди аблятсияи муайян намуда, ҳамзамон сели энергияи лазер доимӣ нигоҳ дошта шавад. Муайян карда шуд, ки дар ҳолати ҳузур доштани ҷузъи импульс дар радиатсияи лазерӣ бефосила, раванди аблятсияи лазерӣ аз ҳолати устувор мебарояд ва пас аз фосилаи муайяни вақт ба он бармегардад.

Калидвожаҳо: аблятсия, ҷараёни энергия, гузаронандагии гармӣ, манбаи радиатсия, профили ҳарорат, кратер, импульс, суръат, давомноқӣ, бухоришавӣ, ҳолатҳои устувор.

NUMERICAL SIMULATION OF THE INFLUENCE OF THE TEMPORAL SOURCE FORMATION DURING LASER ABLATION OF MATERIALS

I. Sarkhadov, Z.K. Tukhliev, H.G. Murodi

This paper presents the results of a numerical study of laser ablation under the influence of a continuous laser source and pulses with a complex temporal structure, defined by the source function. The laser intensity is introduced into the thermal conductivity equation as the product of two functions defining the temporal and spatial dependences of the effect on the sample, which may alter the structure of the source. This allowed numerical modeling to establish the difference in the impact of the source shape on the ablation process, while maintaining the same laser energy fluence. It was found that in the presence of a pulsed component in the continuous-wave laser radiation, the laser ablation process exits a steady state and returns to it after a certain time interval.

Keywords: ablation, energy fluence, thermal conductivity, radiation source, temperature profile, crater, pulse, velocity, duration, evaporation, steady states.

Введение

В последние годы импульсная лазерная абляция различных материалов привлекает все больший интерес как с точки зрения фундаментальных исследований процессов в веществе в экстремальных условиях сверхбыстрого подвода энергии (развитие неравновесной термодинамики, изучение критических явлений в сверхбыстрых процессах, лабораторное моделирование процессов в звездных атмосферах при вспышках новых и сверхновых звезд [1-6]) так и с целью применения в различных технологиях, таких как синтез новых наноматериалов, напыление тонких пленок сложных соединений, обработка и очистка поверхностей, хранение информации и многих других [2, 7, 8].

Основные уравнения

Моделирование лазерной абляции материалов проведено на основе уравнения теплопроводности со следующими начальными и граничными условиями:

$$\rho(T)c(T) \left[\frac{dT}{dt} - v(T_s) \frac{dT}{dz} \right] = \frac{d}{dz} \left(\lambda(T) \frac{dT}{dz} \right) + A(z, t), \quad 0 < z < z_{max}; \quad (1)$$

$$T(z, 0) = T_0; \quad 0 < z < z_{max} \quad \lambda(t) \frac{\partial T(z, t)}{\partial z} \Big|_{z=0} = v(T_s) L_{ev} \rho; \quad T(z_{max}, t) = T_0; \quad (2)$$

$$h = \int_0^t v(t)dt, \quad T_s = T(0, t); A(z, t) = f_1(z)f_2(t), \quad f_1(z) A_s \alpha e^{-\alpha z} e^{-\alpha_g h},$$

$$A_s = 1 - R(T_s), \quad f_2(t) = I_0 f(t), \quad \Phi = \int_0^\infty f_2(t)dt, \quad f(t) = \frac{t}{t_1} e^{-(t/t_1)} \quad (3)$$

Начальные условия (2) означают, что в начале образец находился при комнатной температуре и отсутствовал его испарение. Граничные условия (3) означают потерь тепла на первой границе из-за испарения, и отсутствие нагревания в окрестности второй границы. Такая постановка задачи справедлива для полуограниченного образца.

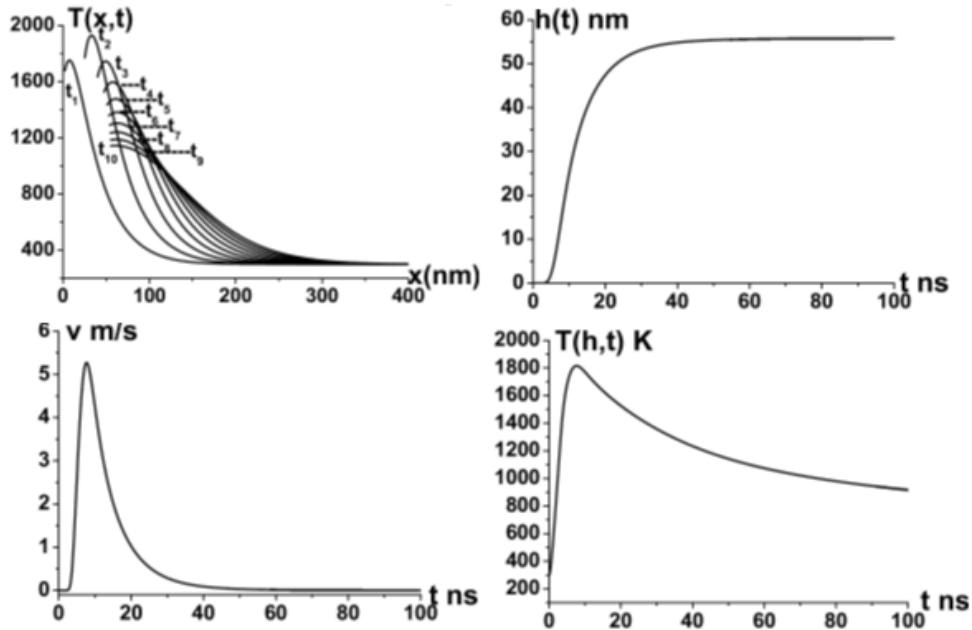


Рисунок 1 – Профили температуры образца полиимида при разных временах: $t_j = j \cdot 5 \text{ ns}$; $j = 1, 10$, динамики перемещения его границы из-за испарения, скорости перемещения его границы и его температуры на границе $x = h(t)$, при воздействии флюенса энергии $\Phi = 10^3 \text{ J/m}^2$

Обсуждение численных результатов

Численное моделирование проведено конечно-разностным методом явной схемы [11], для материала полиимида, у которого температурные зависимости теплофизических параметров имеет вид:

$$c(t) = 2550 - 1590 \cdot e^{\left(\frac{300-T}{460}\right) \frac{J}{\text{kgK}}}, \quad \lambda(t) = 0.155 \cdot (T/300)^{0.28} \frac{W}{\text{mK}}, \quad v = v_0 e^{-T_\alpha/T_s}, \quad T_\alpha = 1.57 \cdot 10^4 \text{ K}, \quad v_0 = 3 \cdot \frac{10^4 \text{ m}}{\text{s}}, \quad t_1 = 6.13 \text{ ns}.$$

На рисунке 1 приведены профили температур при разных временах, динамика перемещения границы из-за перемещения, ее скорости и температуры образца на границе $x = h(t)$ при воздействии флюенса энергии $\Phi = 10^3 \text{ J/m}^2$ на образцы полиимида.

Подобно работе [10] одним и тем же потоком энергии лазера различным образом действуем на материал, который соответствует разному выбору временной зависимости функции источника рис.2.

Приведем максимальные глубины кратера для разных источников: $h_{max}^1 = 73.51 \text{ nm}$, $h_{max}^2 = 71.62 \text{ nm}$, $h_{max}^3 = 74.37 \text{ nm}$, $h_{max}^4 = 73.43 \text{ nm}$, $h_{max}^5 = 74.23 \text{ nm}$. Эти результаты показывают, что лучше излучать материал дольше с меньшей интенсивности, чем коротко, но с большей интенсивностью. Существует оптимальная длительность действия источника для определенного флюенса энергии, при которой глубина кратера будет наибольшая. Временные зависимости этих источников имели прямоугольные формы. Из рисунка 3. видно, что при экспоненциальной форме временной зависимости источника глубина кратера при одном и том же флюенса энергии сильно отличается от случая прямоугольной формы временной зависимости источника. Следует отметить

однозначное соответствие динамики исследуемых параметров от временной формы источника, которое явно проявляется для случая 4 на рисунках 2 и 3, появлением двух отдельных откликов во всех зависимостях.

Приведем профили температур образца при временах до и после выключения источника рис.4. Как видно до выключения источника во всех графиках происходит перемещение профиля температуры, а после выключения источника перемещения профилей температуры не происходит. Это связано с испарением образца, из-за которого граница образца перемещается. После выключения источников образец охлаждается и испарение образца резко падает и перемещение границы также значительно уменьшается. Динамика профилей температур согласуется с динамикой источника. Теперь упрощаем задачу. Будем считать пар прозрачным для излучения, т.е. пусть $\alpha_g = 0$. Кроме того, предположим, поглощенная интенсивность излучения постоянна: $I_s = \text{const}$ (достаточно длинный лазерный импульс). На рис.5 приведены профили температур в разных моментах времени, динамика глубины кратера, скорости перемещения границы из-за испарения и температура образца на поверхности $x = h(t)$, когда на образец действует лазер с постоянной интенсивности $I_0 = 10^7 \text{ W/cm}^2$. Как видно из графики стационарное состояние устанавливается всего в течении 4 – 5 ns. Вблизи поверхности образца $x = h(t)$ существует область его перегрева, поскольку максимальная температура устанавливается на расстоянии $z = z_{\text{max}}$ от поверхности образца. Результаты численных расчетов приведенных на рис.6 показывают динамику этой разницы, как по температуре, так и по координате максимума температуры, занимающий несколько наносекунд.

Теперь рассмотрим, как влияет на стационарное решение внешние импульсные лазеры. Для этого на функцию $f(t) = 1$ добавим короткодействующий источник $f_1(t) = 0$, $0 < t \leq t_0$, $f_1(t) = f_2(t - t_0)$, $f_2(t) = b(1 - e^{-\alpha_1 t}) / (1 + e^{-\alpha_1(t-t_0)})$, $b = 1$, $t_0 = 10 \text{ ns}$. На рис.7 приведены динамика профили температур, перемещения границы из-за испарения, скорости перемещения и температуры образца на его поверхности при добавлении импульсного лазерного воздействия на воздействие лазера постоянной интенсивности. Из графиков видно, что при воздействии импульсного воздействия происходит дополнительный нагрев образца как на поверхности, так и внутри его скорость перемещения границы увеличивается, но после выключения источника профили температур, скорость перемещения и температура на поверхности образца вернутся к стационарному состоянию.

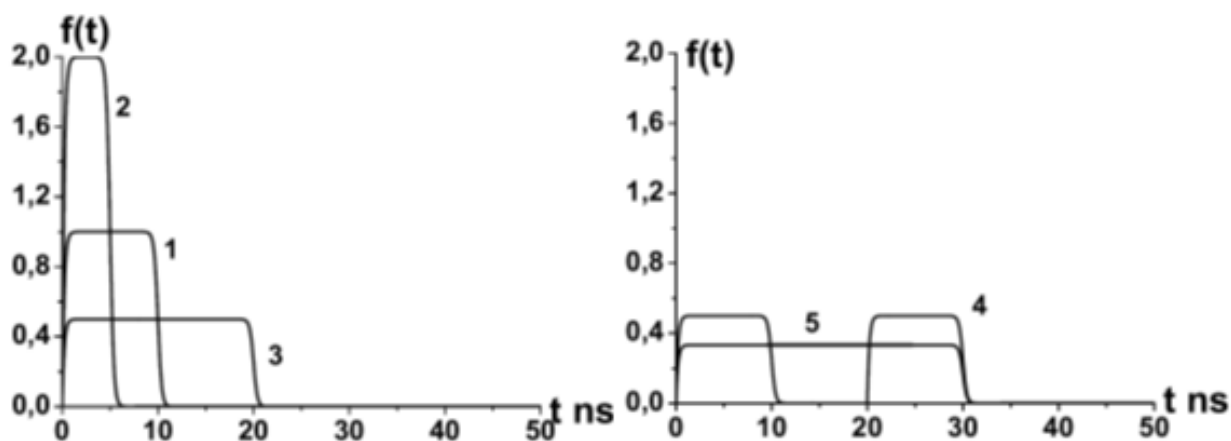


Рисунок 2 – Временные зависимости источника лазера, которые имеют одинаковые флюенсы энергии.

$f(t) = b(1 - e^{-\alpha_1 t}) / (1 + e^{-\alpha_1(t-t_0)})$, $\alpha_1 = \alpha_2 = 5$. 1) $-b = 1$, $t_0 = 10 \text{ ns}$, 2) $-b = 2$, $t_0 = 5 \text{ ns}$, 3) $-b = 0.5$, $t_0 = 20 \text{ ns}$, 4) $-b = 0.5$, $t_0 = 10 \text{ ns}$, $f_4(t) = f(t) + f_1(t)$, $f_1(t) = 0$, при $t < 20 \text{ ns}$ и $f_1 = f(t - 20 \text{ ns})$ при $t \geq 20 \text{ ns}$. 5) $-b = 1/3$, $t_0 = 30 \text{ ns}$.

На рисунке 3 приведены динамика изменения температуры на поверхности образца $T(h(t), t)$, скорости перемещения границы из-за испарения $v_{ph}(t)$ и глубина кратера $h(t)$ при действии разных источников одинаковых флюенсов ($\Phi = 10^3 \text{ J/m}^2$).

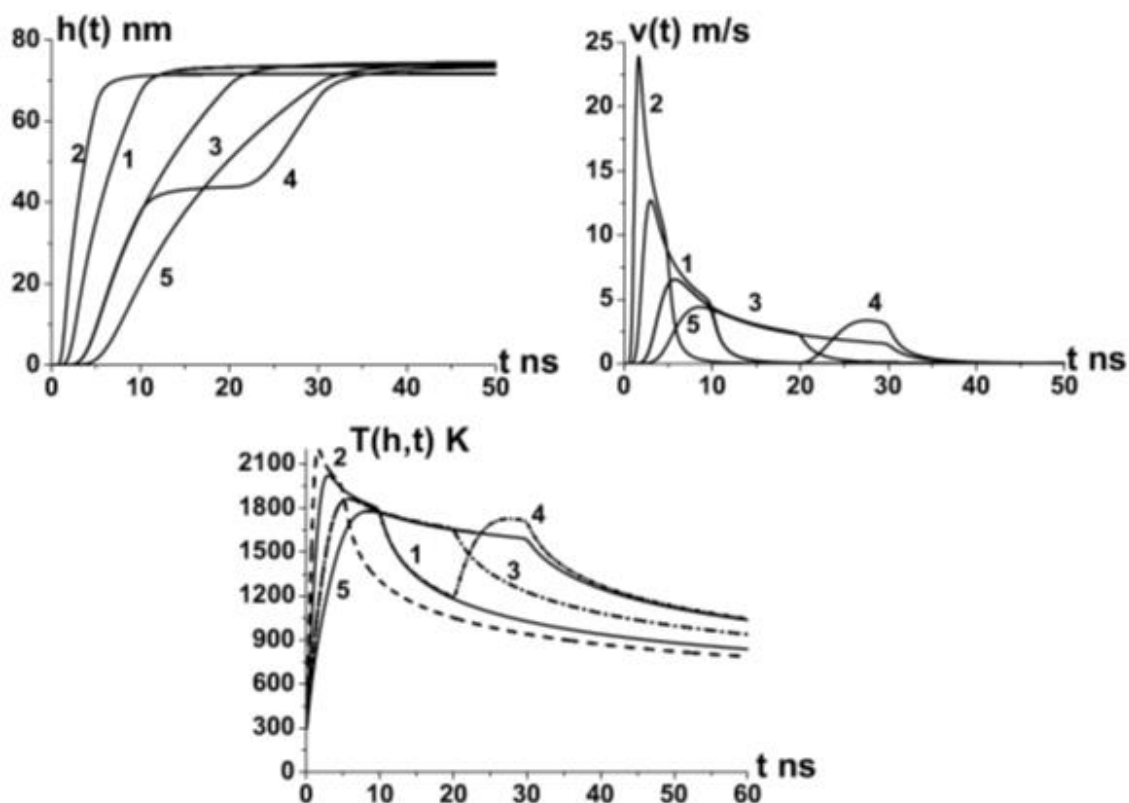


Рисунок 3 – Зависимости температуры $T(h(t), t)$, скорости границы испарения $v_{ph}(t)$ и глубина кратера $h(t)$ при действии разных форм источника приведенных на рис.2.

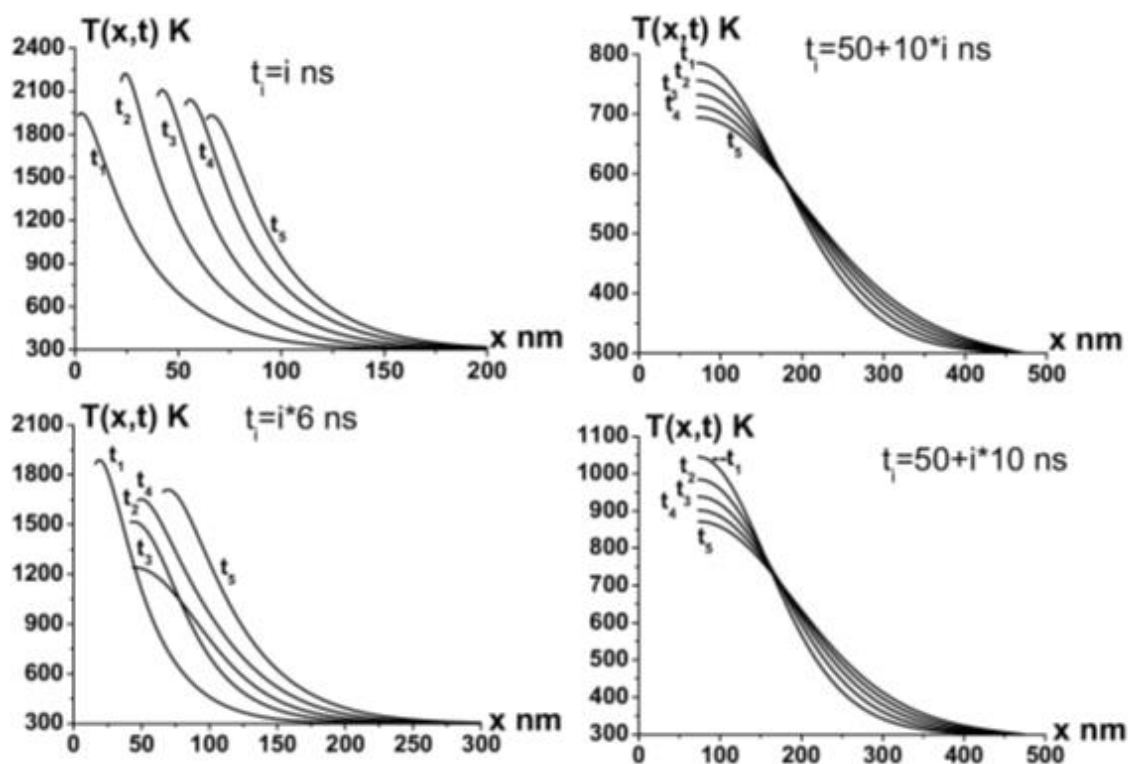


Рисунок 4 – Динамика зависимости температуры образца до (слева) и после (справа) выключения источника при разных формах источника.

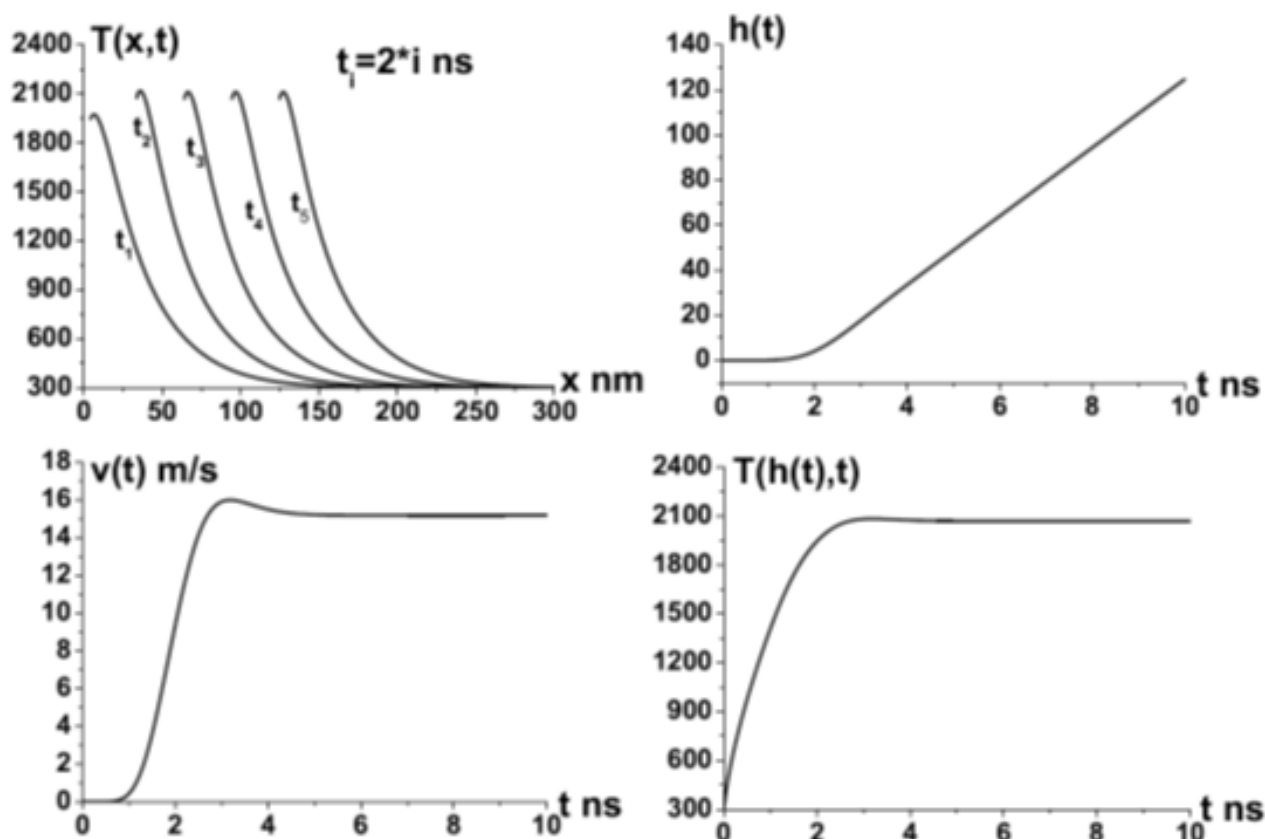


Рисунок 5 – Профили температуры образца полиимида при разных временах: $t_j = j \cdot 2$ ns; $j = 1, 5$, динамики перемещения его границы $h(t)$ из-за испарения, скорости перемещения его границы $v_{ph}(t)$ и его температуры на границе $x = h(t)$, при воздействии лазера постоянной интенсивности $I_0 = 10^7$ W/cm²

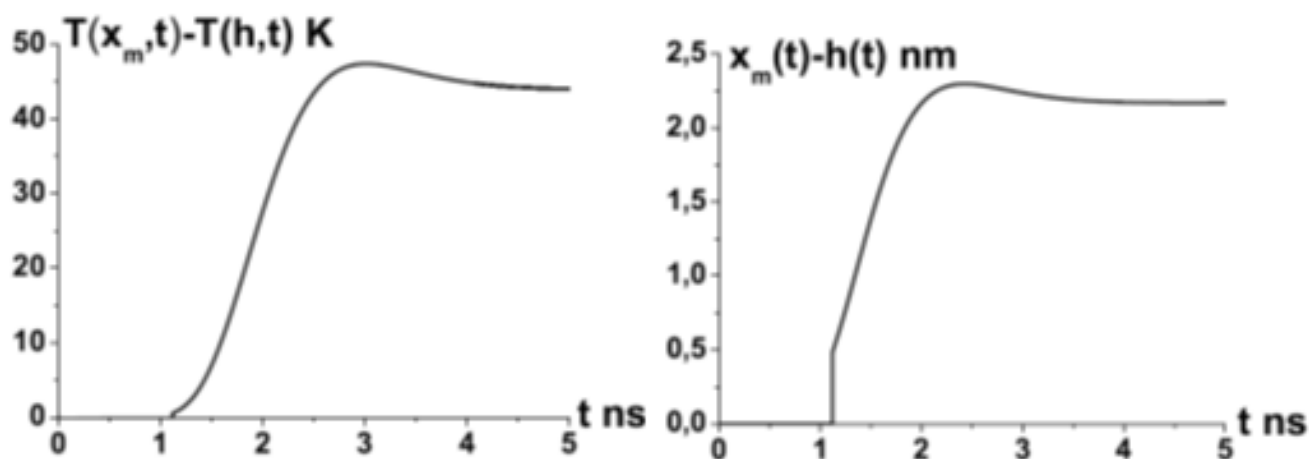


Рисунок 6 – Динамики разности максимума температуры внутри образца и температуры на его на границе $x = h(t)$ $T(x_m,t) - T(h(t),t)$, и координаты максимума температуры относительно поверхности $x = h(t)$, при воздействии лазера постоянной интенсивности $I_0 = 10^7$ W/cm².

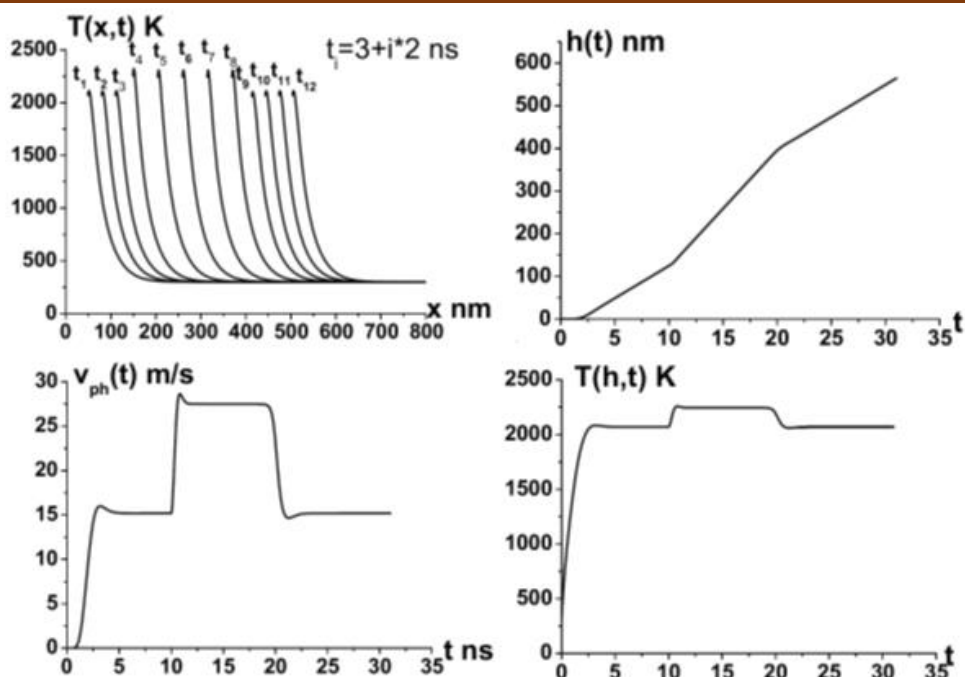


Рисунок 7 – Профили температуры образца полиимида для разных времен: $t_j = j \cdot 3 + j \cdot 2 \text{ ns}$; $j = 1, 5$, динамика перемещения границы $h(t)$ из-за испарения, скорости перемещения $v_{ph}(t)$ и температуры на границе $x = h(t)$, при наличии импульса лазерного излучения в излучении непрерывного лазера интенсивности $I_0 = 10^7 \text{ W/cm}^2$

Заключение

По результатам проведенного численного моделирования можно сформулировать выводы в следующем виде:

1. При сохранении постоянного значения потока энергии излучения, в лазерной абляции сверхкороткими импульсами, изменение временной части функции источника по-разному действует на образец.

2. При постоянной интенсивности источника, когда временная зависимость источника полагается постоянной функцией при некоторых предположениях (пренебрежение затухания интенсивности источника в паровой области $ag = 0$) наступает стационарное состояние образца.

3. В профилях температуры около границы $x = h(t)$ происходит перегрев образца, т.е. температура образца внутри его выше, чем на самой границе.

4. При добавлении импульсного воздействия на источник постоянной интенсивности образец выходит из стационарного состояния и через некоторое время возвращается на прежнее стационарное состояние.

Рецензент: Абдурасулов А.А. – д.ф.м.-н., доцент кафедры физики ТПУ имени академика М.С. Осими.

Литература

1. Захаров Л.А., Булгакова Н.М. Численное моделирование лазерной абляции металлов и полимеров при воздействии импульсами инфракрасного излучения: влияние начальной температуры образца // Журнал Вестник НГУ. Серия Физика. 2010. Том 5, № 1. С. 37. DOI: 10.54362/1818-7919-2010-5-1-37-47
2. Bauerle D. Laser Processing and Chemistry // Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag. 2000. DOI:10.1007/978-3-662-04074-4
3. Miotello A., Kelly R. Laser-Induced Phase Explosion: New Physical Problems when a Condensed Phase Approaches the Thermodynamic Critical Temperature // Appl. Phys. A. 1999, Vol. 69, P. S69. DOI: https://doi.org/10.1007/s003399900296
4. Bulgakova N. M., Bulgakov A. V., Bourakov I. M., Bulgakova N. A. Pulsed Laser Ablation of Solids and Critical Phenomena // Appl. Surf. Sci. 2002, Vol. 197–198, P.96. DOI:10.1016/S0169-4332(02)00310-0
5. Pound M. W., Kane J. O., Ryutov D. D., Remington B. A. et al. Pillars of Heaven // Astrophysics and Space Science. 2007, Vol. 307, P. 187.
6. Фортов В. Е. Мощные ударные волны и экстремальные состояния вещества // Успехи физ. наук. 2007, Т. 177, № 4, С. 347. DOI: https://doi.org/10.3367/UfNr.0177.200704c.0347

7. Meijer, J., Du, K., Gillner, A., Hoffmann, D., Masuzawa, T., Ostendorf, A., Poprawe, R., & Schulz, W. Laser Machining by Short and Ultrashort Pulses, State of the Art and New Opportunities in the Age of the Photons // In Annals of the CIRP (pp. 531-550). Ed. Edition Colibri Ltd. Uetendorf. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61699-0](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61699-0)
8. Zoubir A., Shah L., Richardson K., Richardson M. Practical Uses of Femtosecond Laser Micro-Materials Processing // Appl Phys A 77, 311–315 (2003). <https://doi.org/10.1007/s00339-003-2121-9>
9. Анисимов С.И., Лукьянчук Б.С. Избранные задачи теории лазерной абляции // УФН, 2002. Т. 172. №3. С. 301. DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.0172.200203b.0301>
10. И.В. Амирханов, Е.В. Земляная, И.В. Пузынин, Т.П. Пузынина, И. Сархадов. О влиянии формы источника в модели фазовых переходов в металлах, облучаемых импульсными пучками ионов. Сообщение ОИЯИ Р11-2002-78, Дубна, 2002, 18 с.
11. А.А.Самарский. Теория разностных схем. М.: Наука, 1983, с.258-276.
12. Бозоров, Ш.А., Одиназова Б.Н., Саидан Д. [и др.] Вероятностная математическая модель поверхностного дефектообразования металла с учётом влияния факторов режима обжарки / Вестник Педагогического университета. Естественные науки. - 2020. - № 1-2(5-6). - С. 120-127. EDN: EOPBVD

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН — СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ — INFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Сархадов Иброҳим	Сархадов Ибрагим	Sarkhadov Ibragim
н.и.ф.м.	к.ф.м.н.	PhD
Институти муштараки тадқиқоти ҳастай, ш. Дубна, Россия	Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия	Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia
E-mail: ibrohim@jinr.ru		
TJ	RU	EN
Тухлиев Зафар Қамаридинович	Тухлиев Зафар Камаридинович	Tukhliev Zafar Kamariddinovich
н.и.ф.м.	к.ф.м.н.	PhD
Институти муштараки тадқиқоти ҳастай, ш. Дубна, Россия	Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия	Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia
TJ	RU	EN
Муродӣ Ҳалимҷон Гафурзода	Муроди Халимджон Гафурзода	Murodi Halimjon Ghafurzoda
д.и.ф.м.	д.ф.м.н.	Doctor of Physical and Mathematical Sciences
ДДХ ба номи академик Б.Гафуров	ХГУ имени академика Б.Гафурова	KSU named after academician B. Gafurov"
E-mail: microwavetgu@gmail.com		
ORCID Id: 0000-0001-9249-7779		