МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ МАТЕРИАЛА

© И.И. Латыпов, Л.А. Бигаева, В.В. Чудинов

LatypovII@rambler.ru, BigLA@rambler.ru, Chudinovvv@rambler.ru

УДК 517.956

DOI: 10.33184/mnkuomsh2t-2021-10-06.84.

В докладе рассматривается математическое описание абляции материала под действием нано-фемтосекундного импульсного лазерного излучения. Исходная краевая задача сводится к решению сингулярно возмущенной краевой задачи нестационарной теплопроводности с нелинейными граничными условиями на подвижных границах. Приближенное решение получается в виде асимптотического разложения решения в смысле Пуанкаре по степеням малых параметров, в зависимости от близости рассматриваемой точки к границам.

Ключевые слова: уравнение теплопроводности, сингулярное возмущение, подвижная граница, асимптотическое разложение

Modeling of pulsed laser ablation of a material

The paper considers a mathematical description of the ablation of a material under the action of nano-femtosecond pulsed laser radiation. The initial boundary value problem is reduced to the solution of a singularly perturbed boundary value problem of non-stationary thermal conductivity with nonlinear boundary conditions on mobile boundaries. The approximate solution is obtained in the form of an asymptotic expansion of the solution in the Poincare sense by degrees of small parameters, depending on the proximity of the point under consideration to the boundaries.

Keywords: heat equation, singular perturbation, moving boundary, asymptotic expansion

Быстрое развитие экспериментальной техники привело к тому, что стало необходимым изучения воздействия высокоэнергетических источников на различные материалы. Одним из этих направлений является исследование абляции под действием ультракоротких лазерных импульсов пикосекундного и фемтосекундного диапазонов, важнейшими параметрами которого являются длина волны, интенсивность и длительность

Латыпов Ильмир Ибрагимович, к.ф.-м.н., доцент, Бирский филиал БашГУ (Бирск, Россия); Ilmir Latypov (Birsk branch Bashkir State University, Birsk, Russia)

Бигаева Люзия Ахатовна, к.ф.-м.н., доцент, Бирский филиал БашГУ (Бирск, Россия); Luzia Bigaeva (Birsk branch Bashkir State University, Birsk, Russia)

Чудинов Валерий Валентинович, к.ф.-м.н., доцент, Бирский филиал БашГУ (Бирск, Россия); Valera Chudinov (Birsk branch Bashkir State University, Birsk, Russia)

импульса. При этом процессы абляции и плазмообразование являются основными при лазерной обработке материалов. Импульсная лазерная абляция лежит в основе многих технологий обработки материалов (сверление, резка, напыление тонких пленок, структурирование материалов на микро-и нано уровнях). При воздействии лазерного излучения на ультракоротких диапазонах усиливается роль испарения (как поверхностного, так и объемного) [1]. В последние годы наблюдается повышение интереса к исследованиям воздействия лазерного излучения в пико-и фемтосекундном диапазонах на различные материалы [3-5].

В работе ставится задача аналитического исследования распределения температуры в материале, который подвергается высокоинтенсивному воздействию лазерного излучения ультракороткого диапазона. Рассматривается процесс абляции материала, предполагая, что расплавленный материал мгновенно выносится из области воздействия, область облучения намного превосходит глубину проплавления, что позволяет математически описать данный процесс в одномерном и однофазном приближении [2,4,5].

$$\rho(T) \cdot c(T) \frac{\partial T(z, t)}{\partial t} = \rho(T) c(T) \nu(t) \frac{\partial T(z, t)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T) \frac{\partial T(z, t)}{\partial z} \right) + A(z, t),$$

$$-\lambda(T) \cdot \frac{\partial T(z, t)}{\partial z} \Big|_{z=0} = \nu(t) \cdot L \cdot \rho(T_s) + \psi_1(t) + \sigma_1 [T^4(z, t) - U_0^4],$$

$$A(z, t) = I_0 A_s \alpha \cdot e^{-\alpha \cdot z - \alpha_g \cdot h} \cdot e^{-\frac{t}{t_1}} \cdot \frac{t}{t_1}, \quad A_s = 1 - R(T_s), \quad I_0 = \frac{F}{t_1}, \quad h = \int_0^t \nu(t) dt,$$

$$-\chi \cdot \frac{\partial T(z, t)}{\partial z} \Big|_{z=H} = \psi_2(t) + \sigma_2 [T^4(z, t) - U_0^4], \quad T(z, 0) = T_0, \quad T_s = T(0, t),$$

$$\Omega = \{ (x, t) : 0 < z < H, \quad 0 < t < t_\infty \},$$

где $c(T)$, $\lambda(T)$, $\rho(T)$ - соответственно удельная теплоемкость, теплопроводность и плотность материала при температуре $T(z, t)$; h - глубина кратера на поверхности материала; ν - скорость перемещения границы из-за испарения; L - удельная теплота сублимации; I_0 - интенсивность лазерного излучения; R - коэффициент отражения лазерного излучения; α , α_g - коэффициенты поглощения лазерного импульса; t_1 - длительность импульса. Функции ψ_1 , ψ_2 и константы σ_1 , σ_2 определяют режимы теплообмена на соответствующих сторонах пластины. Функция $A(z, t)$ - описывает вид и характер источника тепла.

Литература

1. Анисимов С.И., Лукьянчук Б.С. Избранные задачи теории лазерной абляции. // УФН, Т.172, 3 (2002), 301-333.
2. Латыпов И.И. Приближенный расчет распределения температурного поля активного элемента твердотельного лазера.// Труды кафедры экспериментальной и теоретической физики института физики молекул и кристаллов УНЦ РАН. Вып. 1. Уфа.: Гилем, 2001. –С. 82-92.
3. Latypov I.I. Approximate solution to a singular perturbed boundary value problem of thermal shielding//IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 918 (2017) 012005
4. Latypov I.I., Bigaeva L.A., Chudinov V.V. [et al.] Material evaporation with ultrashort laser exposure // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Workshop "Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering – MIP: Engineering – 2019 Krasnoyarsk, 04–06 апреля 2019 года / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. – Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2019. – P. 22068. – DOI 10.1088/1757-899X/537/2/022068.
5. Латыпов, И.И. Испарение пластины под действием потоков энергии переменной интенсивности / И. И. Латыпов, Л. А. Бигаева, В. В. Чудинов // Доклады Башкирского университета. – 2018. – Т. 3. – № 6. – С. 601-607.