

УДК 519.6

Численное моделирование тепловых процессов, возникающих в материалах, при воздействии аттосекундных лазерных импульсов

И. В. Амирханов, И. Сархадов, З. К. Тухлиев

Лаборатория информационных технологий,
Объединенный Институт Ядерных Исследований,
141980, ул. Жолио-Кюри 6, Дубна, Московская область, Россия

Email: ibrohim@jinr.ru

В предыдущей работе была предложена модификация модели термического пика (МТП), базирующаяся на системе двух связанных гиперболических уравнений теплопроводностей для электронного газа и кристаллической решетки для моделирования тепловых процессов, возникающих в материалах под действием фемтосекундных лазерных импульсов.

Действие лазера в электронном газе, было учтено через функцию источника, которую выбрали в виде двойного фемтосекундного лазерного импульса. В гиперболическом уравнении в отличие от параболического, присутствуют дополнительные параметры, которые характеризуют времена релаксации потока тепла в электронном газе и кристаллической решетки. Кроме этого, в источнике гиперболического уравнения присутствуют дополнительные слагаемые-производные от плотности мощности источника параболического уравнения и от разности температур электронного газа и кристаллической решетки. Это означает, что на температуру образца оказывает влияние не только плотность мощности источника, но и скорости его изменения.

В предыдущей работе численное моделирование проводилось для тепловых процессов, возникающих в материалах под действием фемтосекундных лазерных импульсов.

В настоящей работе проводятся аналогичные численные исследования для фемтосекундных и аттосекундных лазерных импульсов с одними импульсами. Поскольку при аттосекундных воздействиях время проникновения лазерного излучения в образец сравнимо с время действия лазера, для учета этого эффекта в функции источника используется функция Хевисайда. Проводятся сравнительный анализ численных результатов полученных обеими моделями.

Ключевые слова: Параболическое и гиперболическое уравнения модели термического пика, фемтосекундный и аттосекундный лазерные импульсы, численное моделирование

1. Введение

Исследование взаимодействия фемтосекундных лазерных импульсов с веществом является важным в связи с многими фундаментальными проблемами (физика неравновесных процессов, генерация ударных волн, лазерное ускорение ионов, модификация свойств облучаемого материала и т.д.) [1, 2].

В настоящее время, возрастает необходимость в создании и совершенствовании достоверных физических моделей, способных описывать различные процессы в веществе. При этом компьютерное моделирование занимает сейчас одно из главных мест в исследовании таких задач.

2. Постановка задачи

Исходные уравнения в безразмерных переменных и величинах имеют вид [3]:

$$\frac{\partial T_e}{\partial t} + \tau_e \frac{\partial^2 T_e}{\partial t^2} = k_e \frac{\partial^2 T_e}{\partial x^2} - \gamma_e (T_e - T_i) - \gamma_e \tau_e \frac{\partial}{\partial t} (T_e - T_i) + A(x, t) + \tau_e \frac{\partial A(x, t)}{\partial t},$$

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} + \tau_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial t^2} = k_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} + \gamma_i (T_e - T_i) + \gamma_i \tau_i \frac{\partial}{\partial t} (T_e - T_i).$$

$$T_{\alpha}(x, 0) = 1; \left. \frac{\partial T_{\alpha}(x, t)}{\partial t} \right|_{t=0} = 0;$$

$$\left. \frac{\partial T_{\alpha}(x, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0; T_{\alpha}(x_{max}, t) = 1; \alpha = e, i.$$

$$A_e(x, t) = A_0 f_1(x) f_2(t) f_3(x, t),$$

$$A_0 = \frac{I_0 [1 - R(\bar{T}_s)] \Delta t}{L_p C_e T_0}; f_1(x) = \exp(-\beta x),$$

$$f_2(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t - t_0)^2}{2\sigma_t^2}\right], f_3(x, t) = \chi(ct - x).$$

При $\tau_e = 0$, $\tau_i = 0$ гиперболический МТП переходит в параболический МТП.

В предыдущих работах численное моделирование проводилось для тепловых процессов возникающих в материалах под действием фемтосекундных лазерных импульсов. В настоящей работе аналогичные исследование, для аналогичных процессов проводится при воздействии аттосекундных лазерных импульсов с одним импульсом. Поскольку в случае аттосекундных лазерных воздействий время проникновения лазерного излучения в образец сравнимо с времени воздействия лазерного источника, для учета эффекта проникновения лазерного излучения в образец, в функции источника введена функция Хевисайда $\chi(x) = 1, x \geq 0, \chi(x) = 0, x < 0$. Проводится сравнительный анализ численных результатов для тепловых процессов, возникающих в материалах под действием аттосекундных лазерных импульсов с аналогичными результатами полученные при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и МОКНСМ в рамках научного проекта № 20-51-44001.

Литература

1. Анисимов С.И., Лукьянчук Б.С. Избранные задачи теории лазерной абляции. УФН, 2002г., т. 172, №3, стр. 301-333.
2. Вейко В.П., Либенсон М.Н., Червяков Г.Г., Яковлев Е.Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. Силовая оптика. /Под ре. В.И. Конова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 312 с. – ISBN 978-5-9221-0934-5.
3. Амирханов И.В., Сархадов И., Тухлиев З.К. Моделирование тепловых процессов, возникающих в материалах под действием лазерных импульсов в рамках гиперболической модели термического пика. // Препринт ОИЯИ P11-2022-31

UDC 519.6

Numerical modeling of thermal processes occurring in materials exposed to attosecond laser pulses

I. V. Amirkhanov, I. Sarkhadov, Z. K. Tukhliev

*Laboratory of Information Technologies
Joint Institute for Nuclear Research
141980, Joliot-Curie 6, Dubna, Moscow region, Russia*

Email: ibrohim@jinr.ru

In previous work, a modification of the thermal peak model (TPM) was proposed, based on a system of two coupled hyperbolic thermal conductivity equations for the electron gas and the crystal lattice to simulate thermal processes occurring in materials under the action of femtosecond laser pulses.

The action of the laser in the electron gas was taken into account through the source function, which was chosen in the form of a double femtosecond laser pulse. In the hyperbolic equation, unlike the parabolic one, there are additional parameters that characterize the relaxation times of the heat flow in the electron gas and the crystal lattice. In addition, the source of the hyperbolic equation contains additional terms derived from the power density of the source of the parabolic equation and from the temperature difference between the electron gas and the crystal lattice. This means that the temperature of the sample is influenced not only by the power density of the source, but also by the rate of its change.

In previous work, numerical simulations were carried out for thermal processes occurring in materials under the action of femtosecond laser pulses.

In this work, similar numerical studies are carried out for femtosecond and attosecond laser pulses with single pulses. Since, during attosecond exposures, the time of penetration of laser radiation into the sample is comparable to the laser action time, the Heaviside function is used to take this effect into account in the source function. A comparative analysis of the numerical results obtained by both models is carried out.

Key words and phrases: Parabolic and hyperbolic equations of thermal peak model, femtosecond and attosecond laser pulses, numerical simulation