

## НАГРЕВ БЕСКОНЕЧНОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНЫ ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

*А.Н. Александров, Е.В. Голубев*

**В работе рассматривается решение уравнения теплопроводности в пространстве, ограниченном двумя параллельными плоскостями. Решение задачи, учитывающее проникновение оптического излучения в вещество и время релаксации теплового потока, получено в виде интегрального представления для осесимметричного распределения интенсивности. Получена оценка для максимальной избыточной температуры для распределения интенсивности в виде гауссовой функции в пределе бесконечно малой толщины скин-слоя.**

В металлах поглощение света обусловлено взаимодействием его с электронами. Возбужденные электроны взаимодействуют с фононами решетки, а также с другими электронами и передают им свою энергию [1]. Среднее время между соударениями электронов (время релаксации электронной подсистемы) в проводнике составляет  $10^{-14}$ – $10^{-13}$  с [2, 3]. Установление же локального равновесия, когда можно говорить о равенстве температур электронной и фононной подсистем (т.е. о термодинамической температуре вещества), происходит за время порядка  $t_r \approx 10^{-11}$  с [2, 4].

Можно считать, что световая энергия мгновенно переходит в тепло для импульсов лазера с модуляцией добротности (и более длительных), однако, в случае поглощения пикосекундных импульсов это допущение оказывается неверным [3]. Закон теплопроводности Фурье должен быть заменен более общим соотношением, которое называется уравнением Каттанео [5]. Согласно [6, 7], уравнение Каттанео учитывает, что тепло распространяется не бесконечно быстро, а с некоторой конечной фазовой скоростью, которая называется скоростью распространения теплового возмущения. Это позволяет описывать реальную ситуацию в случае высокоинтенсивного и нестационарного процесса нагрева, при которой тепловой поток устанавливается в среде не мгновенно, а характеризуется конечным временем релаксации.

В отечественной научной литературе первое упоминание о времени релаксации теплового потока и конечной скорости распространения теплового возмущения было сделано А.В. Лыковым [7] в 1967 году. Проблеме распространения теплового возмущения посвящено огромное количество работ в отечественной и зарубежной печати (см., например, обзоры [8–10]).

Теория теплопроводности, описывающая процесс быстрого нагрева и охлаждения металла, должна учитывать реальный характер изменения теплофизических свойств материала. Это приводит к необходимости решения нелинейных дифференциальных уравнений. Кроме того, источник теплоты, вследствие изменения поглощательной способности с температурой, дополнительно вносит нелинейность в дифференциальные уравнения. Согласно данным, представленным в [3], при поглощении лазерного импульса длительностью 1 мкс в стали и в меди, коэффициент поглощения изменяется в 5 раз по сравнению с начальным, что приводит к поглощению в мишени большей части энергии оптического импульса.

В данной работе будем рассматривать нагрев излучением однородной пластины, находящейся в равновесном состоянии, учитывая перенос теплоты теплопроводностью и пренебрегая теплоотдачей других видов. Будем предполагать, что физические параметры среды при нагревании не изменяются и фазовых переходов не происходит.

Выберем цилиндрическую систему координат, вдоль оси  $z$  которой распространяется импульсное излучение с распределением интенсивности  $I(r, t)$ . Бесконечная пластина, поглощающая излучение, занимает область  $z \in [0, h]$ , где  $h$  – толщина пластины. Будем считать, что стенки пластины тепло не проводят, а в объеме пластины действуют тепловые источники, плотность которых подчиняется закону Бугера-Ламберта. Распределение избыточной температуры  $T(r, z, t)$  является решением уравнения теплопроводности с граничными условиями [6]

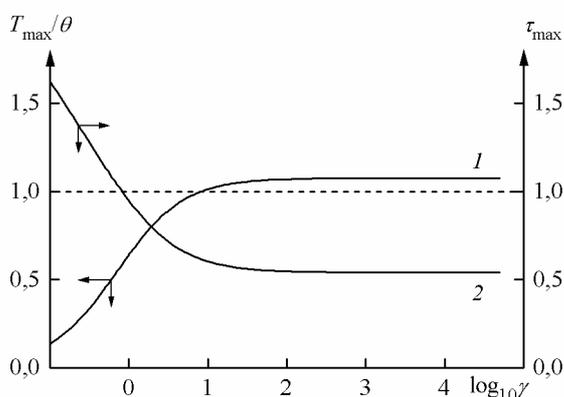


Рис. 3

Для металлов безразмерный коэффициент поглощения  $\gamma$  принимает значения по порядку величины от 0,1 (лазерный импульс пикосекундной длительности) до 100 (наносекундный импульс). Как видно из рис. 3 (зависимость 1) величина  $\theta$  является хорошей оценкой для значения максимальной избыточной температуры в среде  $T_{\max}$ , обусловленного действием оптического импульса с гауссовой временной формой. При  $\gamma > 10$  погрешность такой оценки не превышает 8% поскольку отношение  $T_{\max}/\theta$  стремится к значению 1,07618 при уменьшении толщины скин-слоя до нуля. Значение времени  $\tau_{\max}$ , соответствующее  $T = T_{\max}$ , в этом случае, составляет 0,5409.

Приближенное выражение (15) может быть использовано для оценки величины эффектов, связанных с поглощением оптических импульсов длительностью большей времени релаксации теплового потока вещества (для металлов порядка 10 пс). Максимальная избыточная температура в полупространстве пропорциональна максимальной интенсивности первичного излучения и это объясняется пренебрежением тепловыми потоками в направлениях, параллельных поверхности, в процессе поглощения.

В заключении выясним область определения полученных выражений (2) и (4) по длительности оптического импульса, качественно рассмотрев уравнение теплопроводности (1) и его решение. Анализ решения уравнения теплопроводности, записанного в виде интегрального представления (2) невозможен, однако на основании данных расчета можно сделать следующие выводы. В области малых частот ( $t_r \omega \ll 1$ ) получаем зависимости, согласующиеся с выводами теории распространения тепла, положения которой основаны на законе Фурье. В этом случае уравнения (2) и (4) описывает необратимый процесс релаксации теплового возмущения. В пределе больших частот ( $t_r \omega \gg 1$ ) гиперболическое уравнение теплопроводности описывает обратимый процесс, при котором температурные возмущения распространяются с конечной скоростью.

Для больших частот выражение (4), вообще говоря, неприменимо. Согласно [17], необходимо учитывать тепловые потоки высших порядков, каждый из которых характеризуется своим временем релаксации, или использовать двухтемпературную модель нагрева среды как это сделано, например, в [1, 18]. Следовательно, область определения полученных выражений ограничивается длительностью оптического импульса порядка времени релаксации теплового потока.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, в рамках технического задания №01.09.04Ф.

### Литература

1. Анисимов С.И., Имас Я.И., Романов Г.С., Ходыко Ю.В. Действие излучения большой мощности на металлы. – М.: Наука, 1970. – 272 с.
2. Григорьев Б.А. Импульсный нагрев излучениями. Т.1. – М.: Наука, 1974. – 320 с.
3. Рэди Дж. Действие мощного лазерного излучения. – М.: Мир, 1974. – 486 с.
4. Миркин Л.И. Физические основы обработки материалов лучами лазера. – М.: Издательство Московского университета, 1975. – 384 с.
5. Carlo Cattaneo «Sulla conduzione de calore». Atti del Semin. e Mat. Fis. Univ. Modena, 1948. 3. 3.
6. Григорьев Б.А. Импульсный нагрев излучениями. Т.2. – М.: Наука, 1974. – 728 с.
7. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.
8. Joseph D.D., Preziosi L. Heat waves // Rev. Mod. Phys. – 1989. – V.61. – №1. – P.41–73.
9. Joseph D.D., Preziosi L. Addendum to paper «Heat waves» // Rev. Mod. Phys. – 1990. – V.62. – №2. – P.375–391.
10. Jou D., Casas-Vazquez J., Lebon G. Extended irreversible thermodynamics // Rep. Prog. Phys. – 1988. – V.51. – P.1105–1179.

11. Диткин В.А., Прудников А.П. Интегральные преобразования и операционное исчисление. – М.: Физматгиз, 1961. – 524 с.
12. Таблицы физических величин: Справочник. / Под ред. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1005 с.
13. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1977. – 736 с.
14. Аполлонов В.В., Прохоров А.М., Хомич В.Ю., Четкин С.А. Термоупругое воздействие импульсно-периодического излучения на поверхность твердого тела // Квантовая электроника. – 1982. – Т. 9. – № 2. – С.343–353.
15. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. – М.: Высш. шк., 1985. – 480 с.
16. Двайт Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы. – М.: Наука, 1973. – 228 с.
17. Dedeurwaerdere T., Casas-Vazquez J., Jour D. and Lebon G. Foundations and applications of a mesoscopic thermodynamic theory of fast phenomena // Phys. Rev. E. – 1996. – V.53. – №1. – P.498–506.
18. Анисимов С.И., Капелиович Б.Л., Перельман Т.Л. Электронная эмиссия с поверхности металлов под действием ультракоротких лазерных импульсов // ЖЭТФ. – 1974. – Т. 66. – Вып.2. – С.776–781.

*Поступила в редакцию 21 марта 2005 г.*