МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСЦИЛИРУЮЩЕЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ, ВОЗНИКАЮЩЕЙ В РАДИОЧАСТОТНОМ ДИАПАЗОНЕ СПЕКТРА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА

М.М. Якункин, А.В. Артамонов
Московский институт электроники и математики, Москва, Россия, nick_@smtp.ru

Интерес к исследованию осциллирующей составляющей температурного поля, возникающего под действием периодических d-образных источников тепла, был стимулирован необходимостью разработки методов измерения теплофизических свойств пленок и тонких фольг [1]. Одна из проблем, которые возникают при исследовании тепловых свойств плёнок и тонких фольг, связана с резким (экспоненциальным) ростом тепловой прозрачности образцов с уменьшением их толщины l. Поэтому, чтобы получить измеряемое в эксперименте затухание температурного сигнала, исследования проводят в существенно нестационарных температурных полях. В литературе описаны методы измерений основанные на нагреве синусоидальными и однократо-импульсными источниками тепла. Эти методы разработаны для массивных образцов и их применение для плёнок встречают серьёзные трудности. Если образец не является аппаратным средством самого метода, достичь частоты колебаний при синусоидальном нагреве $w \geq 1$ kHz практически невозможно из-за резкого уменьшения амплитуды колебаний с увеличением частоты. Чтобы увеличить степень нестационарности температурного поля используют метод однократного импульсного нагрева (с длительностью импульса τ порядка долей микросекунды). Однако его применение связано с большой случайной ошибкой из-за малой величины выборки и нестабильности характеристик силового тракта при малых длительностях импульса.

До настоящего времени эти метода рассматривались как альтернативные, поскольку в одном случае предполагается использование монохроматического гармонического нагрева, в то время как в другом играет роль именно ширина спектра. В результате остались неизученными возможности метода, основанные на периодическом резонансными источниками тепла с d-образной плотностью мощности в импульсе. Наиболее разработанными источниками такого тепла являются лазеры с акустооптической регуляцией добротности резонатора. Было показано [2], что за счёт дополнительной степени свободы – коэффициента заполнения $\gamma = \tau \cdot \omega$ можно выйти в радиочастотный спектр колебаний температуры ~ 10 kHz - 1 MHz и достичь амплитуд колебания в плёнках ~ 100 K почти не меняя среднюю мощность нагрева. Тем самым представленные к разработке методы, имеют степень нестационарности характерную для однократных импульсных методов, но в то же время позволяют сохранить и в ряде случаев уменьшить погрешность измерений, достигнутую с использованием гармонического нагрева.

Моделирование воздействия такого излучения на пленки связано с решением достаточно сложной нелинейной задачи, которое удается получить численным методом при малых значениях t [3], что весьма неудобно при использовании его в эксперименте. В связи с этим в работе изучена асимптотика задачи при $t \to \infty$, получено решение для квазистационарного теплового режима $T(t, x_i) = \overline{T}(x_i) + q(t, x_i)$ и проведено математическое моделирование осциллирующей составляющей температурного поля $q(t, x_i)$ в средах с поверхностным и объёмным поглощением.

Для этого исходная нелинейная задача линеаризовалась по малому параметру q, для которого строилось аналитическое решение в виде ряда

$q(t,x_i)=\sum_k \mathrm{Re}\left[c_k H(x_i,w_k)\exp\left(iw_k t\right)\right]$, $w_k = 2p\,k/t_n$, представляющего собой суперпозицию нормальных мод колебаний со спектром частот, совпадающим со спектром частот внешнего лазерного воздействия. Здесь t_n – период следования импульсов лазерной генерации, а $H(x_i,w_k)$ – пространственная мода колебаний c_k – коэффициенты Фурье разложения плотности поглощённой мощности лазерного излучения в ряд. Адекватность решения реальному физическому процессу проверялась в специальных экспериментах. Расчёты по полученной математической модели показали существование трёх конфигураций осциллирующих составляющих температурного поля, которые остаются устойчивыми в широком диапазоне изменения t_n. Найдены границы устойчивости в зависимости от частотных характеристик внешнего лазерного воздействия и геометрии образцов. Установлено, что если коэффициент заполнения $g = t_n / t_n \le 0,01$, где t_u – длительность импульсов лазерной генерации, то реальная зависимость плотности поглощённой мощности лазерного излучения от времени может быть представлена d - функцией.

Литература.

1. Travkin, V.S. and Catton, I. (2001c), "Analysis of Measuring Techniques for Superlattices Heat Conductivity Measurements," accepted to IMECE'2001, N.Y.

2. Якункин М.М. ТВТ 1991 Т29 с 702-709

3. А.А. Углов, И.Ю. Смуров, А.М. Лапшин, А.Г. Гуськов. Моделирование теплофизических процессов импульсного лазерного воздействия на металлы. – М.: Наука, 1991. 288 с.