

УДК: 62/378

Г. В. Польщиков, Фам Шон Лам, Буй Минь Туан

ТЕПЛОВОЕ ПОЛЕ ПРИЕМНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТЕРМОУПРУГОМ ЭФФЕКТЕ В КРИСТАЛЛИЧЕСКОМ КВАРЦЕ ПРИ ПОЛИИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Исследована динамика формирования квазистационарного теплового поля приёмников излучения на термоупругом эффекте кристаллического кварца при полиимпульсном воздействии. Разработано алгоритмическое и программное обеспечение, которое позволяет автоматически вычислить тепловое поле по сечениям при этом воздействии.

Термоупругий эффект, кристаллический кварц, тепловое поле, полиимпульсное воздействие

Приёмники излучения на термоупругом эффекте в кристаллическом кварце разработаны в Санкт-Петербургском институте точной механики и оптики на кафедре оптоэлектронных приборов и систем. Разработанные термоупругие преобразователи (ТУП) описаны в ряде публикаций [1]–[3]. Они прошли не только теоретические исследования, экспериментальную проверку в процессе разработки, но и имели практическое применение в совместных работах с такими организациями, как ГОИ им. Вавилова, ЛОМО, ВНИИОФИ и с рядом других.

В процессе выполнения этих работ выявилось, что приёмники излучения типа ТУП обладают долговременной стабильностью, устойчивостью к лучевым перегрузкам, широким рабочим спектральным диапазоном при небольшой и монотонной неравномерности спектрального распределения его чувствительности. Их постоянная времени может быть доведена до 10^{-6} с [4].

В настоящее время достаточно много используются лазеры при полиимпульсном режиме для обработки материалов (сварка, наплавка, маркировка, закалка, резка и др.). В этой связи лазерный луч как источник нагрева при термической обработке материалов имеет высокую концентрацию подводимой энергии и локальность. Это позволяет произ-

вести обработку только локального участка материала без нагрева остального объема и нарушения его структуры и свойств, что приводит к минимальному короблению деталей. Для обеспечения качества технологических процессов необходимо контролировать нагрев и охлаждение обрабатываемого объема материала. Поэтому необходимость исследования характеристик процесса релаксации теплового поля по сечениям полупространства путём использования приемников оптического излучения вообще, а приемников на основе термоупругого эффекта в кристаллическом кварце в частности очевидна.

С точки зрения теплофизики взаимодействие излучения с приёмной площадкой и приёмником в целом соответствует граничным условиям второго рода. Для исследования динамики формирования квазистационарного теплового поля при энергетическом воздействии в виде ступенчатой функции имеется достаточно известное решение [5]. С учётом оптических характеристик приёмной площадки это решение можно записать в виде

$$\vartheta(x; t) = \frac{2a_e E_e}{\sqrt{\lambda_T \cdot C_T \cdot \rho}} \sqrt{t} \cdot \text{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{a_T t}},$$

где a_e – действующее значение коэффициента поглощения, зависящее от типа поглощающего электрода и спектрального состава излучения; E_e – энергетическая облученность границы раздела полупространства; x – текущая координата в направлении распространения теплового поля; λ_T , a_T , C_T , ρ – теплопроводность, температуропроводность измерительной пластинки, теплоемкость, плотность материала пространства соответственно.

Функция $\text{ierfc}(x)$ определяется через функцию $\text{erfc}(x)$ по формуле [6]

$$\text{ierfc}(x) = \int_x^{\infty} \text{erfc}(\xi) d\xi = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-x^2) - x \text{erfc}(x),$$

а дополнительная функция ошибок $\text{erfc}(x)$ определяется формулой

$$\text{erfc}(x) = 1 - \text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-x^2) dx,$$

где $\text{erfc}(x)$ – функция ошибок Гаусса $\text{erf}(x)$ – выражается как

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-x^2) dx.$$

Более точным приближением к реальным условиям является прямоугольный импульс излучения конкретной длительности. Его можно представить воздействием двух ступенчатых функций, сдвинутых на временной интервал, равный длительности моделирующего импульса (t_H). Этот переход производится с использованием функции Хэвисайда [7] $H(t)$ в виде

$$\vartheta(x; t) = \frac{2a_e E_e}{\sqrt{\lambda_T \cdot C_T \cdot \rho}} \left[\sqrt{t} \cdot \text{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{a_T t}} - H(t - t_{и1}) \sqrt{t - t_{и1}} \cdot \text{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{a_T (t - t_{и1})}} \right]. \quad (1)$$

При полиимпульсном воздействии описание теплового поля приёмника усложняется. На динамику релаксации двумерного теплового поля от одного импульса излучения накладываются следы от возбуждения полупространства его предшественниками. Это решение принимается неограниченно во времени. Если использовать принцип аддитивности воздействий, то можно найти решение для n импульсов:

$$\vartheta_n(x; t) = \vartheta_1(x; t) + \sum_{i=1}^{n-1} \vartheta(x; i \cdot T), \quad (2)$$

где i – целое число, $i = 1, 2, 3, \dots, (n - 1)$; n – число импульсов; $\vartheta_1(x; t)$ – температура полупространства после действия 1-го импульса; $\vartheta(x; i \cdot T)$ – градиент температуры полупространства после действия i -го импульса; $T = 0.01$ с – период следования импульсов.

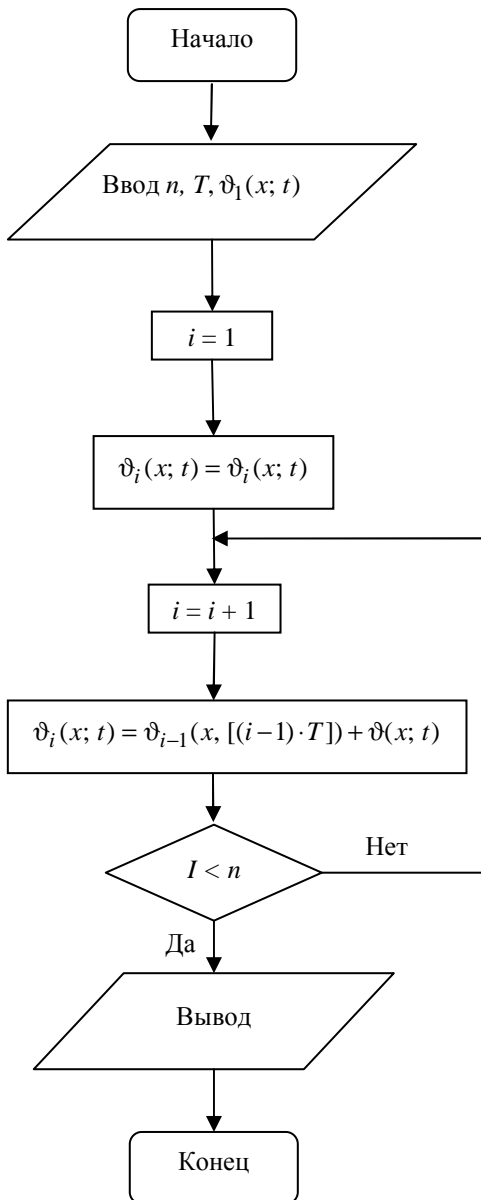


Рис. 1

На базе принципа наложения температурных полей и формул (1), (2) разработан алгоритм (рис. 1) для расчета динамики формирования квазистационарного теплового поля при импульсном, а затем, после её развития, и полиимпульсном воздействии.

Решение алгоритма получено в программе, разработанной в среде Mathcad. Эта программа позволяет исследовать динамику теплового поля при разных сечениях полупространства.

На основании программирования построены графики (рис. 2) в двойном логарифмическом масштабе изменения температуры при воздействии импульсов излучения различной длительности ($t_{и1}$, $t_{и2}$, $t_{и3}$), допустимой облученности $E = 1$ Вт/см² для конкретных сечений по оси x : а) $x = 0$; б) $x = 0.1$ мм; в) $x = 0.3$ мм; г) $x = 3$ мм.

Из анализа этих результатов установлено, что динамическая составляющая теплового поля быстро затухает в пространстве и во времени. На расстоянии 3 мм (рис. 2, г) от поверхности максимальная температура составляет не более $2 \cdot 10^{-4}$ °С и не зависит от длительности воздействующего импульса в расчётном интервале. Общее время затухания динамического теплового поля для измерительных пластинок на уровне 0.3 мм составляет единицы, а то и десятки секунд. Это сильно осложняет работу ТУПа при импульсно-периодическом воздействии и заставляет при точных измерениях использовать специальные алгоритмы выделения сигнала, содержащего информацию об энергии текущего импульса излучения.

На рис. 3 приведено условное изображение совмещенных воздействий при полиимпульсном режиме для 10 импульсов при длительности импульса $t_{и} = 0.1$ мс, периоде следования импульсов $T = 10$ мс, допустимой облученности $E = 1$ Вт/см² и сечении $x = 0.1$ мм. Номера линий 1, 2, ..., 9, 10 соответствуют номерам импульсов воздействия.

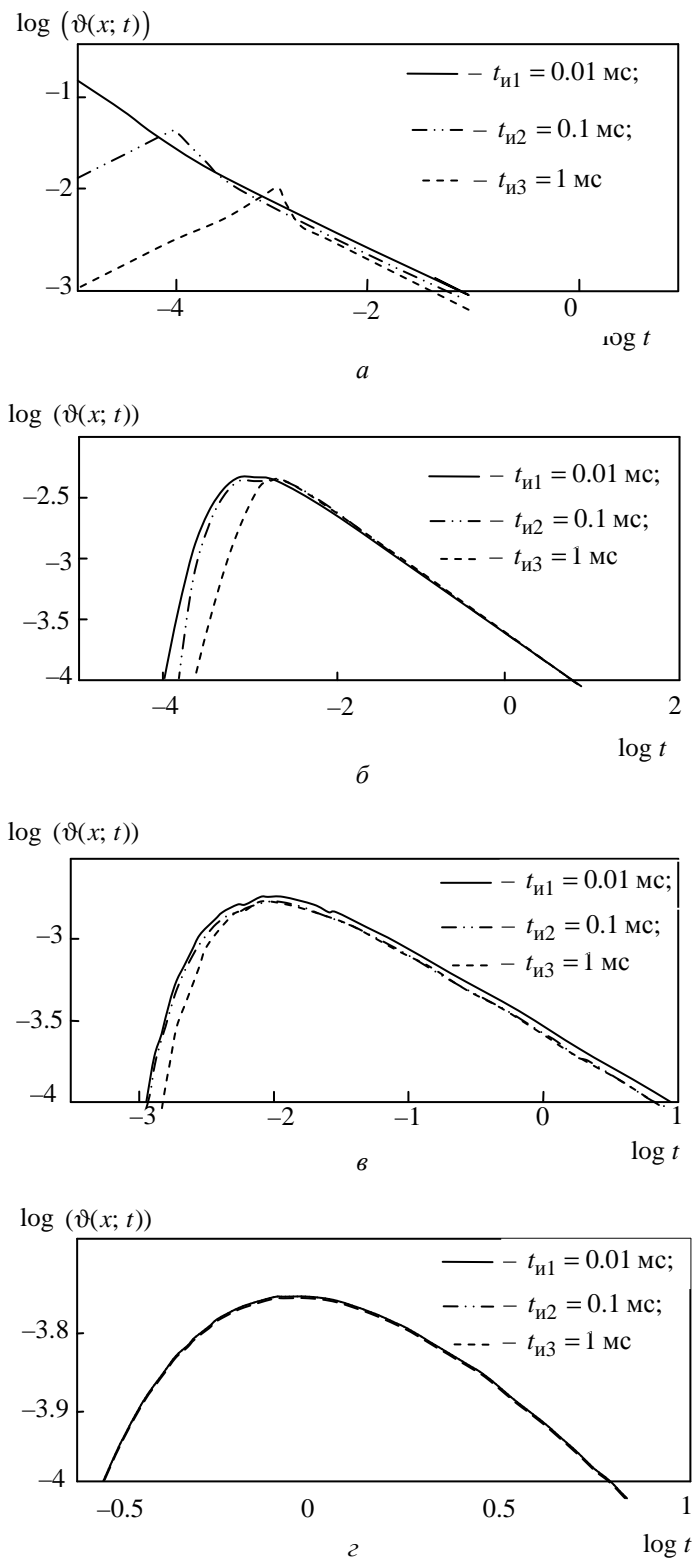


Рис. 2

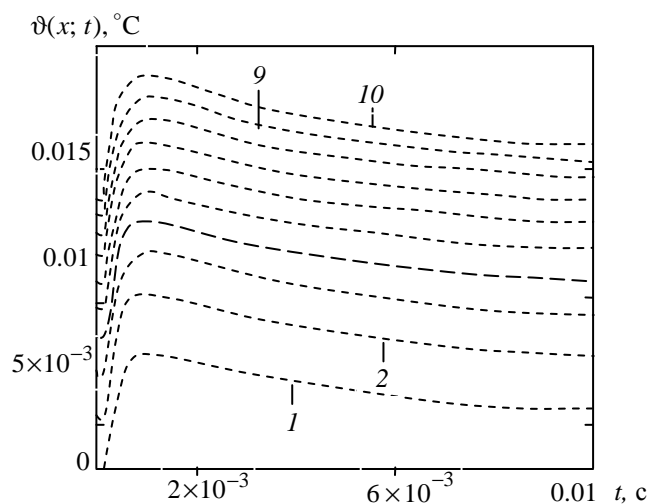


Рис. 3

Установлено, что при полиимпульсном воздействии средняя мощность возрастает и много больше, чем в одноимпульсном режиме. Это вызывает нагрев полупространства и может оказывать влияние на работу приемника, поэтому необходимо учесть среднюю мощность в режиме полиимпульсного воздействия для учета разогрева конструкции фотоприемного устройства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ишанин Г. Г., Польщиков Г. В. Измерительный приемник излучения на термоупругом эффекте в кварце // Приборы и техника эксперимента. 1973. № 5. С. 206–208.
2. Ишанин Г. Г., Польщиков Г. В. Отклик приемника на термоупругом эффекте на импульсные излучения // Вопр. проектирования точных приборов. Л.: ЛИТМО, 1973. Вып. 73. С. 70–72.
3. Разработка и изготовление приемников на термоупругом эффекте для ИК-излучения / Г. Г. Ишанин, Г. В. Польщиков, М. Н. Емаков, О. А. Сенатская, Н. И. Назаренко // Отчет по теме 73866. Л.: ЛИТМО, Гос. Регистрация № 75003469. 1974. 100 с.
4. Ишанин Г. Г., Лукьянов В. И., Тихонов С. В. Теоретические основы работы неоднородных приемников излучения на термоупругом эффекте в кристаллическом кварце в импульсном режиме // Изв. вузов. Приборостроение. 1987. Т. 30, № 10. С. 74–82.
5. Дульнев Г. Н., Испиран Р. А., Ярюшев Н. А. Теплопроводность при постоянном и импульсном местном нагреве // Теплообмен при взаимодействии потоков энергии с твердым телом: тр. ЛИТМО. 1967. Вып. 59. С. 11–16.
6. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высш. шк., 1967. 599 с.
7. Волков И. К., Канатников А. Н. Интегральные преобразования и операционное исчисление: учеб. для вузов / под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. 2-е изд. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 228 с.

G. V. Polshikov, Pham Son Lam, Bui Minh Tuan

THERMAL FIELD OF DETECTORS ON THE THERMOELASTIC EFFECT IN CRYSTALLINE QUARTZ WITH MULTI-PULSE EXPOSURE

In this article investigated the dynamics of the formation of a quasi-stationary thermal field of detectors on the thermoelastic effect in crystalline quartz with multi-pulse exposure. Developed algorithms and software that allows you to automatically calculate the thermal field on the cross sections at the same exposure.

Thermoelastic effect, crystal quartz, thermal field, multi-pulse exposure