

09;15

## Определение коэффициента теплоотдачи твердотельных объектов методом лазерной фототермической ИК-радиометрии

© С.Е. Александров, Г.А. Гаврилов, А.А. Капралов,  
К.Л. Муратиков<sup>¶</sup>, Г.Ю. Сотникова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
<sup>¶</sup> E-mail: klm.holo@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 31 марта 2017 г.

Предложен простой способ определения коэффициента теплоотдачи твердотельных объектов, основанный на прямых измерениях динамики температуры поверхности образца с использованием фотодиодов среднего ИК-диапазона спектра, работающих без принудительного охлаждения, при тепловом воздействии на объект излучением лазера с заданным законом изменения мощности во времени.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.14.44825.16805

Фототермические методы на протяжении многих лет активно используются для определения тепловых [1,2] и оптических [3] параметров материалов, изучения влияния структурных и контактных неоднородностей на процессы теплопереноса [4–7]. Их важным достоинством являются бесконтактность, высокое пространственное и временное разрешение, возможность проведения измерений на незначительных объемах вещества. Последнее обстоятельство часто делает использование указанных методов единственно возможным для определения теплофизических свойств объектов с субмикронными размерами [8].

Среди фототермических методов важное положение занимает лазерная фототермическая радиометрия (ФТР) [9,10]. ФТР основывается на регистрации нестационарного ИК-излучения, испускаемого объектом, при его облучении модулированным во времени лазерным излучением. Для регистрации ИК-излучения при ФТР-экспериментах в настоящее время апробированы фотоприемники HgCdTe, InSb, охлаждаемые жид-

ким азотом. При этом регистрация ИК-излучения осуществляется в достаточно широком спектральном диапазоне. Например, в случае фотоприемников HgCdTe серий KMPV и KLD (Kolmar Technologies, Inc.) используется излучение в диапазоне от 2 до 12  $\mu\text{m}$  или от 2 до 9  $\mu\text{m}$ . Использование излучения широкого спектрального диапазона для формирования сигнала имеет как достоинства, так и недостатки. К достоинствам указанных детекторов следует отнести их высокую чувствительность к тепловому излучению, а к недостаткам — необходимость охлаждения до температуры жидкого азота и значительную методическую погрешность измерений.

Одним из важнейших параметров при изучении теплофизических процессов в твердотельных объектах является коэффициент теплоотдачи [11]. Он может являться существенным источником погрешности в теплофизических экспериментах. К сожалению, коэффициент теплоотдачи зависит от конкретных условий проведения эксперимента и является экспериментально сложно контролируемым параметром, часто требующим проведения специальных исследований [12]. В данной работе представлен простой и эффективный метод определения коэффициента теплоотдачи твердотельных объектов методом ФТР, основанный на прямых измерениях абсолютной температуры поверхности тестового образца спектрально-селективными иммерсионными фотодиодами (ФД) среднего ИК-диапазона спектра (2–5  $\mu\text{m}$ ), работающими без принудительного охлаждения [13]. Высокая детектирующая способность ( $D^* \sim 2 \cdot 10^{10} - 10^{11} \text{ cm} \cdot \sqrt{\text{Hz/W}}$ ), быстродействие (меньше 20 ns) и конструктивные особенности ФД были использованы для создания на их основе высокочувствительных неохлаждаемых пирометрических сенсоров для бесконтактного измерения температуры. Важным достоинством указанных сенсоров является их полная нечувствительность к излучению с  $\lambda \leq 1 \mu\text{m}$  [14], которая обеспечивает возможность использования разнообразных лазеров возбуждающего излучения.

В рамках данной работы была поставлена задача измерения коэффициента теплоотдачи  $H$ , который в ходе теплофизических экспериментов трудно контролируется. С этой целью было предложено производить прямые измерения динамики температуры поверхности тестового образца материала с известными физическими параметрами при тепловом воздействии лазерным излучением с заданным законом изменения мощности во времени. В работе осуществлялась равномерная засветка лицевой поверхности образцов лазерным излучением. Отвод тепла от

их торцов не играл существенной роли, так как их суммарная площадь была значительно меньше площади лицевых поверхностей. В этих условиях распределение температуры внутри образца можно найти с помощью одномерного уравнения теплопроводности

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = K \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q(x, t), \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность материала образца,  $C$  — его удельная теплоемкость,  $K$  — теплопроводность,  $Q(x, t) = \alpha(1 - R)I_0 e^{-\alpha x} f(t)$  — плотность мощности теплового источника, генерируемого лазерным излучением,  $\alpha$  — коэффициент поглощения излучения поверхностью образца,  $I_0$  — интенсивность излучения лазера,  $R$  — коэффициент отражения света поверхностью образца,  $f(t)$  — функция, описывающая временную зависимость теплового воздействия.

Для решения уравнения (1) необходимо задать граничные условия. Для образцов, лицевые поверхности которых расположены при  $x = 0$  и  $x = L$  с учетом теплоотвода в окружающую среду, эти условия имеют вид

$$K \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0,L} = H(T - T_0) \Big|_{x=0,L}, \quad (2)$$

где  $H$  — коэффициент теплоотдачи,  $T_0$  — температура окружающей среды.

При этом нетрудно найти зависимость температуры поверхности образца  $T_s$  от времени, проинтегрировав уравнение (1) по его объему. С использованием теоремы Гаусса и с учетом граничных условий (2) эту зависимость получим в виде

$$T_s(t) = \frac{I_0}{\rho C L} \int_{t_1}^t dt' e^{-\frac{2H}{\rho C L}(t-t')} f(t') + T_0, \quad (3)$$

где  $t_1$  — время начала лазерного воздействия.

При выводе соотношения (3) учитывалось, что для исследуемых образцов выполняется неравенство  $K \gg HL$  и в момент измерений температуры лицевой и тыльной поверхностей образцов результаты имеют достаточно близкие значения. Такая ситуация реализуется при длительностях засветки  $\tau$ , удовлетворяющей неравенству  $\sqrt{\kappa\tau} \ll L$ , где  $\kappa$  — коэффициент температуропроводности материала.

В эксперименте исследовались тестовые образцы чистых металлов (Ti и Ni), значения  $\rho$ ,  $C$  и  $K$  для которых хорошо известны, но при этом существенно отличаются. Образцы представляли собой диски одинаковой площади  $103 \text{ mm}^2$ , но различной толщины:  $L = 400 \text{ }\mu\text{m}$  для Ti-образца и  $L = 800 \text{ }\mu\text{m}$  для Ni-образца. Для выбранных образцов значения  $K/L$  составляют  $55 \cdot 10^3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  для Ti-образца и  $112 \cdot 10^3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  для Ni-образца, что обеспечивает выполнение условия  $K \gg HL$ , использованное при выводе уравнения (3), для значений  $H \leq (10^2 - 10^3) \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .

Нагрев образцов осуществлялся излучением мощного полупроводникового лазера с длиной волны излучения  $\lambda = 980 \text{ nm}$  и регулируемой мощностью излучения  $0.1 - 1 \text{ W}$ . При этом  $f(t)$  задавалась в виде единичного прямоугольного импульса. В этом случае решение уравнения (3) имеет вид

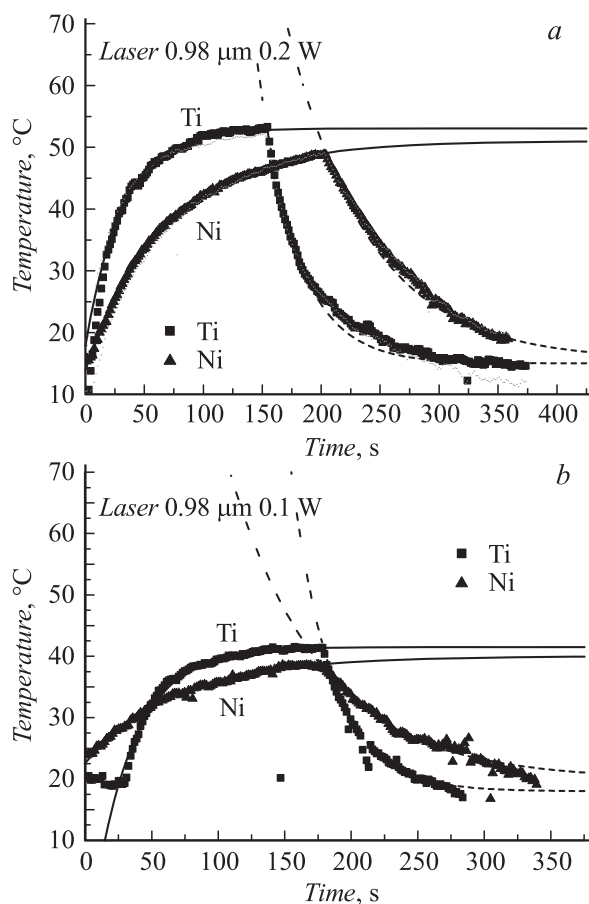
$$T_s(t) = \frac{I_0}{2H} \left( 1 - e^{-\frac{2H}{\rho CL}(t-t_1)} \right) + T_0, \text{ при } t_1 < t \leq t_2,$$

$$T_s(t) = T_s(t_2) e^{-\frac{2H}{\rho CL}(t-t_2)}, \text{ при } t > t_2, \quad (4)$$

где  $t_1$  — время начала лазерного воздействия,  $t_2$  — время его окончания.

Таким образом, обеспечив измерения температуры образцов с известными значениями  $\rho$ ,  $C$  и  $L$  и аппроксимировав полученные кривые функциями вида (4), можно определить важную для теплофизических измерений константу  $H$ . Принято считать, что коэффициент теплоотдачи не зависит от материала образца, но зависит от способа и качества обработки его поверхности. При этом минимальное значение коэффициента теплоотдачи достигается для гладких поверхностей. В условиях свободной конвекции воздуха оно составляет  $5.6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  [15].

Тестовые образцы помещались в плоскую кювету с сапфировыми окнами, что обеспечивало возможность бесконтактного пирометрического контроля температуры обеих поверхностей образца. Для увеличения коэффициента поглощения лазерного излучения и излучательной способности образцов их поверхности покрывались тонким слоем поглощающего материала. Для контроля температуры поверхностей использовались ФД типа PD42SrNB, чувствительные в области  $\Delta\lambda = 3.4 - 4.4 \text{ }\mu\text{m}$  (по уровню 0.5) [13]. ФД использовался без дополнительных оптических элементов. Электронное обрамление ФД обеспечивало детектирование теплового излучения в полосе  $1 \text{ kHz}$  (быстродействие  $1 \text{ ms}$ ),



Экспериментальные значения температуры поверхности образцов Ti и Ni при их нагреве постоянным излучением лазера мощностью 0.1 W (a) и 0.2 W (b) и остывании после выключения лазера. Сплошными (нагревание) и пунктирными (остывание) линиями на графиках представлены решения уравнения (3) для известных значений  $\rho$ ,  $C$  и  $L$  указанных образцов и рассчитанного из графиков значения  $H = 19.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .

оцифровку, передачу на ПК, on-line расчет и вывод на экран монитора значений температуры поверхностей исследуемого образца в диапазоне от 10°C с точностью 0.1°C. На рисунке в качестве примера представлены графики изменения температуры передней (облучаемой лазером) поверхности образцов Li и Ni при воздействии на них лазера. Для удобства представления данные по температуре, регистрируемые с быстродействием 1 ms, на графиках прорежены и имеют временное разрешение 1.5 s. Полученные экспериментально температурные кривые хорошо аппроксимируются функциями вида (4) и позволяют рассчитать коэффициент теплоотдачи в каждом эксперименте. В результате расчетов были получены значения коэффициента теплоотдачи для Ti-образца, равные 19.6 W/(m<sup>2</sup> · K) при мощности излучения 0.2 W (по показаниям индикатора драйвера лазера) и 22.4 W/(m<sup>2</sup> · K) при мощности излучения 0.1 W. Для Ni-образца аналогичные измерения дали значения 18 и 20 W/(m<sup>2</sup> · K) при мощности излучения 0.2 и 0.1 W соответственно. Полученные значения хорошо согласуются с данными ( $5.6 \leq H \leq 25$  W/(m<sup>2</sup> · K)), приводимыми для условий свободной конвекции воздуха. Разброс значений коэффициента теплоотдачи можно объяснить возможными различиями в обработке поверхности образцов и отклонениями показаний индикатора мощности драйвера лазера от ее истинных значений (точность установки мощности излучения для использованного полупроводникового лазера составляла ±10%).

Таким образом, полученные результаты демонстрируют возможность определения коэффициента теплоотдачи простым и эффективным ФТР-методом при проведении теплофизических экспериментов на твердотельных образцах. Показано, что разработанные ФД пирометрические сенсоры среднего ИК-диапазона способны обеспечивать проведение теплофизических измерений новых материалов в широком диапазоне температур, начиная с комнатной, без принудительного охлаждения фотоприемника.

## Список литературы

- [1] *Mingolo N.A., Martinez O.E.* // J. Appl. Phys. 2012. V. 111. P. 12352 (1–7).
- [2] *Kim H.J., Kim J.H., Jeon P.S., Yoo J.* // J. Mech. Sci. Technol. 2009. V. 23. P. 2514–2520.

- [3] Pawlak M., Chirtoc M., Horny N., Pelzl J. // J. Appl. Phys. 2016. V. 119. P. 125108 (1–11).
- [4] Escola F.Z., Kunik D., Martinez O.E., Mingolo N. // Procedia Mater. Sci. 2015. V. 8. P. 665–673.
- [5] Глазов А.Л., Козлов В.А., Муратиков К.Л. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 24. С. 16–25.
- [6] Глазов А.Л., Калиновский В.С., Лисицина Ю.Г. и др. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 14. С. 60–67.
- [7] Глазов А.Л., Калиновский В.С., Контрош Е.В., Муратиков К.Л. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. В. 11. С. 33–40.
- [8] Gaskins J.T., Yadav A.K., Duda J.C. et al. // Appl. Phys. Lett. 2015. V. 106. P. 093114 (1–5).
- [9] Mandelis A., Batista J., Shaughnessy D. // Phys. Rev. B. 2003. V. 67. P. 205208 (1–18).
- [10] Fuente R., Apinaniz E., Mendioroz A., Salazar A. // J. Appl. Phys. 2011. V. 110. P. 033515 (1–9).
- [11] Пикулев А.А. // ЖТФ. 2003. Т. 73. В. 6. С. 32–35.
- [12] Fernandez-Siera J., Uhia F.J., Sieres J., Campo A. // Appl. Thermal Eng. 2007. V. 27. P. 2745–2757.
- [13] [www.ioffeled.com](http://www.ioffeled.com)
- [14] Александров С.Е., Гаврилов Г.А., Сотникова Г.Ю., Тер-Мартirosян А.Л. // ФТП. 2014. Т. 48. В. 1. С. 135–141.
- [15] Кухлинг Х. Справочник по физике. М.: Мир, 1982. 520 с.