ДИНАМИКА ТЕМПЕРАТУРЫ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЛАЗЕРНОМ НАГРЕВЕ

Каспаров К.Н., Ивлев Г.Д., Белозёрова Л.И.
Институт физики НАНБ, Логойский тракт, 22, 220090, Минск, Беларусь
тел. (+375 17) 2813439, e-mai:l kasaparov@inel.bas-net.by

Исследована фотоэмиссионным методом температурак различных материалов при нагреве миллисекундными лазерными импульсми. Температурные измерения выполнены с временным разрешение 1 мкс в диапазоне 1200-2900 К при нагреве графита, W,Ta, пластин Si и пленок SiO_2/Si.

Введение

Исследование динамики температуры материалов проводилось методом спектрометрии фотоэлектронов, основанном на зависимости распределения электронов внешнего фотоэффекта от распределения энергии в спектре излучения. Термометрическим веществом является газ фотоэлектронов вблизи эмитирующей поверхности. Температура может быть определена по напряжению отсечки вольтамперных характеристик фотоэлектронного прибора, например, ФЭУ для нормированных по фототоку световых потоков [1] или путем измерения изменения распределения фотоэлектронов по энергиям в зависимости от температуры [2, 3].

С увеличением температуры максимум распределения энергии излучения в спектре нагретого тела смещается в сторону коротких длин волн (смещение Вина). Аналогично смещается максимум энергетического распределения фотоэлектронов, вызванных этим излучением, в сторону больших энергий. В этом случае термометрическим свойством является отношение k фототока I_0, измеренного в отсутствии тормозящего поля, к частично запертому фототоку $I_з$, измеренному при наличии тормозящего поля в прикатодной области ФЭУ. Так как относительное содержание электронов разных энергий в распределении не зависит от величины светового потока, то в области линейности световой характеристики прибора $k=f(T)$ [3].

Процесс измерения температуры сводится к регистрации двухуровневой осциллограммы амплитуды импульса $U(t)$ при модуляции электронного потока отрицательными относительно фотокатода прямоугольными импульсами. По уровням этого сигнала вычисляется зависимость $k(T)$ в каждом периоде промодулированного сигнала и с помощью градуировки $T(k)$, выполненной по эталонному температурному излучателю, определяется динамика температуры $T(t)$ в исследуемом процессе. Простота модуляции потока фотоэлектронов в прикатодной области ФЭУ с частотой 1МГц позволяет выполнять такие измерения с временным разрешением 1мкс.

Возможности метода при измерении температуры в быстропротекающих тепловых процессах проиллюстрированы некоторыми примерами. Используя экспериментальные образцы импульсного фотоэмиссионного пирометра, мы измерили температуру нескольких материалов, нагретых лазерным импульсом.

Эксперимент

Образцы облучались лазером на стекле, активированном неодимом, работающим в беспичковом режиме, генерирующим единичные импульсы излучения длительностью 0.6 мс на полувысоте с длиной волны 1,06 мкм при высокой однородности лазерного пучка в диаметре 1 см.

Схема пирометрического устройства показана на рис. 1. В качестве датчика и одновременно анализатора излучения объекта (1, рис. 1) можно использовать ФЭУ (2), модулируя электронный поток отрицательными относительно катода (3) импульсами, подаваемыми от генератора (4) на модулятор (5), расположенный между катодом (3) и первым динодом (6), играющим роль управляющей сетки. С анода (7) сигнал через усилитель (8) поступает на цифровой вольтметр (9) и запоминается в персональном компьютере (10). В оптической схеме (11) могут быть установлены нейтральные светофильтры (12).

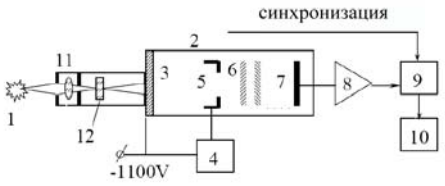


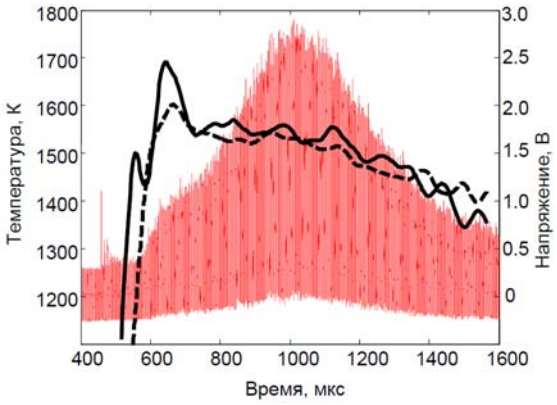
Рис. 1. Схема импульсного фотоэмиссионного пирометра

Измеренная фотоэмиссионным методом температура, как и цветовая температура, больше истинной. Методические погрешности измерения температуры вольфрама при 1200, 1800 и 2600 К равны 1.0, 1.9 и 6.0 К при использовании прибора с бищелочным фотокатодом. Для мультищелочного фотокатода погрешности примерно в два раза больше [4].

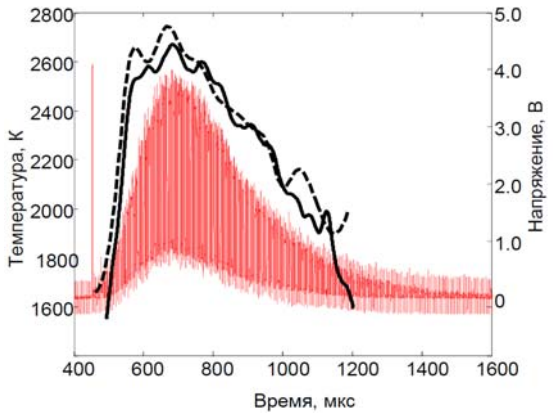
Результаты и обсуждение

На рисунке 2 показаны осциллограммы теплового излучения и вычисленные по ним температуры для кремния (толщина 0.37 мм) и графита (массивный образец) при облучении импульсами с плотностью энергии 100 Дж/см^2 и 21 Дж/см^2 соответственно. На начальной стадии нагрева наблюдается линейный участок на зависимости $T(t)$, при этом $\partial T/\partial t = 10^7$ К/с (Si) и $1.6\cdot10^7$К/с (графит). Согласно термодинамическому критерию, введенному в [5], в данной ситуации устанавливается линейный режим неравновесной термодинамики. В этом случае нагрев хорошо описывается

параболическим уравнением теплопроводности. Дальнейший нагрев приводит к нелинейному режиму неравновесной термодинамики.



а

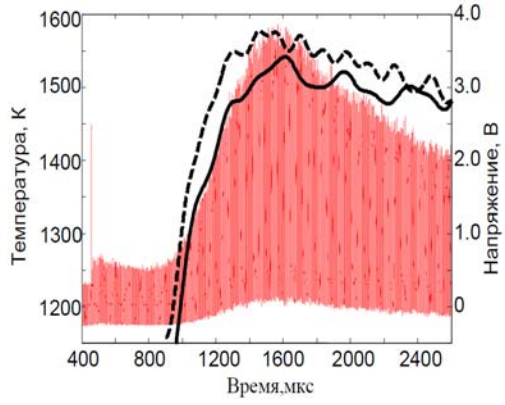


б

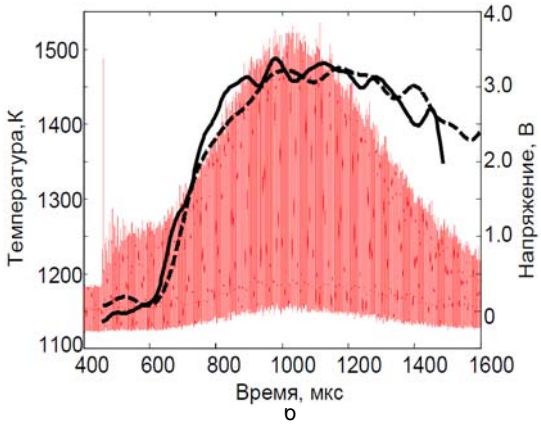
Рис. 2. Осциллограммы свечения и рассчитанные по ним температуры в двух последовательных экспериментах нагрева кремния (а) и графита (б). Осциллограммы соответствуют пунктирным кривым.

Следует отметить, что с точки зрения термодинамических режимов наши данные, полученные для графита, согласуются с результатами работы [5]. Для других материалов (вольфрам и SiO_2/Si) в аналогичных условиях нагрева скорость изменения температуры $\partial T/\partial t \neq$const (среднее её значение $\approx 10^6$ К/с), что указывает на нелинейный режим (рис. 3). Осциллограммы свечения и рассчитанные по ним температуры плёнки SiO_2/Si , как и для графита и Si, выполнены в двух последовательных экспериментах чтобы показать их воспроизводимость. По измерению температуры двух пластин вольфрама разной толщины видно, что одинаковая динамика нагрева для пластин, отличающихся по толщине в два раза, устанавливается, если плотность энергии облучения более толстой пластины увеличить в 5 раз (рис. 3б).

Влияние среды на динамику температуры при импульсном нагреве поверхности твердого тела видно из приведенных на рисунке 4 результатов облучения тантала толщиной 0.15 мм лазерными импульсами с плотностью энергии излучения 100 Дж/см^2 на воздухе и 128 Дж/см^2 в среде аргона.



а



б

Рис. 3. Осциллограммы свечения и рассчитанные по ним температуры нагрева плёнки SiO_2/Si в двух последовательных экспериментах при плотности энергии облучения 35 Дж/см^2 (а) и двух пластин вольфрама толщиной 30 мкм (сплошная линия, 16 Дж/см^2) и 60 мкм (пунктир,83 Дж/см^2) (б). Осциллограммы соответствуют пунктирным кривым.

На воздухе (рис. 4а) интенсивное свечение начинается одновременно с облучением поверхности лазерным импульсом. Это свечение - следствие горения, вызванного интенсивным химическим взаимодействием нагретой металлической поверхности с кислородом, адсорбированным в поверхностных и приповерхностных слоях атомов, которое продолжается только в течение действия лазерного импульса. Максимумы лазерного импульса, излучения нагретой поверхности и температуры совпадают. Излучение обратной стороны пластины регистрируется при достижении на её поверхности температуры ~ 1200К, когда амплитуда лазерного импульса уменьшилась наполовину. Равенство температур на облучаемой и обратной сторонах пластины (1500 К) наступает на 1100-й микросекунде после начала генерации, когда действие лазерного импульса уже закончилось, температуры облучаемой и обратной поверхностей выравниваются, после чего наблюдаются особенности динамики регистрируемого сигнала фотодатчика, требующие специального рассмотрения.

При облучении в среде аргона световой поток с облучаемой поверхности во время действия лазерного импульса намного меньше, чем в воздухе, т.к. в среде аргона на тепловое излучение

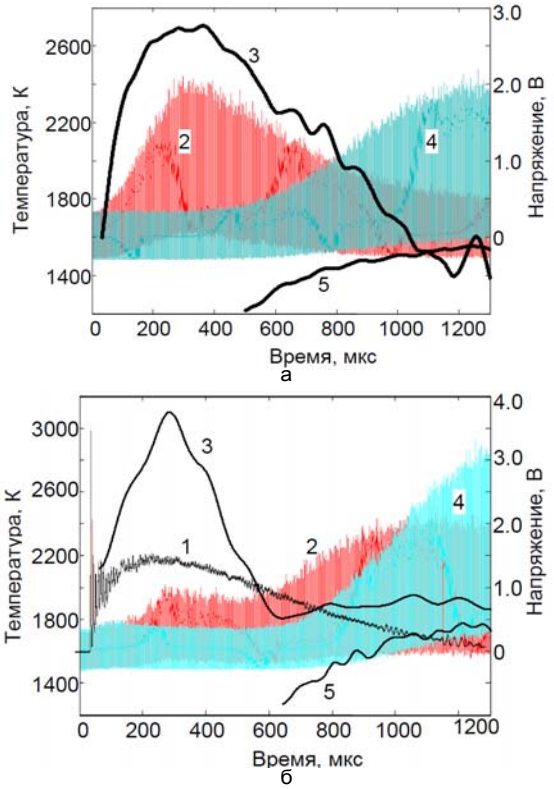


Рис. 4. Осциллограммы свечения и расчетные значения температуры при облучении пластины тантала на воздухе (а) и в аргоне (б). 1 – импульс генерации лазера, 2,3 – свечение и температура облучаемой поверхности, 4,5 – свечение и температура обратной стороны пластины

не накладывается излучение, вызванное окислительными процессами в приповерхностных слоях. Обусловленное нагревом интенсивное свечение, в 3 раза превышающее интенсивность излучения в начале процесса, появляется после 600-й мкс, когда амплитуда импульса генерации уменьшилась вдвое. Однако максимума температура достигает именно во время действия лазерного импульса, что объясняется горением приповерхностного слоя атомов, а не нагревом, затем резко падает и после 600-й мкс устанавливается постоянной и соответствующей температуре равновесного излучения. Нагрев обратной стороны, как и в воздухе, начинается на шестисотой микросекунде, но вследствие большей плотности энергии в импульсе максимальная температура устанавливается большей на 200 К.

Временное разрешение видно из рис. 5, где приведены результаты измерения температуры в первые 100 мкс облучения. Первые четыре периода колебаний температуры повторяют колебания генерации лазера и отклика прибора За 10 периодов импульсы генерации уменьшаются от 1.8 В до 0.2 В (pick-to-pick), а температура увеличивается на ~ 1000К. Вследствие этого увеличивается тепловая инерция объекта, и синхронность колебаний лазерного импульса и отклика прибора нарушается, а контуры осциллограммы и температурной кривой совпадают.

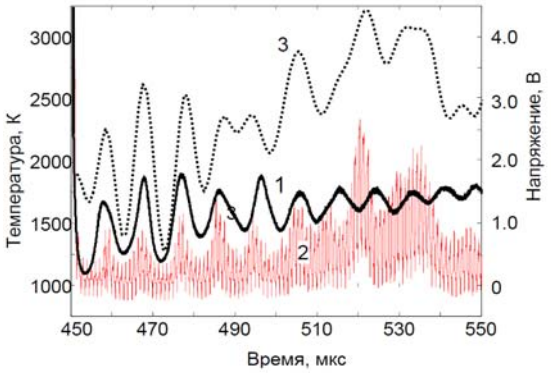


Рис.5 Импульс генерации лазера (1), отклик прибора (2) и температура поверхности вольфрама толщинолй 60 мкм в течение первых 100 мкс лазерного импульса (3)

Заключение

Наши исследования показали возможности фотоэмиссионного метода диагностики лазерно-индуцированных тепловых процессов в твердом теле. Полученные данные характеризуют тепловое воздействие миллисекундных лазерных импульсов на некоторые материалы при различных условиях облучения.

Работа выполнена при частичной поддержке БРФФИ № Ф09СО-015.

Список литературы

1. *Kasparov K.N.* // Measurement Science and Technology. – 1998. - 9. - P. 1388.
2. *Каспаров К.Н.* // Измерительная техника. – 2004. - 6. - С. 34.
3. *Каспаров К.Н.* // Измерительная техника. – 2004. - 8. - С. 62.
4. *Каспаров К.Н.* Фотоэмиссионный анализ оптического излучения. Минск, Белорусская наука, 2011. – 178 с.
5. *Костановский А.В., Костановская М.Е.* // ЖТФ. -2008. – Т. 34. – 12. - С. 6.

TEMERATURE DYNAMICS OF DIFFERENT MATERIALS AT PULSED LASER HEATING

K.N. Kasparov, G.D Ivlev, L.I. Belozerova
Institut of physics of Belarrus NAS, Logoyskii tract, 22, 220090, Minsk, Belarus
Tel. (+375 17) 2813439, e-mail kasaparov@inel.bas-net.by

Temperatures of different materials at the heating by millisecond laser pulses have been studied by photoemission method. Temperature dynamics measurements were carried out with 1 μs time resolution in the range of 1200-2900 K at the heating of graphite, W, Ta, Si and SiO_2/Si samples.