

## Температурные измерения при импульсном лазерном нагреве металлов

К. Н. КАСПАРОВ, Г. Д. ИВЛЕВ, Л. И. БЕЛОЗЕРОВА,  
Е. И. ГАЦКЕВИЧ

Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь,  
e-mail: kasparov@inel.bas-net.by

Представлены результаты исследования динамики температуры некоторых металлов, измеренной фотоэмиссионным методом с временным разрешением 1 мкс, при их нагреве в воздухе и среде аргона миллисекундным лазерным излучением ( $\lambda = 1,06$  мкм) с плотностями энергии 75—140 Дж/см<sup>2</sup>.

**Ключевые слова:** температура, лазер, металлы.

The results of temperature dynamics study for certain metals measured by photoemission method with temporal resolution 1 mks at heating in air and argon medium by millisecond laser radiation ( $\lambda = 1,06$  mkm) with energy densities 75—140 J/cm<sup>2</sup> are presented.

**Key words:** temperature, laser, metals.

Фотоэмиссионным методом [1] исследована динамика температуры при импульсном лазерном нагреве некоторых металлов. В подобных экспериментах этот метод ранее не применялся. Цель статьи — показать экспериментальные возможности фотоэмиссионного метода для диагностики быстропротекающих лазерно-индуцированных тепловых процессов в твердом теле.

Метод основан на анализе распределения энергии фотоэлектронов, эмитированных под действием теплового излучения объекта. Как следует из закона Эйнштейна для внешнего фотоэффекта, распределение фотоэлектронов по энергиям зависит от энергетического распределения квантов электромагнитного излучения. Увеличение частоты монохроматического излучения сдвигает максимум и наиболее вероятные скорости в максвелловском распределении фотоэлектронов вблизи фотокатода в сторону высоких энергий.

Согласно закону Вина увеличение температуры сдвигает максимум спектрального распределения излучения в сторону коротких длин волн. Таким образом, из анализа энергетического распределения фотоэлектронов, эмитированных под действием излучения объекта, можно определить его температуру. Ранее описаны физические основы [2], свойства и особенности метода, а также способы его реализации [3, 4].

В экспериментах использован лазер на неодимовом стекле, излучающий квазипрерывный импульс свободной генерации длительностью 0,6 мс по уровню 0,5 на длине волны 1,06 мкм при высокой однородности распределения энергии по сечению лазерного пучка диаметром около 1 см. Облучали пластины Ti, Ta, Ni и W. Толщина образцов  $d$  приведена в таблице.

Параметры образцов металлов

| Параметр                 | Ti   | Ta   | Ni   | W    |
|--------------------------|------|------|------|------|
| $a$ , см <sup>2</sup> /с | 0,06 | 0,2  | 0,24 | 0,48 |
| $D$ , мм                 | 0,06 | 0,12 | 0,16 | 0,17 |
| $d$ , мм                 | 0,15 | 0,15 | 0,5  | 0,06 |

Пластины располагали относительно фокусирующей линзы на расстоянии несколько больше фокусного, равного 11 см, где диаметр светового пятна составлял 1,5 мм. Плотность энергии в лазерном пятне изменяли калиброванными нейтральными фильтрами в диапазоне 15—140 Дж/см<sup>2</sup>. Образцы облучали на воздухе и в среде аргона при нормальном давлении. Для этого применяли камеру с двумя стеклянными окнами. Тепловое излучение тонких образцов детектировалось как со стороны воздействия лазерного пучка, так и с обратной стороны пластины; при этом использовались два одинаковых фотоэмиссионных датчика. Отмечена высокая воспроизводимость как параметров лазера, так и результатов измерений. Область измеряемых температур 1200—3000 К.

Измерения выполняли после одного «холостого выстрела» для удаления адсорбированного из воздуха поверхностного слоя, так как световой поток, зарегистрированный в первом импульсе, намного превосходит свечение в последующих импульсах.

Длина тепловой диффузии  $D$  в твердом теле под действием импульсного поверхностного источника тепла (например, поглощаемого лазерного излучения) определяется хорошо известным выражением  $D = \sqrt{at}$ , где  $a$  — коэффициент температуропроводности,  $t = 0,6$  мс — длительность теплового воздействия излучения. Значения  $a$  и  $D$  для рассматриваемых образцов приведены в таблице.

Из таблицы следует, что температура обратной стороны образцов из Ti, Ni и Ta увеличивается незначительно к концу нагрева, тогда как для W ( $d \ll D$ ) температура обратной стороны  $T_2$  должна быть близка к температуре облучаемой поверхности  $T_1$ . Это же подтверждает эксперимент:  $T_1 = 1600$  К,  $T_2 = 1500$  К (рис. 1, а). Значения  $D$  и  $d$  для Ta незначительно отличаются и к концу действия лазерного импульса  $T_2$  увеличивается до 1550 К в максимуме (рис. 1, б). Время задержки между максимальными температурами на облучаемой поверхности (2700 К) и обратной стороне образца составляет 0,8 мс.

Иная динамика температуры при облучении тех же объектов в среде аргона. Для Ta осциллограмма измерений в ар-

гоне (рис. 1, в) зарегистрировала очень слабый световой поток с облучаемой поверхности во время действия лазерного импульса по сравнению с измерениями на воздухе. Интенсивное свечение облучаемой поверхности в аргоне появляется после  $\tau = 600$  мкс, когда амплитуда импульса генерации уменьшилась уже наполовину. Однако именно во время действия лазерного импульса температура облучаемой поверхности достигает максимума (2800 К), а затем резко падает со скоростью  $6,7 \cdot 10^7$  К/с вместе с окончанием действия импульса генерации и после  $\tau = 600$  мкс остается постоянной. Одновременно появляется свечение обратной стороны пластины, достаточное для измерения ее температуры. Последняя растет и отличается от температуры на облучаемой поверхности на 8 %.

Высокая температура облучаемой поверхности при малом световом потоке объясняется тем, что сначала наблюдается тепловой нагрев только поверхности, на который в атмосфере аргона не накладываеся излучение, вызванное окислительными процессами в поверхностных и приповерхностных слоях атомов, как это обычно происходит на воздухе, где максимумы импульсов генерации, излучения и температуры совпадают (см. рис. 1, б). Облучение на воздухе инициирует интенсивное химическое взаимодействие нагретой металлической поверхности с кислородом (а также с азотом) особенно при высокой химической активности металлов. В результате температура нагретой лазером поверхности может быть намного больше, чем в среде аргона при той же плотности энергии. Поэтому на воздухе не наблюдается резкого падения температуры. Она спадает одновременно с уменьшением амплитуды лазерного импульса со скоростью  $1,6 \cdot 10^6$  К/с, т. е. в восемь раз медленнее, чем в аргоне.

В аргоне световой поток с облучаемой поверхности увеличивается в три раза после прекращения действия лазерного импульса. Происходит это из-за прогрева объема пластины на всю ее толщину. Свечение обратной стороны на воздухе начинается на 150 мкс раньше, чем в аргоне, и при одинаковой динамике в обоих средах нагрев в воздухе идет медленнее и максимальная температура на 100 К меньше, чем в аргоне.

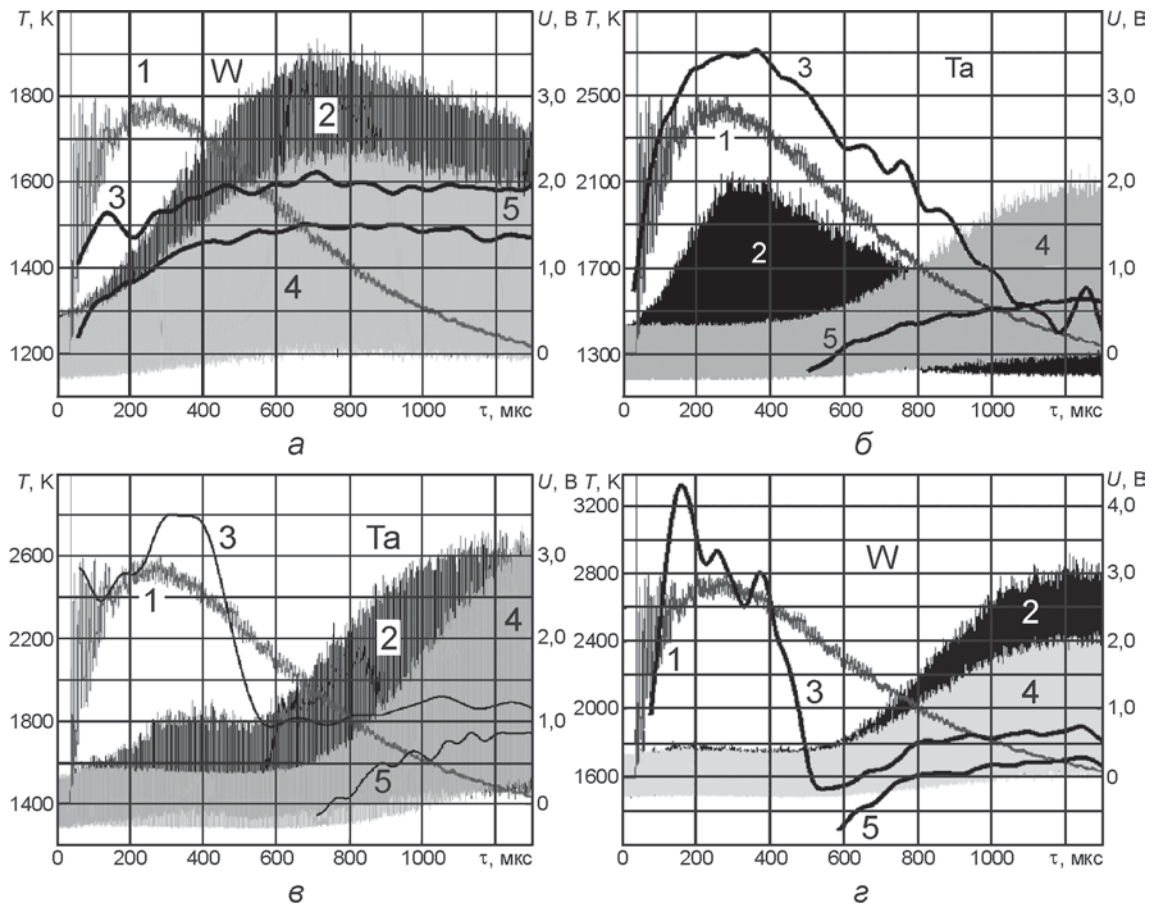


Рис. 1. Измерение температуры вольфрама и тантала на воздухе (а, б) и в аргоне (в, г):  
1 — импульс генерации лазера; 2 — свечение облучаемой поверхности; 3 — температура облучаемой поверхности; 4, 5 — свечение и температура обратной стороны пластины

Аналогичная картина динамики температуры наблюдается при облучении вольфрама в аргоне (см. рис. 1, г). Отличие в том, что в воздухе тонкая пластина вольфрама быстро прогревается на всю толщину, вследствие чего нагрев обрат-

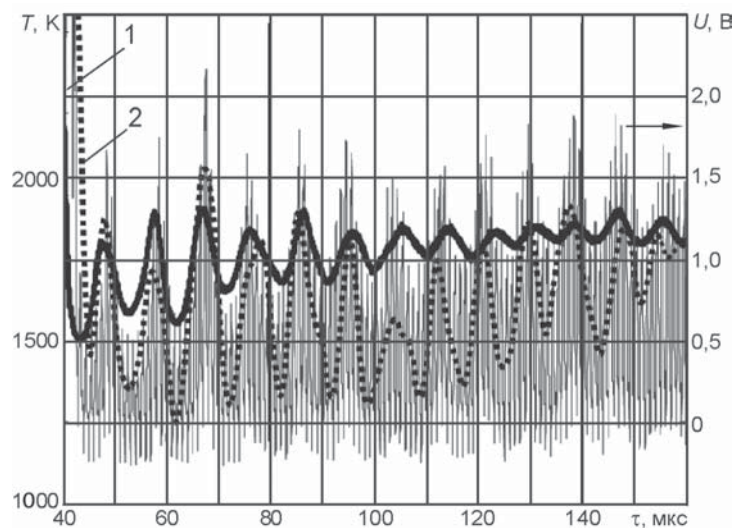


Рис. 2. Динамика излучения лазера в начале генерации (1) и соответствующая ей динамика температуры поверхности никеля (2) на фоне модулированного сигнала ФЭУ (43 Дж/см<sup>2</sup>)

ной стороны начинается почти одновременно с нагревом облучаемой поверхности (см. рис. 1, а).

При облучении титана (0,15 мм; 80 Дж/см<sup>2</sup>) максимальная температура, измеренная на воздухе, на 1000 К выше измеренной в среде аргона (соответственно 3000 и 2000 К) при одинаковых плотности энергии и динамике. Это является следствием горения титана на поверхности, так как уже при температуре 1100—1200 К титан поглощает до 30 % атомной доли кислорода.

Из осциллограммы импульса генерации лазера (кривая 1 на рис. 1, а—г) следует, что в его начальной стадии в течение около 100 мкс генерация имеет колебательный характер. На этой стадии лазерного нагрева температура облучаемой поверхности никеля, измеренная с временным разрешением 1 мкс, синхронно изменяется с периодом 10 мкс колебаний интенсивности излучения лазера (рис. 2).

Полученные данные характеризуют тепловое воздействие миллисекундных лазерных импульсов на некоторые металлы при облучении их в различных условиях, а также демонстрируют возможности фотоэмиссионного метода температурных измерений в экспериментальных исследованиях взаимодействия интенсивного лазерного излучения с твердым телом. Подобные измерения могут найти применение при изучении теплофизических свойств материалов, обработке

режимов лазерной сварки и в других технологических процессах.

#### Л и т е р а т у р а

1. **А. с. 463003 СССР.** Фотоэмиссионный способ измерения температуры / К. Н. Каспаров, Г. Д. Ивлев, И. Л. Григоршин // Бюл. изобрет. 1975. № 9.

2. **Kasparov K. N.** Heated body temperature measurement by spectrometry of photoelectrons // Meas. Sci. and Technol. 1998. V. 9. P. 1388—1399.

3. **Каспаров К. Н.** Фотоэмиссионные измерения температуры. Эффективная длина волны // Измерительная техника. 2004. № 6. С. 34—38; **Kasparov K. N.** Photoelectric Emission Measurements of Temperature Effective // Measurement Techniques. 2004. V. 47. N 6. P. 578—584.

4. **Каспаров К. Н.** Фотоэмиссионные измерения температуры. Два подхода к определению методической погрешности // Измерительная техника. 2004. № 8. С. 62—66; **Kasparov K. N.** Photoemission Temperature Measurement. Two Approaches to the Determination of the Procedural Error // Measurement Techniques. 2004. V. 47. N 8. P. 835—841.

Дата принятия 20.07.2010 г.

536.21.533.23

## Теплопроводность и излучательная способность графита DE-24 при температурах 2300—3000 К

**А. В. КОСТАНОВСКИЙ, М. Г. ЗЕОДИНОВ, М. Е. КОСТАНОВСКАЯ**

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия,  
e-mail: Kostanovskiy@gmail.com

*Представлены результаты изучения свойств теплопереноса и радиационных свойств изостатического графита DE-24 в стационарном режиме в области температур 2300—3000 К. Теплопроводность и излучательные характеристики материала определяли методом двух цилиндров. Нагрев образца осуществляли пропуском постоянного электрического тока.*

**Ключевые слова:** температура, теплопроводность, излучательная способность, метод двух цилиндров.

*The results of heat transfer and radiation properties study for graphite DE-24 at stationary conditions and temperature 2300—3000 K are presented. The thermal conductivity and emission characteristics of the material are determined by two cylinders method. The sample heating is carried out passage of a constant electric current.*

**Key words:** temperature, thermal conductivity, emissivity, method of two cylinders.

Графит марки DE-24 используется в метрологических исследованиях в качестве материала высокотемпературных излучателей моделей абсолютно черного тела, а также ампул, заполненных металлом, для реализации первичных и вторичных эталонов на фазовых переходах [1—3]. Данные о теплопроводности и излучательной способности графита этой марки в области высоких температур в литературе отсутствуют.

Теплопроводность и излучательную способность графита в стационарных условиях изучали, как правило, при нагре-

ве электрическим током. Экспериментальные образцы представляли собой толстостенные полые цилиндры или сплошные стержни. При высоких температурах это неизбежно приводило к большим перепадам температуры по толщине стенки и, как следствие, к погрешности определения как температуры отнесения, так и теплопроводности.

Цель данной работы — исследование теплопроводности и излучательной способности изостатического графита марки DE-24 в области температур 2300—3000 К с применением тонкостенных цилиндрических образцов для реализа-