

УДК 536.46

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЛАЗЕРНОМ ОБЛУЧЕНИИ С ВАРЬИРУЕМЫМ НАЧАЛЬНЫМ НАГРЕВОМ*Белозерова Л.И., Ивлев Г.Д., Каспаров К.Н.*

Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Приведены результаты измерения температуры платины в виде ленточного тела накала, предварительно нагретого в вакууме постоянным током и облученного миллисекундным лазерным импульсом. Постепенное увеличение предварительного нагрева при постоянной плотности энергии лазерного импульса позволяет получать на поверхности платины слой расплава различной толщины без разрушения тела накала. Измерения выполнены фотоэмиссионным методом, временное разрешение 5 мкс, методическая и приборная погрешности 0,3 % и 0,5 %, соответственно. Метод может быть использован для получения температуры фазового равновесия при плавлении в метрологических измерениях. (E-mail: kasparov@inel.bas-net.by)

Ключевые слова: платина, температура фазового равновесия, фотоэмиссионный метод.**Введение**

В настоящее время наилучшее временное разрешение у промышленных пирометров составляет 1 мс. Фотоэмиссионный метод оптической пирометрии [1] позволяет создать прибор с временным разрешением 1 мкс. Однако применение этого метода, в частности, из-за косвенного характера измерений и достижения намного меньшего времени измерения, по сравнению с традиционными пирометрическими методами, требует экспериментальной проверки метрологических характеристик метода и установления возможностей приборных средств его реализации.

Целью данной работы является установление метрологических характеристик фотоэмиссионного метода оптической пирометрии и разработка методики эталонирования фотоэмиссионных пирометров с высоким временным разрешением.

Объектом исследования была выбрана платина в виде ленточного тела накала в вакууме, которое нагревалось постоянным током. Подбирался такой режим, чтобы при облучении нагретого тела накала миллисекундным лазерным импульсом нагреть поверхность платины до образования на ней расплавленного слоя, не доводя тело накала до разрушения. Температура, измеренная по излучению нагретой импульсом

поверхности, должна быть равна температуре плавления платины (2042 К). Температура измерялась фотоэмиссионным методом [1], который позволяет измерять температуру с временным разрешением 1 мкс при малой методической погрешности. Это дает возможность измерять температуру в быстропротекающих тепловых процессах, когда не может быть учтено влияние излучательной способности на измеренное значение температуры. Равенство измеренной этим методом температуры температуре плавления платины подтвердило бы правильность градуировки фотоэмиссионного импульсного пирометра, выполненную по температурным лампам.

Эксперимент

Для импульсного нагрева использовался лазер на стекле, легированном неодимом, с длиной волны излучения 1,06 мкм, длительностью на полувысоте 0,6 мс и постоянной плотностью энергии 54 Дж/см². На поверхности платины излучение фокусировалось в пятно диаметром 1,7 мм. Ленточное тело накала размером 1,3×0,2×0,005 [см³] находилось в специально изготовленной вакуумной лампе с окном из оптического стекла. Ток накала изменялся от 4,75 до 7,50 А, при этом его температура увеличивалась от 1237 до 1800 К. Температура измерялась эталонным пирометром ЭОП-66. В

лабораторном образце импульсного фотоэмиссионного пирометра в качестве детектора-анализатора излучения использован ФЭУ-114.

Фотоэмиссионный метод измерения температуры основан на зависимости распределения фотоэлектронов внешнего фотоэффекта по энергиям от энергии фотона. Это проявляется в том, что сдвиг изотерм Планка в сторону коротких волн с увеличением температуры сопровождается увеличением относительного количества фотоэлектронов больших энергий в прикатодном пространстве фотоэлектронного прибора. Анализируя в переменном тормозящем поле изменение распределения фотоэлектронов по энергиям, можно измерять температуру излучающего объекта. Термометрическим свойством является зависимость напряжения токов отсечки, нормированных на постоянную величину, от температуры. Такая методика пригодна для измерения постоянных, но не быстроизменяющихся температур вследствие трудности измерения напряжения отсечки фототока. Ранее [2] по этой методике были выполнены метрологические измерения температуры платины и вольфрама, и оказалось, что методическая погрешность не превышает 0,3 %.

Зависимость распределения фотоэлектронов по энергиям от спектрального состава излучения можно определять и в постоянном тормозящем поле. В этой методике термометрическим свойством является зависимость от температуры отношения начального тока к току, ограниченному тормозящим полем. В этом случае не надо нормировать световые потоки по фототоку, так как в пределах линейности световой характеристики фотоэлектронного прибора это отношение не зависит от интенсивности светового потока. Это позволяет, модулируя электронный поток с высокой частотой (1 МГц), измерять температуру с временным разрешением, равным периоду модуляции (1 мкс). Такие измерения представляют большой интерес, поэтому важно убедиться, что импульсный метод не вносит дополнительную погрешность в измеряемую температуру.

На рисунке 1 приведены результаты измерений. Осциллограммы свечения платины и лазерного импульса начинаются одновременно, но свечение достигает максимума, когда лазерный импульс на спаде уменьшился до половины своего максимального значения. Подъем температуры платины, нагретой током до температуры 1237 К, отстает на 300 мкс от начала лазерного

импульса. При увеличении температуры начального нагрева это время сокращается до нуля при $T_{нач} = 1800$ К (рисунок 1, кривая 5).

При начальных температурах 1433, 1552, 1638, 1718 и 1800 К лазерный импульс нагревал платиновую ленту до постоянной температуры, среднее значение которой по пяти измерениям равно 2042 ± 11 К, что точно соответствует температуре плавления платины (рисунок 1, кривые 4 и 5; рисунок 2, кривая 1).

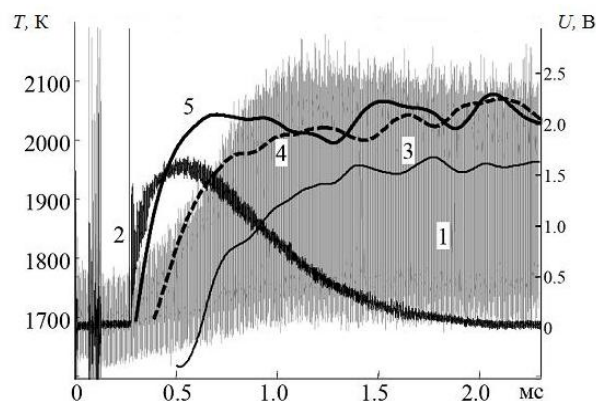


Рисунок 1 – Осциллограммы свечения (1), лазерного импульса (2) и динамика температуры при импульсном нагреве в вакууме платины, нагретой прямым прохождением тока до начальной температуры $T_{нач} = 1237$ К (3), 1644 К (4) и 1800 К (5)

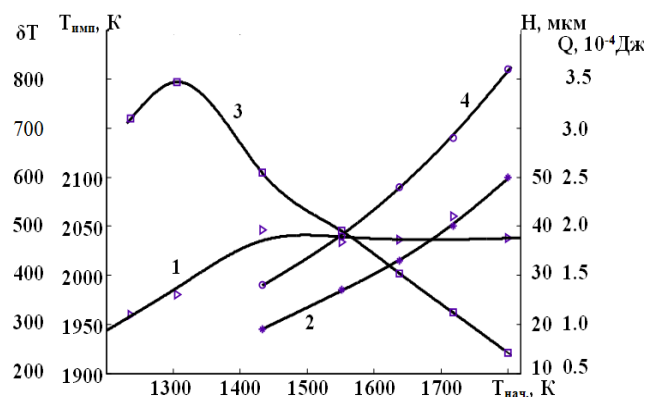


Рисунок 2 – Характеристики предварительно нагретой в вакууме платины под действием лазерного излучения: температура $T_{имп}$ платины (1), толщина расплавленного слоя платины H на поверхности тела накала (2), увеличение температуры δT платины (3) и энергия фазового преобразования Q (4)

Однако эта «фотоэмиссионная» температура содержит методическую погрешность ΔT , обусловленную излучательной способностью $\epsilon(\lambda, T)$ платины. Кроме большого быстродействия фото-

эмиссионный метод отличается от других методов оптической пирометрии тем, что измеренная температура очень слабо зависит от излучательной способности. Например, для вольфрама при 1700 К методическая погрешность при измерении температуры методом цветовой (бихроматической) пирометрии равна 22 К [5], тогда как при фотоэмиссионном методе она равна 2 К. Теоретическое обоснование столь слабой зависимости измеренной температуры от излучательной способности приведено в работах [1, 6–8].

Методическая погрешность измерения температуры зависит от значения излучательной способности ε и селективности ее спектральной характеристики $\partial\varepsilon/\partial\lambda$. Селективность определяется по наклону кривой $\varepsilon(\lambda)$, которая может быть аппроксимирована прямой. Для вольфрама такая аппроксимация имеет достоверность $R^2 = 0,993$. На рисунке 3 приведены спектральные характеристики излучательной способности платины (по двум источникам) [3, 4] и вольфрама [3], а также их селективность и методические погрешности.

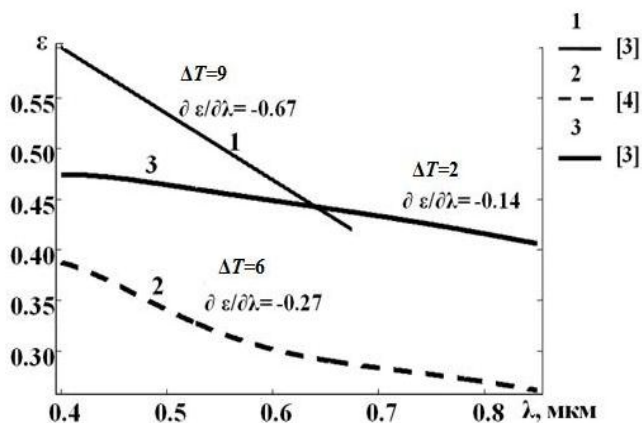


Рисунок 3 – Спектральные характеристики излучательной способности для платины по разным источникам при $T = 1673$ К (1, 2) и вольфрама W при $T = 1700$ К (3)

Графики для определения методической погрешности $\Delta T(\varepsilon, \partial\varepsilon/\partial\lambda)$ при постоянной температуре (рисунок 4) содержат линии равной излучательной способности, равной селективности и равной методической погрешности. Горизонтальные прямые равной методической погрешности для разных сочетаний ε и $\partial\varepsilon/\partial\lambda$ показывают, как увеличение селективности компенсируется большим значением $\varepsilon(0,4$ мкм) и как при небольшой селективности погрешность ΔT увеличивается при малых значениях $\varepsilon(0,4$ мкм).

Постоянство температуры и равенство ее температуре плавления говорит о том, что на поверхности тела накала в области действия лазерного импульса кратковременно образуется расплавленный слой металла. Методическая погрешность измерения при этой температуре равна для платины (6–9) К, или 0,3 %. Для металлов, имеющих спадающую по спектру характеристику излучательной способности ($\partial\varepsilon/\partial\lambda < 0$), фотоэмиссионная температура выше истинной и методическую погрешность следует вычитать из измеренного значения температуры. Следовательно, измеренная температура фазового преобразования при плавлении платины равна 2035 ± 11 К, что на 0,5 % меньше истинного значения.

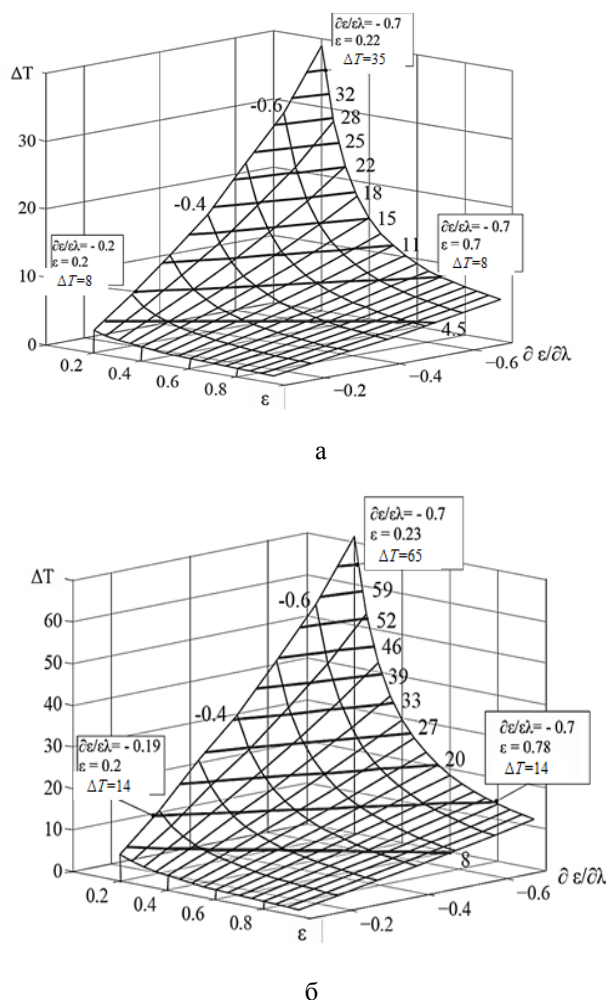


Рисунок 4 – Графики для определения методической погрешности температуры ΔT по значениям излучательной способности ε на длине волны 0,4 мкм и селективности излучательной способности $\partial\varepsilon/\partial\lambda$ при $T = 1700$ К (а) и $T = 2600$ К (б), рассчитанные в области спектральной чувствительности бищелочного фотокатода (SbKCs) от 0,4 до 0,675 мкм

Толщина расплавленного слоя H зависит от температуры предварительного нагрева тела накала $T_{\text{нач}}$ (рисунок 2) Теплота фазового преобразования зависит от массы расплава. Чем больше тепла получает тело накала при предварительном нагреве током, тем больше масса расплава, которая образуется при добавлении постоянной энергии от лазерного импульса. Поэтому, зная постоянные размеры области облучения, можно по массе расплавленного металла определить его объем и толщину расплавленного слоя H на поверхности платины. При разных температурах $T_{\text{нач}}$ ее можно определить по формуле:

$$H = d - h = d - [Q^* - Q(i)] / \lambda \rho_m \sigma \text{ [см]},$$

где $d = 0,005$ см; h – толщина нерасплавленного слоя платины; Q^* – энергия, которую получает тело накала при нагреве его током до температуры 1800 К; $Q(i)$ – энергия, которую получает тело накала при нагреве его током i до температуры $T_{\text{нач}} < 1800$ К; $\lambda = 0,1112$ Дж·г⁻¹ – удельная теплота плавления [9]; ρ_m – плотность платины при температуре плавления (19 г·см⁻³) [9]; $\sigma = 0,034$ см² – площадь расплава. На рисунке 2 приведены значения толщины расплава H для пяти значений начальной температуры $T_{\text{нач}}$, где добавление постоянной энергии от лазерного импульса не увеличивает температуру поверхности (кривая 2).

При появлении на поверхности платины расплавленного слоя увеличение температуры поверхности δT за счет энергии лазерного импульса уменьшается с увеличением начальной температуры $T_{\text{нач}}$, так как теплота, добавленная за счет прохождения тока, идет на увеличение толщины расплавленного слоя H (кривая 3), а энергия фазового преобразования вследствие этого увеличивается (кривая 4).

Заключение

Разработана методика эталонирования фотоэмиссионных пирометров с микросекундным временным разрешением, основанная на импульсном лазерном нагреве предварительно нагретого ленточного тела накала до появления на его поверхности расплавленного слоя.

Постепенное увеличение температуры предварительно нагрева при постоянной плотности энергии лазерных импульсов позволяет получить на поверхности ленточного платинового нагревателя слой расплава контролируемой толщины без разрушения тела накала.

Источник эталонных температур может быть изготовлен либо в виде вакуумной лампы с набором ленточных тел накала, которые могут быть изготовлены, например, из металлических лент Au, Pt, Mo, Nb, Ta, W и др. для формирования ряда реперных точек, либо они могут быть размещены непосредственно в рабочем объеме вакуумной установки.

Список использованных источников

1. Каспаров, К.Н. Фотоэмиссионный анализ оптического излучения / К.Н. Каспаров. – Минск : Беларуская наука, 2011. – 172 с.
2. Kasparov, K.N. Heated body temperature measurement by spectrometry of photoelectrons / K.N. Kasparov // Measurement Science and Technology. – 1998. – № 9. – P. 1388–1399.
3. Излучательные свойства твердых материалов / под ред. А.Е. Шейндлина. – М. : Энергия, 1974. – 471 с.
4. Аксютов, Л.Н. Экспериментальное изучение спектральной нормальной излучательной способности золота, платины, вольфрама / Л.Н. Аксютов // ИФЖ. – 1974. – Т. 27. – № 2. – С. 197–201.
5. Гуревич, М.М. Введение в фотометрию / М.М. Гуревич. – Ленинград : Энергия, 1968. – 154 с.
6. Каспаров, К.Н. Фотоэмиссионные измерения температуры. Эффективная длина волны / К.Н. Каспаров // Измерительная техника. – 2004. – № 6. – С. 34–38.
7. Каспаров, К.Н. Фотоэмиссионные измерения температуры. Два подхода к определению методической погрешности / К.Н. Каспаров // Измерительная техника. – 2004. – № 8. – С. 62–66.
8. Kasparov, K.N. High temperature measurement in fast phenomena by spectrometry of photoelectrons / K.N. Kasparov [et al.] // High Temperatures-High Pressures. – 2012. – V. 41 – № 5. – С. 325–340.
9. Физические величины : справочник / под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М. : Энергоатомиздат. – 1991. – 310 с.

Belaziorava L.I., Ivlev G.D., Kasparov K.N.

Temperature measurements under pulsed laser irradiation with varied initial heating

The results of measuring the temperature in a platinum filament tape, pre-heated in vacuum by direct current and irradiated a millisecond laser pulse, are presented. Gradual increase of the previous heating at a constant power irradiation density allows to receive the melted layer of different thickness without a destruction of the tape. The measurement have been carried out by photoemission method at the time resolution of 5 μ s under the method and apparatus error of 0,3 % и 0,5 %, respectively. Such a method of combined heating can be used in metrological measurements under a solid-liquid phase equilibrium temperature.

(E-mail: kasparov@inel.bas-net.by)

Key words: platinum, the temperature of the phase equilibrium photoemission method.

Поступила в редакцию 30.10.2012.