



# СПЕКТРАЛЬНАЯ ПИРОМЕТРИЯ: ОСОБЕННОСТИ, ПРЕИМУЩЕСТВА, ОГРАНИЧЕНИЯ

А. Магунов, д.т.н., ИОФ РАН им. Прохорова

**В исследованиях и новых технологиях часто бывает необходимо измерять температуру объекта с неизвестной и переменной излучательной способностью. Изменение излучательной способности связано с изменением микроструктуры поверхности, химического состава и фазового состояния объекта. Спектральная пирометрия позволяет решить эту задачу. Обсуждается новый экспериментальный метод оптической пирометрии.**

**В** исследованиях и технологическом контроле очень важными и трудными являются температурные измерения. Наиболее перспективны для широкого применения методы оптической пирометрии по собственному тепловому излучению объекта. Методы яркостной, цветовой и многоволновой пирометрии разрабатываются и совершенствуются в течение многих десятилетий. Однако они часто бывают неэффективными при измерениях температуры новых и неизученных материалов в сложных условиях из-за низкой информативности первичных данных, получаемых в эксперименте. В оптической пирометрии объекта по его собственному тепловому излучению используют методы, которые базируются на некоторой исходной информации о его оптических свойствах. Однако наблюдается стремление провести пирометрические измерения при минимуме такой информации и даже при ее отсутствии. Развитие и широкое применение метода спектральной пирометрии связано с появлением в последние десятилетия оптической техники нового поколения – малогабаритных ПЗС-спектрометров видимого, инфракрасного и ультрафиолетового диапазонов.

Метод спектральной пирометрии [1] предназначен для измерения температуры по оптическим спектрам теплового излучения объектов, облучательной способности которых нет никаких

данных. Измерительная процедура заключается в регистрации непрерывного спектра излучения в широком интервале длин волн, сравнении полученного спектра со спектром черного излучателя, нахождении участков, где эти спектры подобны и определении искомой температуры как параметра распределения интенсивности в спектре. Регистрация спектра позволяет обнаружить и исключить неравновесную составляющую – атомарные линии и молекулярные полосы в излучении пламени, взрывов и плазмы, полосы люминесценции при облучении твердых тел пучками заряженных частиц и лазерными импульсами.

Спектральная пирометрия применяется в области физики высоких давлений [2], горения и взрыва [3], газоразрядной плазмы [4], нанотехнологий [5], технологий лазерной обработки материалов [6]. С помощью кремниевых ПЗС-линеек (диапазон фоточувствительности от 200 до 1000 нм) проведены измерения температуры конденсированных сред в диапазоне от 1000 до 8000К и плотной плазмы микроскопических размеров – до 40000К. Измеряют температуру (1000–2000К) отдельных нагретых нанотрубок. При использовании фотоприемников с чувствительностью в ИК-области спектра (до 2,5–3 мкм) проводятся измерения температур, превышающих 400К [7]. Количество опубликованных статей превышает 300 и растет по экспоненте (более половины опубликовано в последние 10 лет).

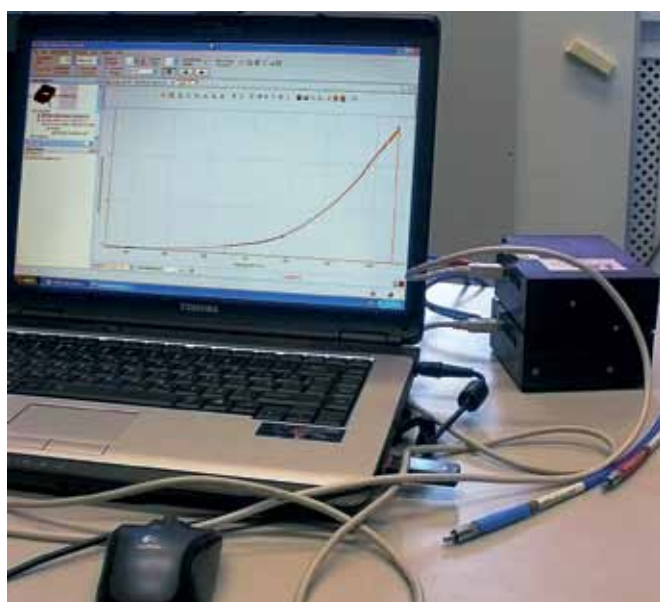


Рис.1. Спектральный пирометр с волоконно-оптическим входом

## ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЕКТРАЛЬНОГО ПИРОМЕТРА

Спектральный пирометр состоит обычно из одного или нескольких ПЗС-спектрометров и компьютера (рис.1). Значительная часть измерений выполнена с помощью малогабаритных дифракционных спектрометров Ocean Optics или Avantes, кремниевые ПЗС-линейки которых имеют от 1024 до 3648 пикселей. Излучение объекта падает на входной торец оптического волокна диаметром от 10 мкм до 1 мм и передается на входную щель спектрометра. Применяются дифракционные решетки площадью несколько кв. сантиметров с плотностью штрихов от 100–300 (для ИК-диапазона спектра) до 1200–2400 мм<sup>-1</sup> (для УФ-диапазона). На рис.1 на мониторе запечатлен спектр лампы накаливания, зарегистрированный с помощью

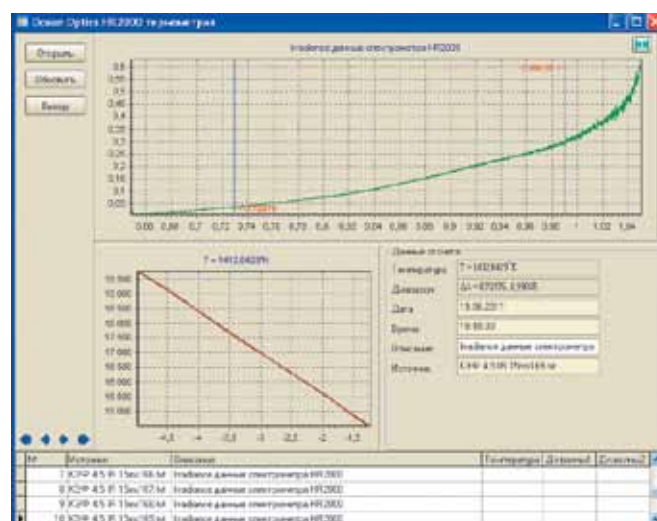


Рис.2. Окно программы "Спектральная пирометрия" для ближнего ИК-света (интервал длин волн 0,65–1,05 мкм)

двух спектрометров Ocean Optics HR2000+ (видны справа от ноутбука) в интервалах длин волн  $\Delta\lambda_1=350\text{--}760$  и  $\Delta\lambda_2=650\text{--}1050$  нм.

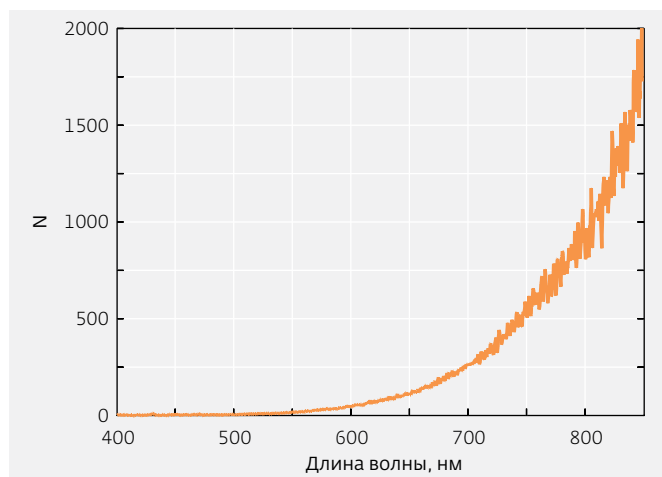
На одной и той же элементной базе производят разные спектрометры: те, которые требуются для регистрации широкого панорамного спектра (например, от 200 до 850 нм) с невысоким спектральным разрешением; спектрометры с более высоким разрешением, но менее широким регистрируемым диапазоном спектра, и – многоканальные спектрометры (фактически несколько спектрометров, работающих одновременно в разных интервалах длин волн). В ИК-диапазоне спектра ( $\lambda=1\text{--}2,5$  мкм) применяются охлаждаемые линейки фотоприемников с 256 или 512 элементами на основе InGaAs.

Весь спектр в ПЗС-спектрометре регистрируется одновременно, как в спектрографе с регистрацией на фотопластинку или фотопленку. Время накопления единичного спектра составляет от 1 мс до 20 с,

и спектрометры при малом времени накопления позволяют зарегистрировать за 1 с до 1000 спектров излучения, если необходимо изучить температурную динамику объекта. Время, в течение которого можно регистрировать последовательность спектров, ограничено только объемом памяти компьютера, при этом число зарегистрированных спектров велико. Для обработки последовательностей из сотен или тысяч спектров теплового излучения и вычисления по ним нестационарной температуры  $T(t)$  объекта создана специальная программа [8]. Программа считывает зарегистрированный спектр, обрабатывает его, строит в необходимых координатах и вычисляет температуру. Время выполнения алгоритма обработки единичного спектра составляет несколько миллисекунд. На рис.2 спектр излучения показан в верхнем окне, вертикальными линиями обозначен интервал, по которому вычисляется температура. В области  $\lambda > 1,02$  мкм видно крыло рассеянной лазерной линии Nd:YAG-лазера ( $\lambda = 1,064$  мкм). В нижнем окне – участок спектра в координатах Вина. Вычисленное по наклону прямой значение температуры ( $T = 1412\text{K}$ ) выводится над нижним окном и в таблице справа.

### ОСОБЕННОСТИ И ПРЕИМУЩЕСТВА СПЕКТРАЛЬНОЙ ПИРОМЕТРИИ

Метод спектральной пирометрии существенно отличается от традиционных методов (яркостной и цветовой пирометрии) тем, что использует измерения, проводимые на сотнях или тысячах длин волн. Это позволяет получить большую информацию об исследуемом объекте (рис.3 и 4).

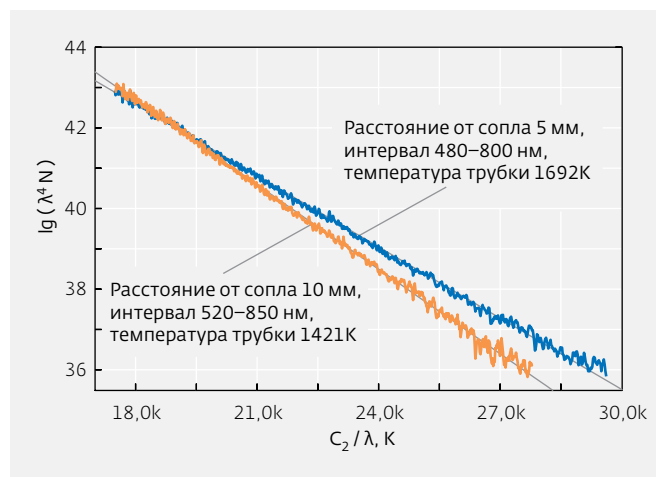


**Рис.3.** Спектр теплового излучения кварцевой трубки в прозрачной аргоновой плазме на расстоянии 10 мм от сопла микроволнового факела. Время накопления спектра 3 мс

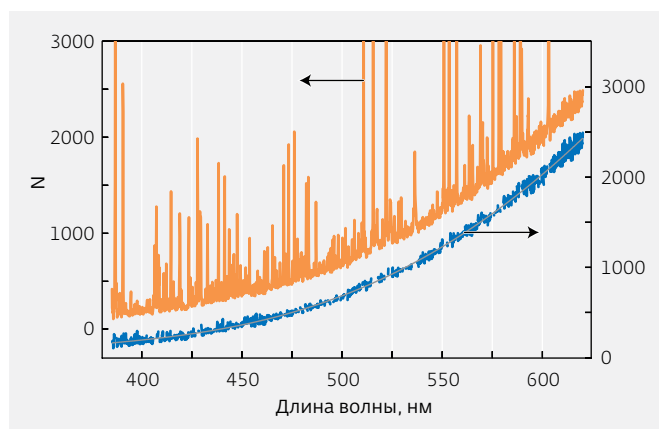
В каждом эксперименте можно определить, является ли объект изотермическим или его температура неоднородна по области визирования, вдоль луча зрения и по времени накопления спектра. В каждом эксперименте можно определить, влияет ли на спектр селективная излучательная способность  $\epsilon(\lambda)$  объекта (даже если заранее неизвестно, что объект является селективным излучателем). В традиционных методах принимается как гипотеза (как правило, без экспериментального подтверждения) тепловой характер излучения объекта и его изотермичность, а излучательную способность объекта надо изучить в отдельных экспериментах.

В спектральной пирометрии отсутствуют гипотезы, принимаемые без экспериментального подтверждения. Информативность спектральной пирометрии существенно выше традиционных методов пирометрии [9, 10], где смысл измеряемой температуры бывает неясным (при усреднении сигнала для объектов с быстроменяющейся температурой, с большими градиентами температуры или горячими пятнами в области визирования). Таким образом, развиваемый экспериментальный метод измерения температуры является новым, его создание связано с использованием спектральных приборов нового поколения.

Переход от регистрации одной или двух точек непрерывной зависимости (спектра теплового излучения) к регистрации всей зависимости или ее значительной части существенно повышает измерительные возможности пирометрии. В широком спектре часто наблюдают участки, в которых регистрируемый спектр подобен планковскому спектру. При этом нет необходимости

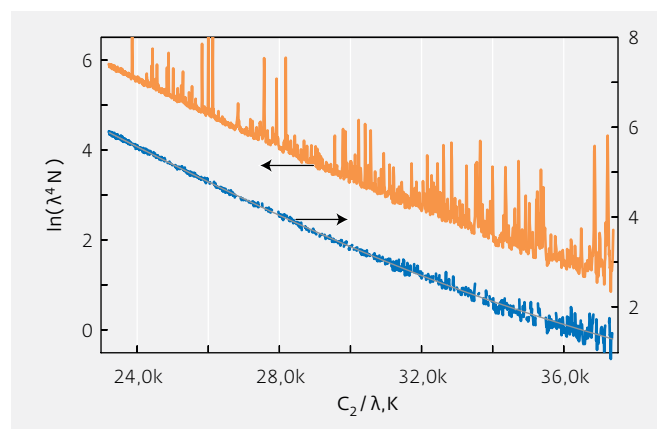


**Рис.4.** Спрявленные участки спектров излучения кварцевой трубки



**Рис.5.** Спектр излучения продуктов химической реакции в порошковой смеси Mo-CuO и плазмы микроволнового разряда на поверхности смеси. Внизу – тот же спектр после удаления сильных спектральных линий атомов Mo и Cu

измерять или вычислять коэффициент излучения  $\epsilon(\lambda)$ . Измерение температуры множества объектов для традиционной пирометрии является трудным, неоднозначным или невозможным.



**Рис.6.** Спектры излучения (рис.5), построенные в координатах Вина. Отклонение от прямолинейности обусловлено сильной неоднородностью температуры в области визирования. Температуру, близкую к максимальной, вычисляем по наклону спектра в коротковолновой области (400–480 нм), при этом  $T_{max} \approx 3288 \pm 33$  K. Для длинноволнового края спектра (590–620 нм) получаем температуру, близкую к средней по области визирования,  $T \approx 2531 \pm 32$  K



Например, из-за того, что не изучены оптические свойства большинства материалов, применяемых в новых технологиях или из-за присутствия в установке постороннего излучения. Для спектральной пирометрии те же самые задачи оказываются решаемыми благодаря несравнимо большей первичной информации, получаемой в каждом эксперименте. Новизна метода состоит в том, что можно обоснованно исключить вспомогательный параметр (коэффициент черноты и его зависимость от длины волны) из многих задач пирометрии. Для этого его надо заменить на его спектральную информацию, достаточную для определения температуры. Мнение, что исключить излучательную способность из экспериментов по измерению температуры, возможно, имеет обоснование. В частности, спектр непрозрачного селективного излучателя в коротковолновой области практически неотличим от спектра серого излучателя с близкой температурой [11]. Экспериментально вопрос сводится к изучению возможностей регистрации коротковолновой области спектра (где мал поток квантов) для разных объектов и разных температур. Сдвигаясь в коротковолновую область спектра, мы тем самым сдвигаемся в область высоких температур, превышающих 4000–5000К, при термометрии селективных излучателей. Это продвижение связано с тем, что при длинах волн, меньших 180–185 нм, излучение поглощается атмосферным кислородом. Сравнительно просто решается во многих случаях и задача разделения спектров разного происхождения при их наложении, характерная для широкого класса задач "объект в плазме" (рис.5 и 6) или "объект в пламени". На рис.6 отклонение от прямолинейности обусловлено сильной неоднородностью температуры в области визирования. Температуру, близкую к максимальной температуре, вычисляем по наклону спектра в коротковолновой области (400–480 нм), при этом  $T_{\max} \approx 3288 \pm 33\text{К}$ . Для длинноволнового края спектра (590–620 нм) получаем температуру, близкую к средней по области визирования,  $T \approx 2531 \pm 32\text{К}$ .

Основной задачей спектральной пирометрии является обоснование того, что зарегистрированный спектр (или фрагмент спектра) объекта с неизвестной излучательной способностью соответствует модели серого излучателя. Выявлены различные виды отклонений спектров от планковской формы [11], установлены их причины и характер, в ряде случаев указан способ, позволяющий правильно выбрать участок спектра,

определить действительную температуру объекта и оценить неопределенность результата.

Перспективной задачей стали исследования температурной динамики в условиях, когда излучательные свойства объекта непрерывно изменяются, причем характер изменений неизвестен и не может быть изучен отдельно [8, 11]. В исследованиях и новых технологиях часто бывает необходимо измерять температуру объекта с неизвестной и переменной излучательной способностью (изменение излучательной способности с температурой обусловлено изменением микроструктуры поверхности, химического состава и фазового состояния объекта). Спектральная пирометрия позволяет решить эту задачу.

### ОГРАНИЧЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПИРОМЕТРИИ

Интенсивность теплового излучения в области Вина растет экспоненциально с длиной волны, поэтому динамический диапазон ПЗС-линейки часто оказывается недостаточным для регистрации широкого спектра. Обычной является регистрация спектра в узком интервале длин волн шириной 150–300 нм (например, от 600 до 800 нм, от 500 до 750 нм и т.д.). Во многих случаях необходима регистрация спектра в более широком интервале длин волн, чем это доступно в настоящее время, чтобы отчетливо установить соответствие или несоответствие спектру серого излучателя.

С помощью одного спектрометра невозможно зарегистрировать кинетику нагревания объекта от начальной (обычно комнатной) до максимальной температуры. Это связано с тем, что интенсивность спектра теплового излучения в области Вина изменяется на много порядков при повышении температуры на 1000–3000К. При этом оказывается, что либо не хватает чувствительности для регистрации слабых низкотемпературных спектров, либо динамический диапазон оказывается недостаточным для регистрации интенсивных высокотемпературных спектров.

Быстродействие ПЗС-линеек часто является недостаточным для регистрации спектров излучения при импульсном (лазерном, плазменном) нагревании поверхности. Кроме того, не всегда можно использовать максимальное быстродействие (обычно 1 мс), поскольку за это время не удастся накопить спектр достаточной интенсивности из-за недостаточной яркости объекта и низкой светосилы спектрометров с волоконно-оптическим входом.



\*\*\*

Для применения в спектральной пирометрии возможна и необходима разработка специализированных ПЗС-спектрометров для регистрации широкого спектра излучения в области Вина. Технические возможности для создания многоканальных спектрометров с широким диапазоном спектра и широким динамическим диапазоном имеются. Для температурных измерений с высоким быстродействием (малым временем накопления спектра) необходима разработка светосильных спектрометров с собирающими оптическими элементами на входе.

В настоящее время спектральная пирометрия является наиболее перспективным и быстро развивающимся направлением оптической пирометрии, в котором недостаток исходных данных о свойствах объекта компенсируется обширной спектральной информацией, получаемой в каждом эксперименте.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Магунов А.Н. – Приборы и техника эксперимента, 2009, №4, с.5.
2. Kavner A., Nugent C. – Rev. Sci. Instrum., 2008, v.79, 024902.
3. Obertacke R., Wintrich H., Wintrich F., Leipertz A. – Comb. Sci. Technol., 1996, v.121, №1-6, p.133.
4. Schneider J., Pflieger R., Nikitenko S.I., et al. – J. Phys. Chem. A, 2011, v.115, №2, p.136.
5. Sveningsson M., Jönsson M., Nerushev O.A., et al. – Appl. Phys. Lett., 2002, v.81, №6, p.1095.
6. Onuseit V., Ahmed M.A., Weber R., Graf T. – Physics Procedia, 2011, v. 12, Pt. A, p. 584.
7. Shuker P., Melchior A., Assor Y., et al. – Rev. Sci. Instrum., 2008, v.79, №7, 073908.
8. Магунов А.Н., Захаров А.О., Лапшинов Б.А. – Приборы и техника эксперимента, 2012, №1, с.143.
9. Radiometric Temperature Measurements: I. Fundamentals ("Experimental Methods in the Physical Sciences", v.42). Eds. Zhang Z.M., Tsai B.K., Machin G. Amsterdam: Elsevier, 2009.
10. Radiometric Temperature Measurements: II. Applications ("Experimental Methods in the Physical Sciences", v.43). Eds. Zhang Z.M., Tsai B.K., Machin G. Amsterdam: Elsevier, 2010.
11. Магунов А.Н. Спектральная пирометрия. – М.: Физматлит, 2012.