**название вкр: «Использование метода акустооптической видеоспектромерии для изучения оптических свойств вещества в экстремальных условиях»**

**(докладчик мантрова ю.в.)**

**Слайд 1**

Здравствуйте, уважаемые коллеги.

Тема доклада: Использование метода акустооптической видеоспектрометрии для изучения оптических свойств вещества в экстремальных условиях.

**Слайд 2**

*Объект исследования:*

Научная работа посвящена вопросам, связанным с бесконтактным определением пространственного распределения коэффициента теплового излучения наравне с измерением распределения термодинамической температуры в экстремальных условиях высоких температур и давлений.

*Цель работы:*

Цель данной работы – продемонстрировать возможность измерения распределения коэффициента теплового излучения как при относительно равномерном нагреве исследуемой поверхности (нагрев поверхности током), так и при неравномерном нагреве до экстремально высоких температур (нагрев излучением мощного лазера). На данный момент подобные измерения никто не демонстрировал, ограничиваясь измерением относительных значений коэффициента теплового излучения для всего исследуемого участка в целом.

Визуализация и измерение распределения коэффициента теплового излучения важно не только, для получения более точных результатов измерения температуры нагретых тел, но также является фундаментальной научной задачей.

Получение распределений коэффициента теплового излучения особенно важно в случаях неоднородного нагрева, в связи с тем, что реальные объекты редко бывают нагреты однородно. К примеру, изучение процессов, происходящих в центре Земли возможно только с использованием ячеек высокого давления, где нагрев осуществляется при помощи излучения мощного инфракрасного лазера.

*Области применения:*

Измерение коэффициента теплового излучения при высоких температурах важно для понимания множества физических явлений, таких как: определение теплопередачи теплового излучения в ядре Земли; процессов в диффузионном пламени; получения солнечных элементов с низким коэффициентом; в тепловом контроле космических аппаратов; высокоэффективном использовании солнечной энергии и т.д.

Знание о коэффициенте теплового излучения имеет важное значение для таких областей как:

• Авиационно-космическая промышленность;

• В работах использующих солнечную энергию;

• В работе реакторов термоядерного синтеза;

• Изучение процессов плавления и фазовых переходов в нагретых веществах;

• Исследование образцов в экстремальных условиях (лазерный нагрев, ячейки высокого давления);

• Определение теплопередачи теплового излучения;

• Определения химического состава;

• И другое.

**Слайд 3**

*Методы исследования:*

Экспериментальная часть исследования выполнена с использованием уникальной измерительной установки, разработанной в НТЦ УП РАН. Данная установка позволяет достигать экстремально высоких температур, используя как лазерный, так и электрический методы нагрева экспериментальных образцов, в сочетании с акустооптической системой, позволяющей получать измерения на большом диапазоне длин волн (более 100), что позволяет значительно повысить достоверность результатов.

Теоретическая часть исследования содержит как математическую модель измерения коэффициента теплового излучения на основе метода наименьших квадратов, реализованную средствами пакета прикладных программ для решения задач технических вычислений MATLAB, так и методику определения ошибок измерения коэффициента теплового излучения.

*Результаты работы:*

На защиту выносятся следующие разработки:

• Метод измерения распределения коэффициента теплового излучения при помощи двойного акустооптического фильтра;

• Математическая модель измерения коэффициента излучения на основе метода наименьших квадратов;

• Методика определения ошибок измерения коэффициента теплового излучения и оценка ошибок в проведённых экспериментах.

А также результаты экспериментов по нагреву тестовых объектов, и экспериментальных вольфрамовых пластин.

**Слайд 4**

Внутри объектов материального мира, имеющих температуру выше абсолютного нуля (-273˚С, 0 К), происходит хаотичное движение молекул вещества. Энергия таких беспорядочно движущихся частиц называется кинетической. Когда же молекулы соударяются, происходит изменение их энергетического состояния, в ходе чего испускается электромагнитное излучение. Такое излучение называется тепловым.

В XIX веке для описания законов теплового излучения было создано понятие абсолютно чёрного тела или сокращённо АЧТ. Оно представляет собой идеализированную модель излучающего тела, не имеющую на данный момент аналогов в природе. Основополагающим свойством такой модели является её способность поглощать всё приходящее излучение вне зависимости от длины волны для любой заданной температуры, ничего при этом не отражая. При этом абсолютно чёрное тело может излучать волны любой частоты. В области теплового излучения понятие АЧТ чаще используется для сравнения радиационных свойств реальных объектов. Основной относительной характеристикой, устанавливающей связь между реальными телами и моделью АЧТ является коэффициент теплового излучения ε. Данный коэффициент позволяет оценить способность реальных тел к излучению.

Сформулированный в 1900 году закон Планка демонстрирует роль коэффициента теплового излучения в соотношении излучения АЧТ и реальных тел и позволяет дать чёткое определение: коэффициент теплового излучения – это отношение потока энергии, излучаемого реальным телом, к потоку энергии, излучаемому абсолютно чёрным телом при той же температуре.

**Слайд 5**

Проблема излучения АЧТ состояла в необходимости теоретически получить спектральную плотность его энергетической светимости. Этот вопрос был решён Максом Планком в 1900 году. Для решения данной задачи пришлось отказаться от классических представлений и сделать предположение о том, что заряд, совершающий колебания с частотой v, может получать или отдавать энергию порциями (квантами). На основе этих представлений о квантах энергии, используя методы статистической термодинамики, было получено выражение зависимости интенсивности излучения АЧТ от температуры и длины волны:

$I\_{0}=\frac{C\_{1}λ^{-5}}{e^{\frac{C\_{2}}{λT}}-1}, $ (1)

где $C\_{1}=3,74∙10^{-16} \frac{Вт}{м^{2}}$ – первая постоянная Планка, $C\_{2}=1,44∙10^{-2} М∙К$ – вторая постоянная Планка, λ – длина волны, Т – абсолютная температура в кельвинах.

Понятие АЧТ имеет основополагающее значение для изучения спектральных характеристик реальных объектов. Так как обычные тела в общем случае не являются чёрными телами, то законы теплового излучения можно применять к ним только при условии внесения определённых поправок. Нечёрные тела поглощают только часть падающего излучения, отражая и пропуская оставшееся. Величина, связывающая излучение реальных тел с излучением АЧТ, называется спектральным коэффициентом излучения ԑ(λ).

**Слайд 6**

 Метод наименьших квадратов для определения T по экспериментально определенным данным I (λ) состоит в том, чтобы найти такие значения T и ε, при которых функция

 (2)

где $g=\frac{C\_{1}λ^{-5}}{e^{\frac{C\_{2}}{λT}}-1}, $имеет минимум (двухмерная (2D) нелинейная минимизация). Вычисления, проведенные с экспериментальными данными, выявили два недостатка применения уравнения (2) для нахождения температуры и коэффициента излучения: (а) поиск глобального минимума функции *S*(*T*,*ε*) требует значительных затрат машинного времени и (б) зависит от правильного выбора начальных параметров значений *εo* и *To*. При использовании двумерной нелинейной минимизации (2) для нахождения *εo* и *To* расчёт распределения температуры образца в области, нагретой излучением лазера, мог занимать часы. Чтобы уменьшить время расчета *εo* и *To*, в работе была предложена новая процедура поиска минимума функции в методе наименьших квадратов. Она основана на том факте, что коэффициент теплового излучения *ε* в (1) является линейным параметром. Как следует из теоремы о необходимом условии существования экстремума непрерывной функции, *S*(*T*, *ε*) имеет минимум при таких значениях *T*0 и *ε*0, при которых выполняются следующие условия: 1) ∂S/∂ε |ε=ε0, *T*=*T*0 = 0; 2) ∂S/∂*T* |*ε*=*ε*0,*Т*=*T*0 = 0 [5]. Решение первого уравнения дает значение для *ε*0:

. (3)

Второе уравнение может быть записано следующим образом:

$\frac{∂S}{∂T}=-\frac{2c\_{2}ε\_{0}}{T\_{0}} \sum\_{i=1}^{N}\frac{1}{λ\_{i}}\left[I\left(λ\_{i}\right)g\left(λ\_{i},T\right)-ε\_{0}\right]=0$ (4)

Однако, также, чтобы получить значение *T0*, мы можем использовать уравнение (2). Действительно, подставив выражение (3) в уравнение (2) получаем

 (5)

Видно, что функция *S*(*T*) в выражении (5) зависит только от одного параметра – температуры. Это означает, что описанная выше процедура, сводит двумерную нелинейную минимизацию функции (2) к одномерному поиску (1-D) минимума функции (5).

**Слайд 7**

Поскольку излучательная способность ε является линейным параметром также становится возможным получить аналитическое выражение для стандартного отклонения для ε0. Для этого, мы переписываем уравнение в форме

 (6), где  (7)

Если предположить, что все измерения I(λi) независимы, то стандартное отклонение излучательной способности может быть записано как

 (8), где (9)

 ⟹ (10)

Это выражение мы используем для оценки погрешности измерения излучательной способности.

**Слайды 8 и 9**

Система лазерного нагрева с использованием двойного акустооптического фильтра (tandem acousto-optical tunable filter или TAOТF) состоит из четырех компонентов: (1) волоконного лазера ИК (1064 нм), с контролем выходной мощности излучения в диапазоне от 10 до 200 Вт путем изменения тока диода для нагрева образцов (IPG Photonics, YLR-200-AC-Y11); (2) системы спектральной визуализации, совмещенной с TAOTF; (3) моторизированной системы передвижения образца; и (4) системы визуализации с большим увеличением, использующая объектив c большим рабочим расстоянием сфокусированном на бесконечность. Установка лазерного нагрева с использованием двойного акустооптического фильтра позволяет: (а) получать двухмерное (2D) распределение для температуры и коэффициента теплового излучения с разрешением менее 2 мкм, на образцах, нагретых до высоких температур; и (б) поучать двумерное распределение интенсивности лазерного пучка на поверхности нагретого образца.

Система тандемной фильтрации АО сочетает в себе надежную спектральную визуализацию с несколькими важными особенностями: отсутствие искажений изображения и хроматический дрейф, высокая спектральная контрастность; и увеличенное отношение сигнал/шум. Измеренная интенсивность в каждом пикселе (x, y) спектроскопического изображения TAOTF пропорциональна интенсивности электромагнитного излучения, излучаемого соответствующим элементом поверхности проверяемого объекта на данной длине волны (λ). Каждый AOTF представляет собой твердотельный спектральный полосовой фильтр, который работает по принципу акустооптической анизотропной дифракции в двулучепреломляющем кристалле. AOTF обычно состоят из ячейки AO и пары скрещенных поляризаторов. Ячейка АО (AOC) представляет собой кристалл TeO2, с которым связан пьезоэлектрический преобразователь. Ультразвуковой поглотитель прикреплен к боковой поверхности кристалла. В ответ на применение осциллирующего радиочастотного электрического сигнала преобразователь генерирует высокочастотную вибрационную (акустическую) волну, которая распространяется в кристалл. Акустическая волна производит периодическую модуляцию показателя преломления n через упруго-оптический эффект. Падающий свет с волновым вектором ki воспринимает акустическую волну как объемную решетку с подвижной фазой. Решетки действуют как дифракционная решетка или дифрактор Брэгга, чтобы отклонить часть падающего лазерного света в луч первого порядка с волновым вектором kd. После того, как поляризатор P1, линейно поляризованный свет (ki) дифрагирует, меняет линейную поляризацию «o» на ортогональную «e» и отклоняется от исходного направления распространения. Эффективная дифракция Брэгга АО может возникать только в том случае, если выполняется условие согласования световой волны (ki + q = kd) и параметр Клейна-Кука *Q* = 2π*L*λ/λ2 (λ - длина волны ультразвука) составляет > 4π. Максимальная угловая ширина Дифракция света, которая необходима для фильтрации изображения, получается, если удовлетворяется неточная взаимосвязь между углами падения и дифракции для световой волны. Недифрагированное излучение блокируется поляризатором P2, который ортогонален P1.

Экспериментальная установка лазерного нагрева показана на рисунке 5. Волоконный лазерный луч направляется в положение образца с помощью зеркал (M5, M6) и узкополосного зеркала (M4). Π-формирователь расположен между зеркалами M5 и M4 и предназначен для управления формой пятна ИК-лазера (например, гауссом, плоским верхом, пончиком) и размером (8–100 мкм). М4 разделяет лазерные лучи и видимое излучение. Тепловое излучение, исходящее от образца в течение нагрева излучением лазера, направляется в сторону TAOTF с помощью зеркал M1 и M2. Изображение нагретого образца на выбранной длине волны фокусируется линзой с большим фокусным расстоянием на видео камеру.

**Слайд 10**

Результатом проведения эксперимента является массив изображений интенсивности на разных длинах волн, подлежащих дальнейшей обработки средствами Matlab, в ходе которого выбирается зона исследования, а также проводится математическая обработка экспериментальных данных. Так, на рисунке представлен пример выбора области исследования для эксперимента с нагревом вольфрамовой пластинки излучением мощного лазера, а на рисунках ниже изображены полученные в ходе обработки распределения для температуры и коэффициента излучения соответственно.

Нагрев данной вольфрамовой пластины был произведён излучением лазера с мощностью 8 W, экспозиция составила ¼ s. Образец был нагрет до 2245 К, эксперимент проводился в диапазоне длин волн от 740 до 800 нм. Значение коэффициента теплового излучения на пике температуры составило 0.31. При изменении температуры от 2130 до 2245 К изменение значений коэффициента теплового излучения составило от 0.29 до 0.43.

**Слайд 11**

Исследование проводилось при нагреве током 3,45 А вольфрамовой пластины внутри колбы на длинах волн от 600 до 800 нм. Температура и излучательная способность измерялись на площади 30х30 мкм. Предполагалось, что лампа находится в термодинамическом равновесии, температура должна быть равномерной по всей поверхности горячего образца. Однако полученная температура не является однородной. Происходит разброс значения температуры по поверхности лампы (рисунок слева): температура колеблется от 1710 К до 1745 К. Ситуация отличается для измерения излучательной способности. Как видно из рисунка справа, полученные значения излучательной способности варьируются от 0,34 до 0,44, тогда как табличное значение составляет 0,39. Максимальная погрешность измерения излучательной способности в одной точке составила 13%.

**Слайд 12**

Для проведения экспериментов по лазерному нагреву использовалась вольфрамовая лампа, которая является стандартным измерительным объектом в пирометрии. Вольфрамовая лента лампы была нагрета ИК-лазером с фиксированной мощностью 8 Вт. На слайде показаны распределения температуры и излучательной способности, смоделированные методом наименьших квадратов. Оценки статистических ошибок температуры и излучательной способности проводились в трех точках с разными температурами: в центре пятна нагрева (область I), где температура нагрева была самой высокой, 2640 К; и в двух областях (область II и область III) вдоль его края, где температура нагрева составляла 2451 К (область II); и 2135 К (область III). В этих точках также измеряли излучательную способность. Для всех точек измерения теплового излучения проводились в диапазоне длин волн от 750 до 800 нм

**Слайд 13**

Наши результаты показывают, что чем выше температура, тем ниже значение излучательной способности в диапазоне длин волн 750–800 нм, что хорошо согласуется с опубликованными экспериментальными данными. Отметим, что значения излучательной способности, измеренные системой TAOTF, также находят отражение (в пределах ошибок эксперимента) в значениях, приведенных в справочнике:

**Слайд 14**

* Показано, что использование АО-системы позволяет измерять распределение излучательной способности твёрдых тел, в условиях лазерного нагрева
* Анализ экспериментальных данных показывает, что применение TAOTF позволяет измерять излучательную способность, а также температуру с относительными погрешностями 13% и 1.2% соответственно
* Относительные статистические погрешности излучательной способности оказались почти в десять раз выше, чем для температуры
* Было обнаружено, что статистическая ошибка коэффициента излучения увеличивается с ростом температуры. Возможная причина этого явления может быть связана с зависимостью величины излучательной способности от длины волны при высокой температуре: 0(λ). Эта зависимость будет учтена нами в последующих работах.

**Слайды 15 - 17**

Публикации и выступления

**Слайд 18**

*Предложено:*

1. Метод измерения распределения коэффициента излучения при помощи акусто-оптического фильтра
2. Математическая модель измерения коэффициента излучения на основе метода наименьших квадратов
3. Методика определения ошибок измерения коэффициента излучения и оценка ошибок в проведённых экспериментах

*Результаты измерений:* Вольфрамовая пластина (нагрев: ток, лазер)

**Слайд 19**

Спасибо за внимание.