

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2010137366/28, 09.09.2010

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
09.09.2010

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 09.09.2010

(43) Дата публикации заявки: 20.03.2012 Бюл. № 8

(45) Опубликовано: 20.07.2012 Бюл. № 20

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: Salamon M.B. and Garnier P.R. Simultaneous Measurement of the Thermal Diffusivity and Specific Heat Near Phase Transitions // J. Phys. Chem. Solids. - 1974, Vol.35, pp.851-859.
 Исследование тепловых свойств тонких пленок $Ba_{1-x} Sr_x TiO_3$ методом зондового периодического нагрева // Физика твердого тела. - 2000, том 42, вып.10. RU 2329492 C2, 20.07.2008. GB 1245054 A, 20.09.1971.

Адрес для переписки:
 367000, РД, г.Махачкала, ул. М. Гаджиева,
 43-А, ДГУ, УИС

(72) Автор(ы):

Абдулвагидов Шапиулаг Белалович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Государственное образовательное учреждение Высшего профессионального образования Дагестанский государственный университет (RU)

RU 2456582 C2

RU 2456582 C2

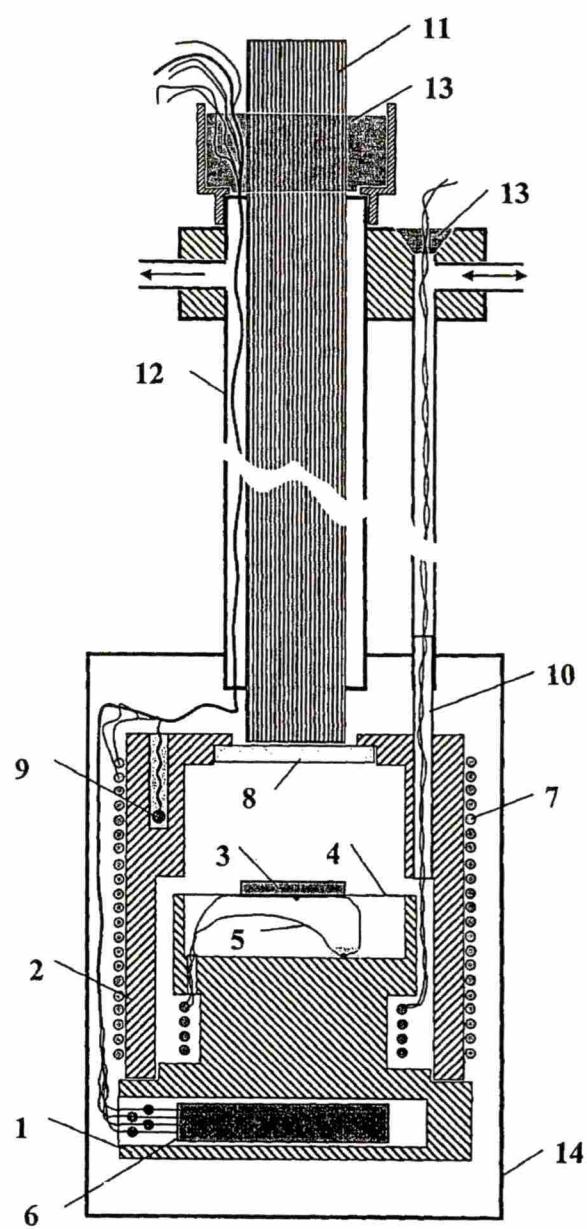
(54) УСТРОЙСТВО И СПОСОБ ОДНОВРЕМЕННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ СВОЙСТВ

(57) Реферат:

Изобретение относится к области теплофизических измерений и может быть использовано для определения тепловых свойств твердых тел и газов. Техническим результатом является возможность одновременного измерения теплоемкости и температуропроводности и определение из их произведения теплопроводности. Устройство для измерения температуры включает основание, крышку и стеклянные волокна, на которых расположен образец, к которому приклеена термопара. Угольный термометр сопротивления установлен в отверстие у основания. Нагреватель намотан по внешней поверхности крышки. С одной стороны

верхней крышки утоплена термопара калориметра, с другой стороны крышки расположена трубка-держатель калориметра, внутри которой проходят провода. Над окном в крышке расположен световод, подведенный к калориметру по трубке вместе с подводящими проводами. Способ определения тепловых свойств, включающий измерение температуры, заключается в том, что измерение теплоемкости и теплопроводности проводят одновременно. При этом теплопроводность определяют из произведения теплоемкости и температуропроводности, которая рассчитывается по оригинальной формуле. 2 н. и 1 з.п. ф-лы, 4 ил.

R U 2 4 5 6 5 8 2 C 2



ФИГ. 1

R U 2 4 5 6 5 8 2 C 2

Изобретение относится к области теплофизических измерений и может быть использовано для определения тепловых свойств твердых тел и газов в широком интервале температур, от гелиевых и до комнатных, и магнитных полей.

Изобретение наиболее эффективно может быть использовано для измерения теплоемкости, температуропроводности и теплопроводности твердых тел малых размеров, подготовленных для измерения в виде пластин с толщиной от 0,1 до 0,5 мм и плоскими размерами, в которые может быть помещен круг диаметром 3 мм.

Известна версия метода а.с.-калориметрии, позволяющая одновременно измерять теплоемкость и теплопроводность, в котором теплоемкость и теплопроводность рассчитываются из измерений частотной характеристики образцов [1], т.е. зависимости амплитуды осцилляции температуры образца от частоты этих осцилляций. Этот метод трудоемок и сложен, т.к. для получения одной пары точек данных приходится измерять целую частотную зависимость, на которую затрачивается много времени (несколько часов), т.к. при каждой новой частоте необходимо время, чтобы фазочувствительный усилитель достоверно детектировал сигнал. Затем аппроксимировать эту зависимость с помощью метода наименьших квадратов, чтобы получить значения теплоемкости и теплопроводности. Вот почему даже в самой оригинальной работе [1] в подтверждение разработанного метода измерена только одна частотная характеристика, из которой получено только по одному значению теплоемкости и теплопроводности образца.

Известен также так называемый метод тени, в котором одновременно измеряются теплоемкость методом а.с.-калориметрии, а теплопроводность методом стационарного теплового потока [2]. По сути, этот метод является комбинацией двух методов измерения - модуляционного и стационарного - на одном и том же образце и вследствие этого технически сложен в осуществлении. В этом методе к обратной стороне образца приклеиваются две термопары на небольшом расстоянии друг от друга. Одна из них находится под той частью образца, которая освещается модулированным световым потоком и тем самым детектирует температурные осцилляции, амплитуда которых обратно пропорциональна теплоемкости. Вторая же термопара расположена в той области образца, которая защищена от света тенью от тонкой металлической полоски, и измеряет температуру этой области образца. Из разности температур между спаями этих термопар с помощью закона Фурье можно найти теплопроводность образца, если известны расстояние между спаями этих термопар и световая мощность, поглощаемая экспонируемой областью образца. Однако определить световую мощность, поглощаемую экспонируемой областью образца, бывает довольно трудно, поэтому в эксперименте получают относительные значения теплопроводности. Кроме того, как и всем стационарным методикам, теплопроводности этой методике присущи большие погрешности.

В силу вышеизложенных трудностей и недостатков аналоги, приведенные здесь, не нашли практического применения.

Наиболее близким по технической сущности является известная экспериментальная установка для измерения теплоемкости профессора физики Иллинскойского университета М.Б.Саламона, которая содержит в себе а.с.-калориметр, температурные осцилляции которого возбуждаются модулированным светом, передаваемым по световоду, который обеспечивает следующие параметры измерений теплоемкости: - относительные погрешности измерений теплоемкости около 0,1%; - масса измеряемого образца от 0,1 mg до 100 mg; - диапазон рабочих температур 80-300 K; - скорость изменения температуры 0,1 K/мин [4].

Недостаток известной нам конструкции прототипа заключается в том, что она не позволяет проводить наряду с измерениями теплоемкости одновременно и измерения температуропроводности и теплопроводности.

Другим недостатком известной нам конструкции прототипа является то, что она не позволяет проводить измерения в широком интервале температур, от гелиевых и до комнатных, а также в экстремальных условиях.

Задачей настоящего изобретения является разработка портативного модуляционного калориметра многофункционального характера и одновременное измерение теплоемкости и температуропроводности, и определение из их произведения теплопроводности.

Поставленная задача решается тем, что измерения производятся с помощью оригинальной версии модуляционной калориметрии, что позволяет существенно интенсифицировать процесс измерения по сравнению с методиками, основанными на стационарном тепловом потоке, при этом использовано устройство для определения теплофизических свойств твердых тел, который состоит из собственно микрокалориметра, световода, источника света, нагревательного элемента, датчиков измерения средней температуры теплового резервуара и осцилляций температуры образца, которые электрически, оптически и конструктивно объединены в едином корпусе. Система предназначена для одновременного измерения температурных и полевых зависимостей теплоемкости, температуропроводности и теплопроводности образцов с экстремально малыми размерами, а также магнетокалорического и электрокалорического эффектов в интервале температур 4-300 К и магнитных полей до 15 Тл.

Задача также решается способом одновременного определения теплоемкости и теплопроводности, включающим измерение амплитуды измеряемого сигнала при двух различных значениях фазы, вычисление по этим значениям фазы измеряемого сигнала с помощью соответствующей оригинальной формулы, настройку на максимум фазочувствительного усилителя по рассчитанному значению фазы измеряемого сигнала, измерение амплитуды измеряемого сигнала при настроенном на максимум фазочувствительном усилителе и вычисление из ее значения теплоемкости по соответствующей формуле, вычисление по оригинальной формуле из фазы измеряемого сигнала значения температуропроводности и, наконец, определение теплопроводности из произведения теплоемкости и температуропроводности.

Сущность изобретения

1. Устройство для измерения температуры, включающее основание, крышку и стеклянные волокна, на которых расположен образец, к которому приклейна термопара, а угольный термометр сопротивления установлен в отверстие у основания, нагреватель намотан по внешней поверхности крышки, в верхней части крышки установлено окно из оптического стекла, с одной стороны верхней крышки утоплена термопара калориметра, с другой стороны крышки расположена трубка-держатель калориметра, внутри которой проходят провода, а над окном расположен световод, подведенный к калориметру по трубке вместе с подводящими проводами.

2. Способ определения тепловых свойств, включающий измерение температуры с помощью устройства по п.1, отличающийся тем, что измерение теплоемкости и теплопроводности проводят одновременно, при этом теплопроводность определяют из произведения теплоемкости и температуропроводности, которая рассчитывается по оригинальной формуле

$$\eta = \frac{\omega h^2}{2\pi\sqrt{90}} [1/\sin^2 \alpha - 1]^{-1/2},$$

где ω - угловая частота изменений подводимой мощности светового потока,

5 h - толщина образца,

α - разность фаз между осцилляциями мощности света, поглощаемого образцом и осцилляциями температуры образца.

3. Устройство по п.1, отличающееся тем, что трубка-держатель калориметра, через которую производится откачка калориметра и впуск в него теплообменного газа и для подведения термопары к образцу, а трубка для проводки световода предназначена также и для подведения подводящих проводков к термопаре и термометру сопротивления, детектирующих температуру калориметра, и нагревателю калориметра, а полости в нижней части калориметра служат для намотки некоторой 15 длины подводящих проводков, необходимой при монтаже образца и проведения измерения в экстремальных условиях.

На фиг.1 изображена схема калориметра (1 - основание; 2 - крышка; 3 - образец; 4 - стеклянные волокна; 5 - термопара, детектирующая температуру образца относительно калориметра; 6 - угольный термометр сопротивления; 7 - нагреватель; 8 - окно из оптического стекла; 9 - термопара, измеряющая температуру калориметра; 10 - трубка-держатель; 11 - световод; 12 - трубка для проводки световода; 13 - герметизация пицеином; 14 - наружная трубка-кожух).

На фиг.2 изображена схема тепловых потоков в образце.

25 На фиг.3 изображена частотная характеристика $\Delta P_A/\omega\Delta T$ от $f=\omega/2\pi$ для образца толщиной 0.030 см из высокотемпературной сверхпроводящей керамики $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$.

На фиг.4 изображена теплопроводность обменного газа гелия в зависимости от температуры (+ - справочные данные).

30 Калориметр, показанный на фиг.1, состоит из медных основания 1 и крышки 2, которые герметично спаиваются друг с другом. Образец 3 с помощью двух стеклянных волокон 4 диаметром $\approx 5 \mu m$, которые использованы для минимизации теплоотвода от образца, монтируется на расстоянии (2-3 мм) над основанием. Один из спаев термопары 5, детектирующей температуру образца относительно калориметра, 35 приклеивается с помощью клея БФ-2, имеющего высокую теплопроводность, к образцу, а другой к основанию калориметра, для предотвращения тепловых осцилляций. Для низкотемпературных измерений (2-30 K) предусмотрено использование угольного термометра сопротивления 6, который устанавливается в высверленное под его диаметр отверстие в нижней части основания калориметра. По 40 внешней поверхности крышки намотан нагреватель 7 из константанового эмалированного провода диаметром 0.1 мм с шелковой изоляцией с сопротивлением около 150 Ом. Окно 8 из оптического стекла приклеивается с внутренней стороны крышки с помощью аральдита, что обеспечивает герметичность даже при самых 45 низких температурах.

Спай термопары 9, измеряющей температуру калориметра, помещается в небольшое углубление до 5 мм диаметром около 1 мм в крышке калориметра и для улучшения теплового контакта заливается kleem БФ-2. Другой спай этой термопары помещается в сосуде Дьюара в смеси воды и льда.

50 Роль держателя калориметра выполняет трубка 10, через которую также производится откачка калориметра и впуск в него теплообменного газа, а также выводятся подводящие провода термопары 5.

Для обеспечения герметичности световод 11 проводится в низкотемпературную зону через тонкостенную трубку из нержавеющей стали 12 и герметизируется пицеином 13 (смесь приблизительно равных частей канифоли и воска). Через эту же трубку производится откачка калориметра и выводятся наружу подводящие провода термопары 9, угольного термометра сопротивления 6 и нагревателя 7, которые герметизируются пицеином 13 на верхних концах трубок 10 и 12. Диаметр наружной трубы (кожуха) 14 криостата (15 мм) позволяет поместить криостат с образцом вовнутрь сверхпроводящего соленоида, в транспортный гелиевый криостат, и проводить исследования в экстремальных условиях.

Использованная для измерений электронная аппаратура состоит из следующих основных узлов: 1) питания источника света постоянным током; 2) измерения средней температуры теплового резервуара; 3) измерения разности температур между образцом и резервуаром; 4) измерения температурных осцилляций образца; 5) модуляции светового потока; 6) регулирования средней температуры образца.

В качестве источника может быть использована лампа накаливания либо светодиод.

Показания термоэдс термопары 9 детектируются цифровым милливольтметром и считаются компьютером по последовательному порту COM (RS232). Для моделей 20 милливольтметров, не имеющих разъема, возможно считывание данных через параллельный порт Centronics с помощью разработанного нами мультиплексора, который поочередно подключает к параллельному порту компьютера соответствующие декады с двоично-десятичного кода цифрового выхода милливольтметра Щ300.

Измерение разности температур между образцом и резервуаром T_{dc} происходит аналогичным образом, лишь с той разницей, что к милливольтметру вместо термопары 9 подключается термопара 5.

Измерение осцилляции температуры образца осуществляется фазочувствительным 30 усилителем с подключенной к нему термопарой 5.

Необходимая частота прерывания светового потока устанавливается с помощью 40 механического прерывателя на основе синхронного электромотора.

Регулирование температуры калориметра осуществляется подключенным к нагревателю экспериментальной ячейки цифровым источником питания.

Процесс измерений автоматизирован на базе персонального компьютера.

Для измерения теплоемкости и температуропроводности используется 40 разработанная нами оригинальная версия метода а.с.-калориметрии Салливана и Зайделя [3]. Основная идея этого метода состоит в том, что периодический подвод одинаковых количеств тепла ΔQ вызывает периодические изменения температуры в образце.

Схема образца толщиной h , используемого в методе, показана на фиг.2. Из всего количества теплоты ΔQ , поглощенной образцом, часть ΔQ_1 диссириует с постоянной времени τ_1 в тепловой резервуар (в основном через теплообменный газ), а другая 45 часть ΔQ_2 передается с постоянной времени τ_2 к обратной стороне образца и затем также диссириует в тепловой резервуар. Амплитуда ΔT изменений температуры при периодическом подведе тепла обратно пропорциональна теплоемкости образца. Салливан и Зайдель [3] показали, что в случае одномерного теплового потока в 50 направлении наименьшего размера тонкого образца

$$\Delta T = \frac{\Delta P_A}{\omega C_A} \left(1 + \frac{1}{\omega^2 \tau_1^2} + \omega^2 \tau_2^2 + \sqrt{90} \frac{\tau_2}{\tau_1} \right)^{-1/2}, \quad (1a)$$

$$\tau_2 = h^2 / \sqrt{90\eta}, \quad (1b)$$

$$\tau_1 = C / g, \quad (1c)$$

где ΔP_A - амплитуда осцилляции мощности, подводимой к образцу, ω - угловая

частота изменений подводимого потока мощности, C_A - теплоемкость в расчете на единицу площади, η - температуропроводность образца, C - объемная теплоемкость образца, g - теплопроводность от образца к резервуару через обменный газ.

Уравнение (1a) используется для определения теплоемкости путем подбора постоянных времени τ_1 и τ_2 при выборе рабочей частоты в соответствии с условием $\omega\tau_1 \gg 1 \gg \omega\tau_2$. (2)

Здесь условие $\omega\tau_1 \gg 1$ обеспечивает пренебрежимо малые потери тепла в резервуар за один цикл изменения теплового потока (квазиадиабатические условия), а условие $\omega\tau_2 \ll 1$ - установление теплового равновесия в образце. Величину τ_1 можно изменять путем изменения теплопроводности g от образца к резервуару, а величину τ_2 - путем изменения толщины образца h . На фиг.3 показана зависимость $\Delta P_A/\omega\Delta T$ от частоты $f = \omega/2\pi$ в логарифмических координатах для одного из исследованных нами образцов высокотемпературной сверхпроводящей керамики $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ толщиной 0.030 см.

Эти данные получены при температуре 77 К. Представленная кривая позволяет отметить важную особенность: выше 4Hz условие $2\pi f\tau_2 \ll 1$ не выполняется

Если $\tau_2/\tau_1 \ll 1$ и одновременно выполняется условие (2), то второй, третий и четвертый члены в скобке в правой части выражения (1a) становятся пренебрежимо малыми и оно превращается в

$$C_A = \frac{\Delta P_A}{\omega\Delta T}. \quad (3)$$

Из сравнения выражения (3) при учете, что теплоемкость вещества образца при постоянной температуре неизменна ($C_A = \text{const}$), и графика на фиг.2 очевидно, что (3) справедливо при частотах ω , соответствующих горизонтальному участку графика.

Поглощение образцом мощности ΔP_A приводит к некоторому увеличению температуры образца относительно резервуара

$$T_{dc} = \Delta P_A / gd, \quad (4)$$

где d - расстояние между образцом и тепловым стоком резервуара. Выражение (4) может быть использовано для дополнительного тестирования условий эксперимента и методики. Так, если измерить температурную зависимость T_{dc} , можно получить температурную зависимость теплопроводности газа, заполняющего калориметр. На фиг.4 представлена температурная зависимость теплопроводности обменного газа гелия, рассчитанная из температурной зависимости T_{dc} с помощью выражения (4). Как видно из чертежа, теплопроводность гелия в зависимости от температуры хорошо согласуется со справочными данными [4].

Получив из (4) выражение для ΔP_A и подставив его в (3), получим

$$C_A = \frac{gdT_{dc}}{\omega\Delta T}. \quad (5)$$

Из (5) следует, что, измерив ΔT и T_{dc} при известных значениях g и d , можно определить абсолютное значение теплоемкости образца.

Температуропроводность образца определяется выражением (1b). Для определения величины τ_2 в формуле (1b) воспользуемся формулой [3]

$$\alpha = \arcsin \left[1 + \left\{ 1 / (\omega\tau_1) - \omega\tau_2 \right\}^2 \right]^{1/2}, \quad (6)$$

где α - разность фаз между осцилляциями мощности света, поглощаемого образцом,

и осцилляциями температуры образца.

Из (6) найдем выражение для τ_2

$$\tau_2 = \left(1/\sin^2 \alpha - 1\right)^{1/2} / \omega - 1/(\omega^2 \tau_1) \quad (7)$$

5 При выполнении условия (2) второе слагаемое в правой части (7) окажется пренебрежимо малым по сравнению с первым, тогда

$$\tau_2 = \left(1/\sin^2 \alpha - 1\right)^{1/2} / \omega. \quad (8)$$

Выражение (8) используется нами для определения значений τ_2 по измеренным в 10 эксперименте значениям α .

Усилители типа Unipan 232 имеют по сравнению с современными усилителями, например SR830, тот недостаток, что выходной сигнал зависит от фазы, которая подстраивается вручную. Другими словами, усилители типа Unipan 232 не являются 15 фазочувствительными усилителями векторного типа, поэтому экспериментатору приходится при использовании таких усилителей вручную настраивать их на максимум, при этом в силу субъективных причин погрешность измерения фазы достигает 5%. С этой целью нами предложена формула, с помощью которой из 20 значений сигналов x_1, x_2 при двух различных значениях фазы φ_1, φ_2 можно точно найти фазу измеряемого сигнала α :

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{x_2 \cos \varphi_1 - x_1 \cos \varphi_2}{x_2 \sin \varphi_1 - x_1 \sin \varphi_2} + \pi n, \quad n = 0, 1. \quad (9)$$

Из-за неоднозначности arctg приходится определять экспериментально. Для этого 25 значение α посыпается в фазовращатель. Если после этого выходной сигнал синхронного нановольтметра положительный, то $n=0$, иначе $n=1$.

Фазочувствительные усилители векторного типа позволяют прямо измерять фазу 30 измеряемого сигнала α . В этом случае можно воспользоваться формулой (8) без привлечения формулы (9).

Подставляя (8) в (1b), получим формулу для экспериментального определения температуропроводности

$$\eta = \frac{\omega h^2}{2\pi\sqrt{90}} \left[1/\sin^2 \alpha - 1\right]^{1/2}. \quad (10)$$

35 Теплопроводность рассчитывается из произведения теплоемкости (3) и температуропроводности (10).

Итак, измерив ΔT и α , одновременно определяем теплоемкость, температуропроводность и теплопроводность.

40 Экспериментальная установка была апробирована измерениями теплоемкости и теплопроводности меди и плавленого кварца в широком интервале температур, которые в пределах погрешности 1-2% согласуются со справочными данными [4].

Преимущество предлагаемого изобретения в том, что особенно удобно исследовать 45 монокристаллы таких веществ, качественные образцы которых, как правило, имеют очень малые размеры. Среди таких веществ можно отметить высокотемпературные сверхпроводники, мanganиты, сегнетоэлектрики, мультиферроики, сегнетомагнетики, фуллерены. Малые размеры образца позволяют многократно сократить время установления теплового равновесия в нем после поглощения теплового импульса и 50 тем самым время на проведение измерений и проводить измерения в непрерывном квазистационарном режиме.

Предложена формула, позволяющая определять температуропроводность из фазы измеряемого сигнала по оригинальной формуле. Это позволяет работать с

фазочувствительными усилителями, не имеющими так называемой функции векторной настройки максимума измеряемого сигнала. Такие усилители (У2-8, UNIPAN232В) относительно недороги в сравнении, например, с усилителем векторного типа SR830, что расширяет возможности использования предлагаемой системы.

⁵ Малый вес и объем системы позволяют проводить исследования в транспортном гелиевом криостате, в сверхпроводящем соленоиде, в ограниченном пространстве между полюсами электромагнита и, что особенно важно, на борту орбитальной космической станции с использованием естественного космического вакуума.

¹⁰ Немаловажным фактором является стоимость устройства, которая будет на порядок меньше стоимости зарубежных аналогов.

Источники информации

1. C.C.Huang, J.M.Vainer and J.C.Novack New experimental technique for simultaneously measuring thermal conductivity and heat capacity Rev. Sci. Instrum., vol.56, No.7, p.1390-1393

¹⁵ (1985) Хуан, Вайнер, Новак. Новый метод одновременного определения теплопроводности и теплоемкости. Приб. для науч. исслед. 1985, No.7, p.93-97.

2. M.B.Salamon, P.K.Garnier, B.Golding, E.Buehler Simultaneous measurement of the thermal diffusivity and specific heat near phase transition J. Phys. Chem. Solids, vol.35, p.851-859 (1974).

3. P.Sullivan and G.Seidel Steady-state, ac-temperature calorimetry Phys. Rev.173, p.679-685 (1968).

4. Таблицы физических величин, справочник под ред. академика И.К.Кикоина, М., Атомиздат, 1976, с.257.

²⁵

Формула изобретения

1. Устройство для измерения температуры, включающее основание, крышку и стеклянные волокна, на которых расположен образец, к которому приклеена

³⁰ термопара, а угольный термометр сопротивления установлен в отверстие у основания, нагреватель намотан по внешней поверхности крышки, в верхней части крышки установлено окно из оптического стекла, с одной стороны верхней крышки утоплена термопара калориметра, с другой стороны крышки расположена трубка-держатель калориметра, внутри которой проходят провода, а над окном расположен световод, подведенный к калориметру по трубке вместе с подводящими проводами.

³⁵ 2. Устройство по п.1, отличающийся тем, что трубка-держатель калориметра, через которую производится откачка калориметра и выпуск в него теплообменного газа, используется и для подведения термопары к образцу, а трубка для проводки световода предназначена также и для подведения подводящих проводков к термопаре и ⁴⁰ термометру сопротивления, детектирующих температуру калориметра, и нагревателю калориметра, а полости в нижней части калориметра служат для намотки некоторой длины подводящих проводков, необходимой при монтаже образца и проведения измерения в экстремальных условиях.

⁴⁵ 3. Способ определения тепловых свойств, включающий измерение температуры с помощью устройства по п.1, отличающийся тем, что измерение теплоемкости и теплопроводности проводят одновременно, при этом теплопроводность определяют из произведения теплоемкости и температуропроводности, которая рассчитывается по оригинальной формуле

$$\eta = \frac{\omega h^2}{2\pi\sqrt{90}} [1 - \sin^2 \alpha - 1]^{-1/2},$$

где ω - угловая частота изменений подводимой мощности светового потока,

h - толщина образца,

α - разность фаз между осцилляциями мощности света, поглощаемого образцом, и осцилляциями температуры образца.

5

10

15

20

25

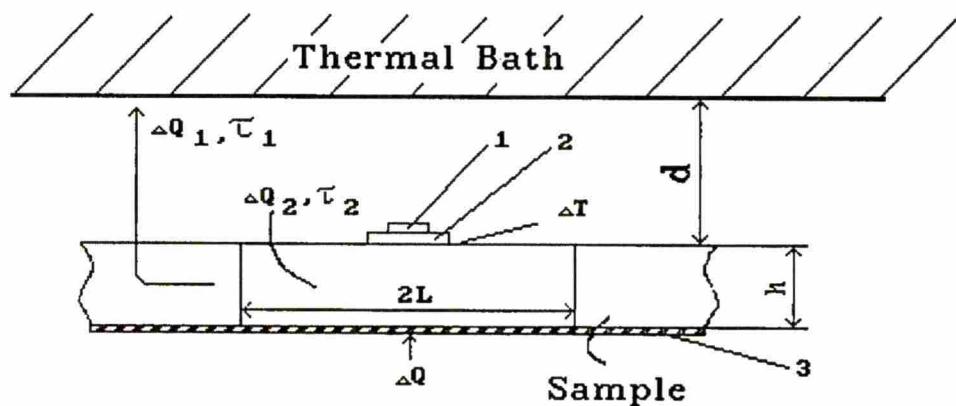
30

35

40

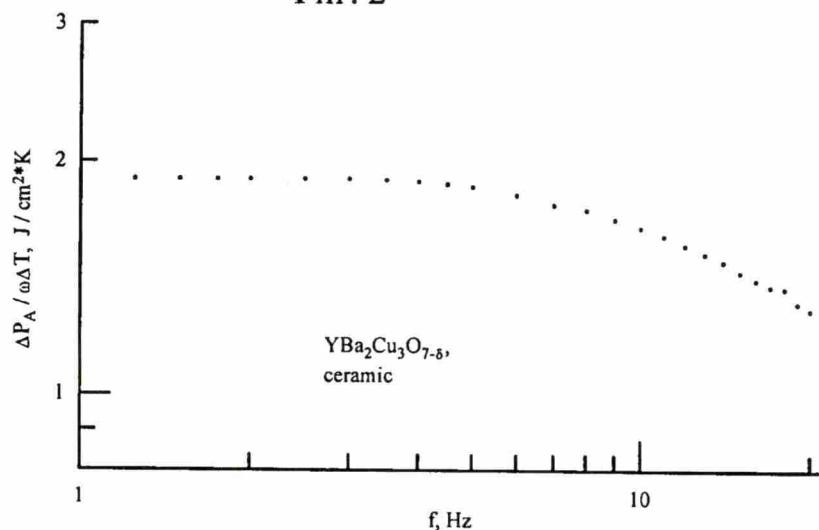
45

50

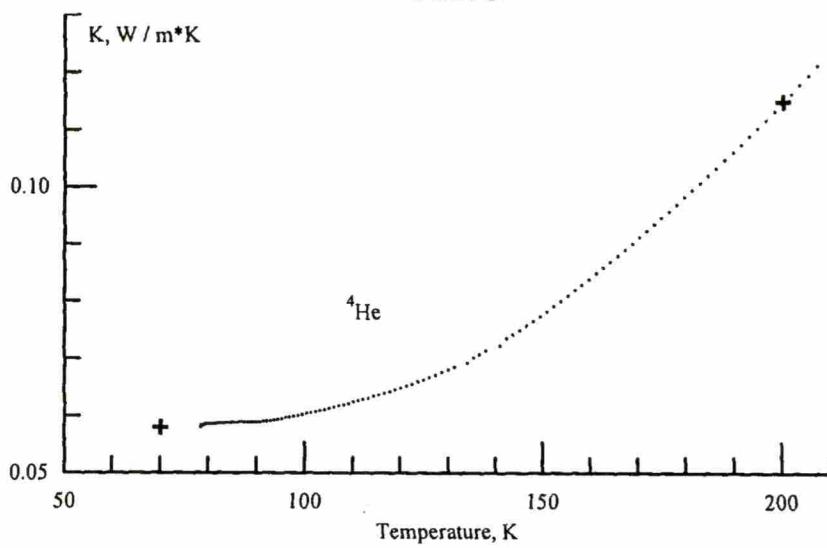


1-спай термопары, 2-клей БФ-2, 3-слой зачертнения.

Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4