

Math-Net.Ru

All Russian mathematical portal

G. V. Gurtiachenko, M. M. Mikhailov, Dynamic method
for determining the integral hemispherical coefficient A_s
and ε ,
TVT, 1975, Volume 13, Issue 5, 964–968

<https://www.mathnet.ru/eng/tvt9029>

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you have
read and agreed to these terms of use

<https://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 18.97.14.85

May 18, 2025, 19:06:13



УДК 536.24.083

ДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПОЛУСФЕРИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА A_s И ϵ

Г. В. Гуртяченко, М. М. Михайлов

Описан динамический метод определения коэффициента поглощения электромагнитного излучения A_s , излучательной способности ϵ и их отношения A_s/ϵ металлов, сплавов и пленочных покрытий. Кроме того, данным методом можно определить коэффициент вторичной электронной эмиссии и удельную теплоемкость материала. Погрешность в определении $A_s \leq 8\%$, в определении $\epsilon \leq 5\%$, в определении $c_p(T) \leq 3\%$.

В описанных ранее нестационарных методах измерения A_s и ϵ и их отношения [1—5] необходимо знать удельную теплоемкость материала. Предлагаемый метод позволяет не только обойтись без знания удельной теплоемкости материала при определении A_s и ϵ , но и при необходимости произвести измерения ее величины в интервале температур $-100 \div +200^\circ\text{C}$. Суть метода видна из рис. 1. Образец 1 находится в вакуумной камере 3 внутри охлаждаемого жидким азотом экрана 4. Образец крепится на термopарах 5, свободные концы которых через изоляторы 6 подведены к термостатируемым гермовводам 7.

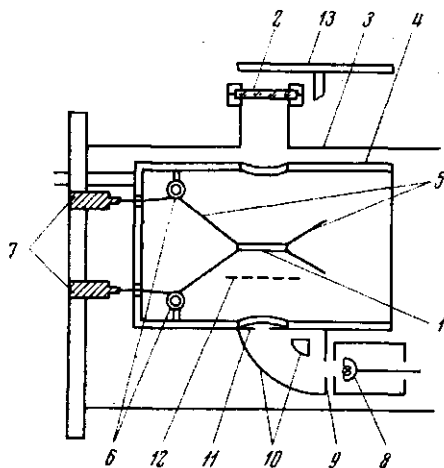


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Для нагрева образца потоком ускоренных полностью поглощаемых электронов применена электронная пушка с электростатическим дефлектором. Дефлектор изготовлен так, что входная 9 и выходная щели находятся в фокальных плоскостях, т. е. под углом 127° .

Электроны, эмиттируемые катодом 8, отклоняются полем пластин дефлектора 10 на 90° , фокусируются в фокальной плоскости выходной щели 11, далее дефокусируются и пройдя антидинаotronную сетку 12, попадают на образец. Катод находится под отрицательным потенциалом относительно образца.

Запишем уравнение теплового баланса для данного случая

$$mc_p(T) \left(\frac{dT}{d\tau} \right)_1 = I \cdot U - \epsilon_{np}(T) \sigma (T_{обр}^4 - T_{эк}^4) S_1, \tag{1}$$

где

$$\epsilon_{np}(T) = \left[\frac{1}{\epsilon(T)} + \frac{S_1}{S_{эк}} \left(\frac{1}{\epsilon_{эк}(T)} - 1 \right) \right]^{-1}, \tag{2}$$

$c_p(T)$ — удельная теплоемкость образца; m — масса образца; $T_{обp}$ — температура образца; $T_{эк}$ — температура экрана; I — ток электронов на образец; U — разность потенциалов между образцом и катодом; S_1 — полная поверхность образца; $S_{эк}$ — поверхность азотного экрана; $\varepsilon(T)$ — излучательная способность образца, $\varepsilon_{эк}(T)$ — излучательная способность экрана; σ — постоянная Стефана — Больцмана; $(dT/d\tau)_1$ — скорость нагрева образца электронной бомбардировкой.

Нагрев образца лучистым потоком осуществлялся через кварцевое окно 2, перед которым установлен прерыватель 13. Источником излучения служила лампа ДКСР-3000. Уравнение теплового баланса при нагреве образца лучистым потоком имеет вид

$$mc_p(T) (dT/d\tau)_2 = QS_2 A_s(T) - \varepsilon_{пp}(T) \sigma (T_{обp}^4 - T_{эк}^4) S_1, \quad (3)$$

где Q — поток лучистой энергии; S_2 — площадь, на которую падает лучистый поток; $(dT/d\tau)_2$ — скорость нагрева образца лучистым потоком.

При охлаждении образца имеем

$$mc_p(T) (dT/d\tau)_3 = \varepsilon_{пp}(T) \sigma (T_{обp}^4 - T_{эк}^4) S_1. \quad (4)$$

Здесь $(dT/d\tau)_3$ — скорость охлаждения образца.

Из уравнений (1), (3), (4) находим $A_s(T)$, $\varepsilon(T)$, $A_s(T)/\varepsilon(T)$

$$A_s(T) = \frac{IU}{QS_2} \left[\frac{(dT/d\tau)_2 + (dT/d\tau)_3}{(dT/d\tau)_1 + (dT/d\tau)_3} \right]. \quad (5)$$

Так как в нашем случае $S_1/S_{эк} = 4 \cdot 10^{-3}$, $\varepsilon_{эк}(T) = 0,85$, можно записать $\varepsilon_{пp}(T) \cong \varepsilon(T)$. Тогда

$$\varepsilon(T) = \frac{IU (dT/d\tau)_3}{\sigma S_1 (T_{обp}^4 - T_{эк}^4) [(dT/d\tau)_1 + (dT/d\tau)_3]}, \quad (6)$$

$$\frac{A_s(T)}{\varepsilon(T)} = \frac{S_1 \sigma [T_{обp}^4 - T_{эк}^4]}{S_2 Q} \left[\left(\frac{dT}{d\tau} \right)_2 / \left(\frac{dT}{d\tau} \right)_3 + 1 \right]. \quad (7)$$

Зная скорости изменения температур при нагреве и охлаждении образца, рассчитываем $A_s(T)$, $\varepsilon(T)$, $A_s(T)/\varepsilon(T)$ для всего диапазона температур.

Из (1) и (4) находим

$$c_p(T) = \frac{IU}{m \left[(dT/d\tau)_1 + \left(\frac{dT}{d\tau} \right)_3 \right]}. \quad (8)$$

Метод позволяет также определить ε и A_s в стационарном режиме. В этом случае мощность, подводимая к образцу при нагреве электронной бомбардировкой, подбирается такой, чтобы температура образца равнялась его стационарной температуре при нагреве лучистым потоком.

Тогда имеем

$$\varepsilon = IU / \sigma S_1 (T_{обp}^4 - T_{эк}^4), \quad (9)$$

$$A_s = IU / QS_2. \quad (10)$$

Для исследования работы пушки взят образец из алюминия и измерена зависимость тока на образце от потенциала дефлектора (рис. 2). Плато на кривой в диапазоне 1140—1180 в позволило выбрать рабочее напряжение дефлектора, равное 1160 в. Катод имеет потенциал — 520 в относительно образца.

Экспериментально показано, что облучение в течение 6 час образца электронами с энергией 520 в не приводит к изменению ε .

Для устранения влияния вторичных электронов на величину тока образца введена антидинаatronная сетка. Потенциал сетки подбирается так, что электронный поток полностью поглощается образцом.

На рис. 3 приведены зависимости тока образца и сетки от потенциала сетки и суммарного тока на образец и сетку от потенциала от них. Из кривой 3 видно, что при потенциале сетки $-200 \div +350$ в регистрируемый ток на образец имеет максимальное значение и состоит только из первичных электронов. Правая ветвь характеристики показывает, насколько ток вторичных электронов из образца I_2 меньше, чем ток первичных электронов I_1 .

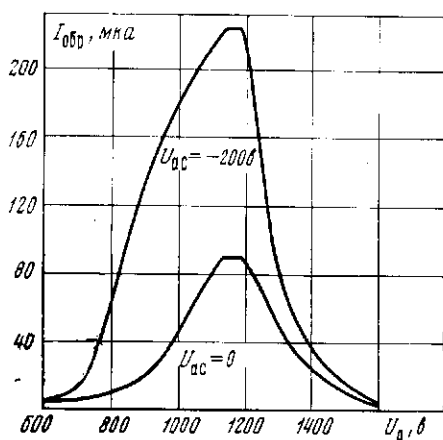


Рис. 2

Рис. 2. Зависимость тока электронов на образец от потенциала дефлектора при потенциале катода -520 в ($U_{ас}$ — потенциал антидинаatronной сетки)

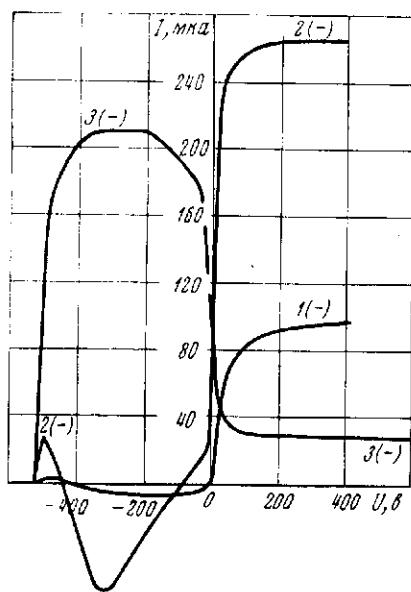


Рис. 3

Рис. 3. Зависимость тока образца и сетки от потенциала на сетке при $U_d = 1160$ в, $U_k = -520$ в:

1 — зависимость тока антидинаatronной сетки от потенциала на ней; 2 — зависимость общего тока на сетке и образце от потенциала на них; 3 — зависимость тока образца от потенциала антидинаatronной сетки

Отсюда находим коэффициент вторичной электронной эмиссии

$$\eta = (I_1 - I_2) / I_1. \quad (11)$$

В данном случае для алюминия он равен 0,86, что хорошо согласуется с данными других авторов [6].

Однако в величину тока первичных электронов на образец могут вносить свой вклад положительно заряженные частицы, покидающие образец. Для выяснения этого были сняты зависимости тока сетки от потенциала на ней (кривая 1) и суммарного тока на сетку и образец от потенциала на них (кривая 2).

Ток левой ветви характеристики 2 не может включать ток положительных частиц, покидающих образец и сетку. Следовательно, участок кривой 1 при значениях потенциала от -200 до -350 в обусловлен током вторичных электронов сетки. Ток имеет отрицательное значение, так как коэффициент вторичной электронной эмиссии материала сетки (вольфрама) больше единицы [6].

При потенциале сетки ниже -520 в и общем токе пучка 300 мкА зарегистрировать ток положительно заряженных частиц прибором со шка-

лой 0,1 мкА не удалось. Значит ток вторичных положительно заряженных частиц по крайней мере в $3 \cdot 10^3$ раза меньше тока первичных электронов и не может внести погрешность в измерение A_s и ϵ .

Из анализа характеристик были выбраны рабочие потенциалы: на дефлекторе $U_d = 1160$ в, на катоде $U_k = -520$ в, на антидинаatronной сетке $U_{ac} = -200$ в.

Образец исследуемого материала размером 15×20 мм² крепился на двух термопарах в азотном экране и помещался в вакуумную камеру. После достижения вакуума в камере $1 - 5 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст. и необходимой

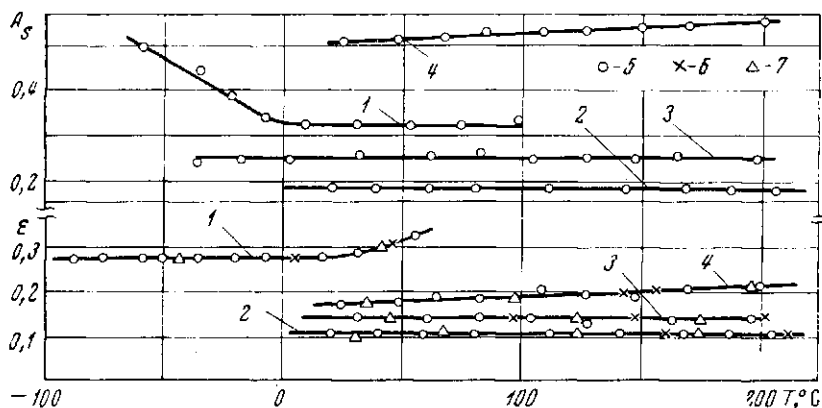


Рис. 4. Зависимость A_s и ϵ от температуры:

1 — медь окисленная, толщина пленки менее 5 мк; 2 — алюминий марки АМГ-6 в состоянии поставки; 3 — алюминий марки АМГ-6, обработанный наждачной бумагой М20 по 5 классу чистоты; 4 — титан марки ОТ-4, обработанный наждачной бумагой М20 по 5 классу чистоты; 5 — динамический метод; 6 — стационарный метод; 7 — значения $\epsilon(T)$, полученные по известным значениям $c_p(T)$

отрицательной температуры образца подавался ток накала на катод электронной пушки. Через 5—10 мин подавалось напряжение на электростатический дефлектор и ускоряющее напряжение на образец. Скорость нагрева образца электронной бомбардировкой ($dT/d\tau$), записывалась потенциометром КСП-4. При достижении необходимой температуры образца снималось ускоряющее напряжение и напряжение дефлектора, записывалась кривая охлаждения образца ($dT/d\tau$)₃.

Электронный ток на образец регистрировался потенциометром Р348 с образцовой катушкой Р321. Для питания электронной пушки использованы выпрямители ВС-26, ВС-22, ВС-23. Ускоряющее напряжение измерялось прибором С-60.

После охлаждения образца до требуемой отрицательной температуры на него воздействовали лучистым потоком, создаваемым лампой ДКСР-3000. Источником питания лампы служил выпрямитель 20-ВСС-1. Образец нагревался лучистым потоком Q до температуры, равной температуре нагрева образца электронной бомбардировкой, записывалась скорость нагрева ($dT/d\tau$)₁. Измерение величины лучистого потока производилось термостолбиком С-589.

Скорости изменения температуры образца ($dT/d\tau$)₁ для различных значений T рассчитывались на ЭВМ, экспериментальные кривые предварительно сглаживались сплайн-функциями [8].

Была произведена оценка погрешностей определения $A_s(T)$, $\epsilon(T)$, $c_p(T)$. Из анализа формулы (5) видно, что основной вклад в относительную ошибку определения A_s вносит величина Q , погрешность определения которой равна 5%.

Отношение сумм производных дает ошибку около 2%. Погрешность измерения I и U зависит от класса точности измерительных приборов, в нашем случае она не более 0,7%. Точность определения площади S_2 не хуже 0,15%. Суммарная ошибка определения $A_s(T)$ составляет 8%.

Анализируя формулу (6), находим, что погрешность определения $\epsilon(T)$ не более 5%.

Ошибка в определении $c_p(T)$ менее 3%. Ошибка определения коэффициентов в стационарном режиме несколько меньше, так как выпадают значения производных, для A_s она не более 7%, для ϵ не более 3%.

Проверка метода измерения A_s и ϵ осуществлялась на многих образцах (рис. 4). Значение ϵ получено тремя методами: динамическим, стационарным, исходя из значений $c_p(T)$, взятых из литературы [7]. Видно хорошее совпадение значений $\epsilon(T)$, полученных различными методами.

Значения $A_s(T)$, рассчитанные по уравнению (8), дают хорошее совпадение с данными других авторов [7]. Значения $A_s(T)$, измеренные динамическими и стационарными методами, совпадают.

Научно-исследовательский институт
ядерной физики, электроники и автоматики
при Томском политехническом институте
им. С. М. Кирова

Поступила в редакцию
11 VII 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. А. Новицкий. Теплофизика высоких температур, 4, № 4, 1966.
 2. Л. А. Новицкий. Теплофизика высоких температур, 6, № 3, 1968.
 3. G. D. Gordon. The Review of Scientific Instruments, 31, 11, 1204, 1960.
 4. J. William et al. Appl. Opt., 12, 1411, 1964.
 5. В. А. Осипов. Теплоэнергетика, № 4, 1958.
 6. Г. Брюнинг. Физика и применение вторичной электронной эмиссии. «Советское радио», М., 1958.
 7. Спр. Теплофизические свойства веществ (под ред. Н. Б. Варгафтика). Госэнергоиздат, 1956.
 8. В. А. Морозов. В сб. Вычислительные методы и программирование. Изд. МГУ, вып. 14, 46, 1970.
-