

Интегральная поглощательная способность диэлектрических покрытий на металлической основе в ИК-диапазоне длин волн

В.С. Виноградов, А.В. Иванов, А.А. Пальчиц, В.В. Чередов

В данной работе проведено исследование влияния толщины ряда диэлектрических покрытий, нанесенных на металлическую основу, на интегральную поглощательную способность (коэффициент теплового излучения) системы "подложка-покрытие", как целого в диапазоне длин электромагнитных волн $\lambda \div 25$ мкм.

1. Методика подготовки образцов и техника ИК-измерений

Для проведения измерений были выбраны следующие пары покрытий и подложек: двуокись титана (TiO_2) на титановой основе, окись меди (CuO) и стеариновая сажа на медной поверхности.

Окисные покрытия изготавливались путем контролируемого окисления соответствующей металлической подложки на воздухе.

В качестве материалов подложки, на которой затем формировалась окисная пленка, были использованы техническая медь М2 и титан марки ВТ4. Образцы подложки представляли собой пластины размером 40×40 мм, полированные с обеих сторон до пятого класса чистоты. Толщина медной пластины составляла 1 мм, титановой – 3 мм.

Окисление подложек проводилось в трубчатой печи на воздухе, при температурах: медной – 300°C , титановой – 500°C . Для испытаний был подготовлен ряд идентичных образцов. Первый образец являлся контрольным и окислению не подвергался. Остальные образцы окислялись в идентичных условиях, но различное время. При этом образец помещался в разогретую до требуемой температуры печь. Время нагрева образца входило в общее время экспозиции образца в печи. По окончании времени экспозиции медный образец вынимался из печи и охлаждался на воздухе при комнатной температуре, титановый – охлаждался вместе с печью. Время охлаждения в общее время экспозиции не входило.

До и после процедуры окисления каждый образец взвешивался на лабораторных аналитических весах с точностью $\pm 0,5$ мг. По разности веса образца до и после процедуры окисле-

ния определялся привес образца Δm (в мг). По величине привеса Δm определялся удельный привес $\Delta m / S$ (мг/см²), исходя из которого рассчитывалась толщина h окисной пленки, образовавшейся на окисленном образце-подложке

$$h = \alpha \frac{\Delta m}{S\rho} \quad (1)$$

где ρ – плотность окисной пленки, S – площадь образца, α – числовой коэффициент, определяемый соотношением молярных масс компонент окисла. Для медных образцов α принималось равным 2,5, для титановых – 1,25.

При расчете толщины окисной пленки предполагалось, что пленки имеют стехиометрический состав CuO и TiO₂, соответственно. В связи с тем, что реальный состав окислов на поверхности образца может отличаться от стехиометрического, полученные значения толщины окисной пленки могут иметь заметную систематическую ошибку.

Параметры образцов до и после окисления, а также результаты сопутствующих расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Материал образцов	Медь						Титан				
NN образцов	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5
Время окисления, мин	0	2	5	15	30	60	0	10	20	90	240
Удельный привес, мг/см ²	0	0,25	0,75	1,57	2,00	2,90	0	0,05	0,11	0,45	0,94
Расчетная толщина, мкм	0	1,9	5,6	11,7	15,0	21,8	0	0,3	0,7	3,0	6,1

Нанесение углерода на поверхность меди осуществлялось методом осаждения углеродной фракции пламени стеариновой горелки на холодную поверхность подложки. Толщина покрытия варьировалась временем экспозиции и оценивалась по изменению веса образца-подложки.

$$h = \frac{\Delta m}{S\rho} \quad (2)$$

где ρ – плотность углеродного покрытия, S – площадь покрытия, Δm – привес образца подложки. При оценках величины h плотность углеродного покрытия принималась равной 2 г/см².

Поглощательная способность (коэффициент теплового излучения) изготовленных образцов определялся интегрально в спектральном диапазоне длин волн 1÷25 мкм с использованием инфракрасного (ИК) измерителя температур "Кельвин-400ЛЦ". Схема измерительной установки приведена на рис. 1.

Схема установки

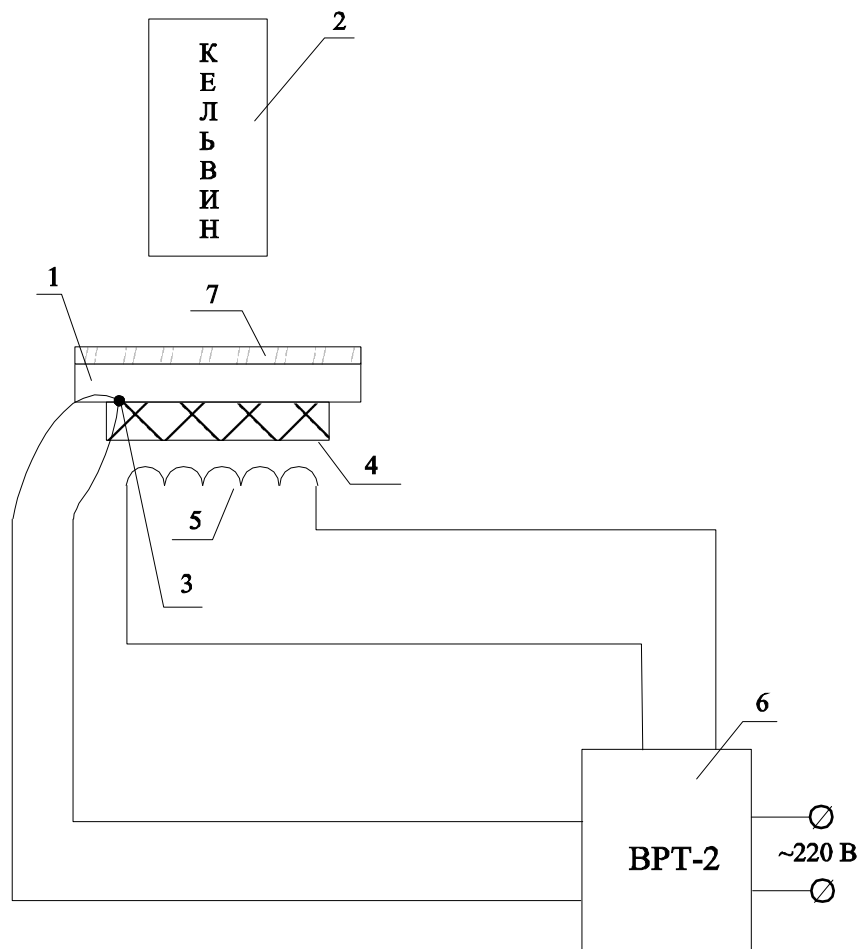


Рисунок 1.

Электромагнитное излучение с исследуемой поверхностью (1, 7), прошедшее через фокусирующую систему и модулятор измерителя температур (2), регистрировалось ИК-датчиком прибора. Электронный тракт обработки прибора позволял получать информацию в цифровом виде либо о температуре поверхности при заданном коэффициенте поглощения (степени черноты), либо о коэффициенте поглощения (степени черноты) при заданной температуре поверхности. При обработке сигнала с датчика в измерителе температур (2) использовалась модель серого тела.

Необходимая температура ($70 \div 200^\circ\text{C}$) образца обеспечивалась путем его радиационного нагрева с помощью устройства, которое представляло собой массивную металлическую поверхность (4), нагреваемую с помощью электрической спирали (5), подключаемую к силовому выходу регулятора температур ВРТ-2. Контроль температуры поверхности исследуемого образца осуществлялся с использованием хромель-алюмелиевой термопары (3), показания которой подавались на измерительный вход прибора ВРТ-2 (6).

Поглощательная способность (интегральная степень черноты) исследуемой поверхности

определялась следующим образом. В процессе измерения на шкале температур прибора "Кельвин" принудительно устанавливалась температура, показываемая термопарой, затем по шкале степени черноты делался соответствующий отсчет. Результирующее значение интегральной степени черноты определялось усреднением 7-10 независимых единичных измерений, что позволяло избежать грубых ошибок однократного измерения. Проведенный цикл тестовых измерений показал, что абсолютная ошибка измерения величины S заметно превышает аппаратную погрешность ($\pm 0,01$) и в ряде случаев может достигать $\pm 0,05$.

2. Результаты измерений и обсуждение

Результаты измерений поглотительной способности образцов представлены на рисунках 2, 3, 4. Для образцов CuO-Cu измерения проводились при температуре 94°C. Из рисунка 2 видно, что с ростом толщины покрытия происходит увеличение коэффициента серости системы CuO-Cu. Очевидно, что это увеличение может происходить лишь до определенной величины, равной коэффициенту серости собственно окиси меди. В данном эксперименте это максимальное значение S достигнуто не было. На рисунке 2 максимально возможное значение коэффициента серости бинарной системы, равное 0,65, отмечено в виде горизонтальной сплошной линии.

Излучательная способность бинарной системы
CuO-Cu в зависимости от толщины окисла

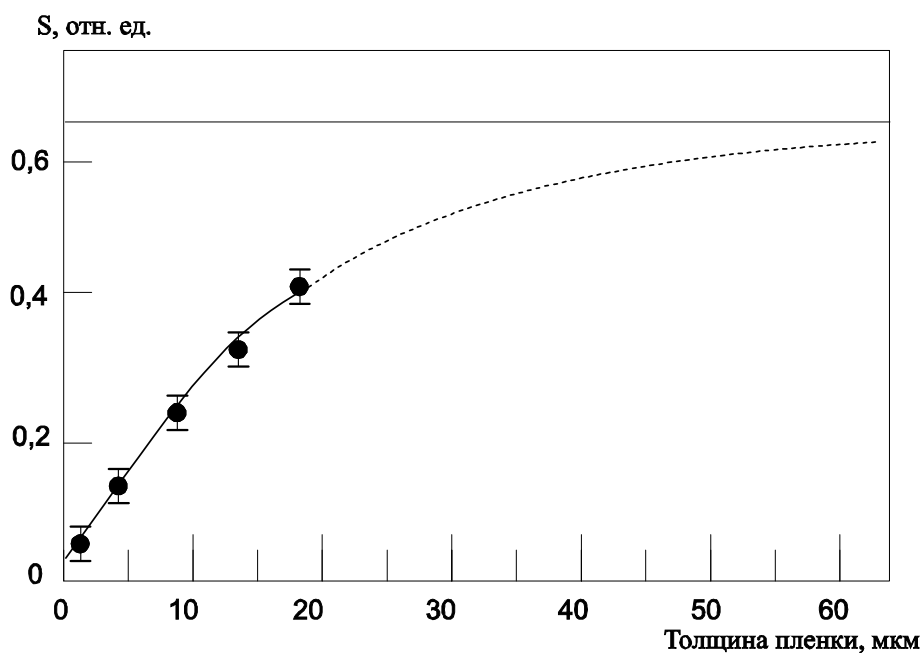


Рисунок 2.

Измерения поглотительной способности образцов TiO_2-Ti проводились при температуре

120°C. Результаты измерений представлены на рисунке 3.

Излучательная способность бинарной системы

TiO₂-Ti в зависимости от толщины окисла

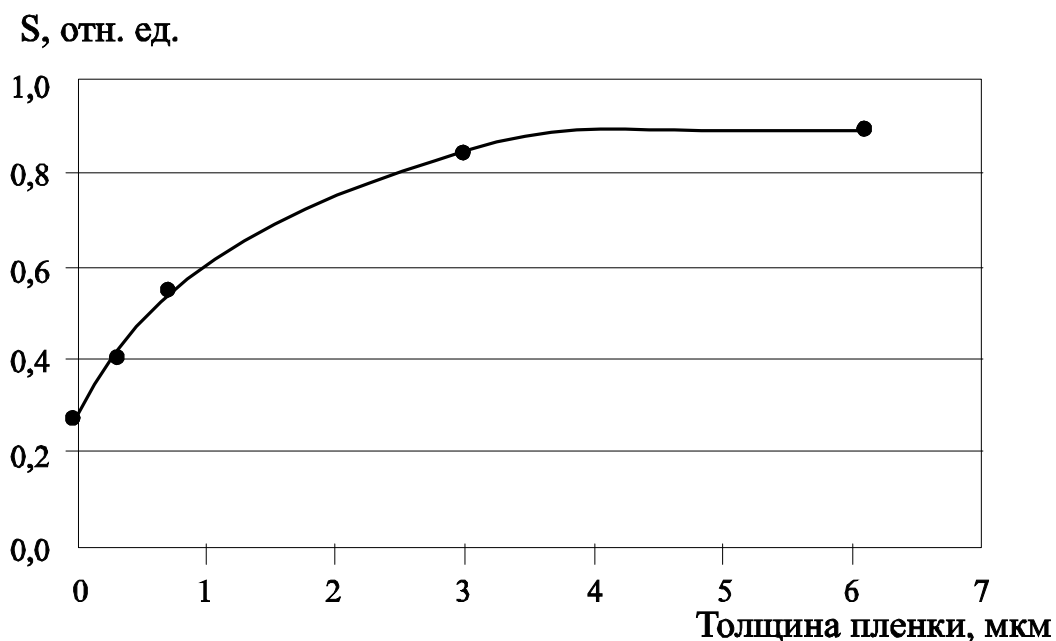


Рисунок 3.

Поглощательная способность (коэффициент серости) системы увеличивается от значения $S=0,27$, характерного для полированного титана, до, примерно, $0,9$. Последняя величина показывает, что оптические свойства системы в диапазоне длин волн ИК-излучения 1-25 мкм практически полностью определяются свойствами покрытия (TiO₂) при толщинах более 3 мкм.

Результаты измерения коэффициентов серости образцов системы С-Си в зависимости от толщины покрытия представлены на рисунке 4.

Излучательная способность бинарной системы

С-Си в зависимости от толщины окисла

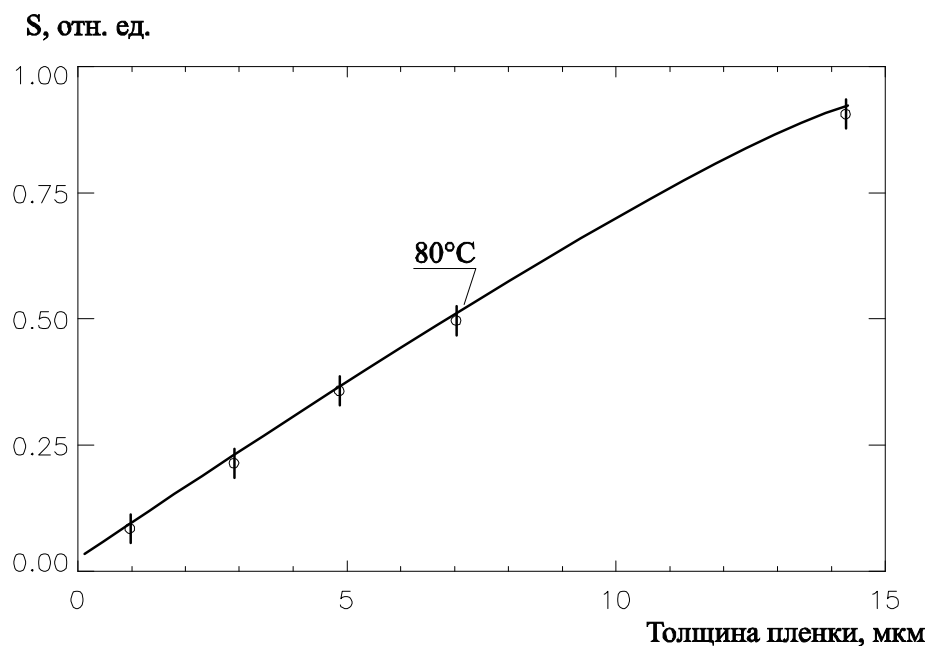


Рисунок 4.

Измерения проводились при температуре 80°C. Характер полученной зависимости такой же как и на рисунках 2 и 3. Насыщение коэффициента серости с ростом толщины покрытия достигнуто не было. Однако предельная величина S для стеариновой сажи известна [1] и составляет 0,92-0,96.

Сопоставление результатов для всех исследованных систем (рис. 2, 3, 4) показывает, что наиболее высокий линейный коэффициент поглощения ИК-излучения проявляет TiO_2 -покрытие. Для покрытий из сажи и CuO "насыщение" поглощательной способности происходит при значительно больших толщинах покрытия, чем у TiO_2 : TiO_2 – 3 мкм, CuO – 50 мкм, сажа – более 15 мкм. Это, по-видимому, свидетельствует о более высокой проводимости титанового окисла.

В целом проведенные измерения показывают, что диэлектрические покрытия с интегральной степенью черноты, близкой к единице, могут заметно повлиять на интенсивность теплового излучения металлической поверхности.

Используем основные положения оптики для анализа полученных результатов.

Интенсивность излучения подложки I_m прошедшего через слой покрытия толщиной d , можно вычислить в соответствии с законом Бюргера-Ламберта [2]

$$I_m(d) = I_s \exp(-\mu_{эфф} d) \quad (3)$$

где $\mu_{эфф}$ – эффективный линейный коэффициент ослабления излучения в ИК-диапазоне длин волн, I_s – интенсивность излучения материала подложки при соответствующей температуре в ИК-диапазоне длин волн.

Интенсивность излучения, сформированного всей системой (подложка-покрытие), можно

представить как сумму двух потоков – I_m , пришедшего от подложки, через покрытие, и собственного излучения покрытия I_n

$$I(d) = I_m(d) + I_n(d) \quad (4)$$

Предполагая модель серого тела как для материала покрытия, так и для материала подложки, указанные потоки можно оценить в соответствии с выражениями

$$I_n = s_n (1 - \exp(-\mu_{эфф} d)) I_0 \quad (5)$$

$$I_m = s_m \exp(-\mu_{эфф} d) I_0 + \Theta(d, s_m - s_n) I_0 \quad (6)$$

где s_m и s_n – коэффициенты серости материала подложки и покрытия в ИК-диапазоне длин волн, соответственно, I_0 – интенсивность излучения абсолютно черного тела при соответствующей температуре в ИК-диапазоне длин волн, $\Theta(d, s_m - s_n)$ – корректирующая функция, учитывающая различие в оптических характеристиках материалов подложки и покрытия. Очевидно, что, если коэффициенты серости материалов покрытия и подложки одинаковы $s = s_m = s_n$, то корректирующая функция равняется нулю. Действительно, в этом случае суммарный тепловой поток от системы

$$I = s(1 - \exp(-\mu_{эфф} d)) + s \exp(-\mu_{эфф} d) = s I_0 \quad (7)$$

что соответствует модели серого тела.

Граничные условия для корректирующей функции очевидны

$$\Theta(0, s_m - s_n) = \Theta(\infty, s_m - s_n) = 0 \quad (8)$$

Используя соотношения (4)-(6), можно получить, что

$$I(d) = (s_n - (s_m - s_n) \exp(-\mu_{эфф} d) + \Theta(d, s_m - s_n)) I_0 \quad (9)$$

где выражение во внешних круглых скобках можно рассматривать как эффективное значение коэффициента серости бинарной системы подложка-покрытие

$$s_{эфф} = s_n - (s_m - s_n) \exp(-\mu_{эфф} d) + \Theta(d, s_m - s_n) \quad (10)$$

При больших $d \gg 1/\mu_{эфф}$ получаем $s_{эфф} = s_n$, то есть наблюдаем полное экранирование излучения подложки. Излучательная способность системы в этом случае определяется только оптическими свойствами покрытия.

При малых $d \ll 1/\mu_{эфф}$ экспонента оказывается близкой к единице, а $s_{эфф}$ приближается к значению s_m , то есть излучение подложки "не замечает" покрытия, при этом излучательные характеристики системы определяются оптическими свойствами подложки.

Формула (10) позволяет по экспериментальному значению $s_{эфф}$ и известному из других источников значению $\mu_{эфф}$ рассчитать корректирующую функцию Θ , либо наоборот при известной функции Θ оценить значения $\mu_{эфф}$ для соответствующего материала покрытия.

Расчет корректирующей функции Θ является достаточно сложной задачей и в данной работе не проводился. Значения $\mu_{эфф}$ для исследуемых диапазонов длин волн и материалов покрытий в опубликованных источниках обнаружить не удалось. В этой связи по формуле (10) проведен расчет $\mu_{эфф}$ в предположении, что функция $\Theta = 0$. Результаты расчетов представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Материал покрытия	Материал подложки	Эффективный коэффициент линейного поглощения, мкм^{-1}	Диапазон длин волн, мкм
CuO	Cu	0,024	1-25
TiO ₂	Ti	0,4	1-25
Сажа (С)	Cu	0,06	1-25

Расчетные зависимости $s_{эфф}(d)$ представлены на рисунках 2, 3, 4, откуда видно хорошее согласие экспериментальных и расчетных данных. Последнее свидетельствует о том, что модель, используемая для определения зависимости поглощательной способности системы типа "подложка-покрытие" от толщины слоя, вполне пригодна для описания оптических свойств системы с тонким диэлектрическим покрытием.

Список литературы

- [1] Кикоин А.А. Таблицы физических величин. Справочник – М.: Энергоатомиздат, 1993. - 827 с.
- [2] А.М. Кольчужкин, В.В. Учайкин. Введение в теорию прохождения частиц через вещество. – М.: Атомиздат, 1978. – 342 с.