

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПРОПУСКАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ ТОНКИМИ МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ПЛЕНКАМИ В ДИАПАЗОНЕ
0,3 + 8 ММ

Е. А. Виноградов, В. И. Голованов

УДК 539.216.2

Экспериментально показано, что коэффициенты пропускания T тонких пленок из металлов с высокой проводимостью: Pu , Al , Ni , Au и величиной поверхностного сопротивления R_s от 4 до $\sim 10^4$ Ом (соответствующие T от 0,05% до 95%) в диапазоне длин волн от 0,3 до 8 мм не зависят от частоты в пределах точности эксперимента ($\sim 2,0\%$).

Из электромагнитной теории следует /1,2/, что для сплошной металлической пленки с толщиной значительно меньшей скин-слоя коэффициенты пропускания, отражения и поглощения не зависят от частоты (вплоть до длин волн порядка десятков микрон) и определяются величиной поверхностного сопротивления R_s или проводимости. Для реальных тонких металлических пленок, обладающих дискретной структурой, экспериментальные результаты носят противоречивый характер: В СВЧ диапазоне проводимость пленок в одних случаях может увеличиваться в несколько раз по сравнению с проводимостью на постоянном токе /3/, в других случаях она не изменяется /4/. В ИК диапазоне (от 20 до 90 мкм) исследования пленок металлов с хорошей проводимостью показывают как монотонное уменьшение коэффициента пропускания на десятки процентов с ростом частоты, так и независимость от частоты /1/. Зависимость от частоты параметров дискретных пленок может быть объяснена возникновением дополнительных механизмов проводимости и проявлением емкостного, туннельного, релаксационного и др. эффектов /5,6/.

Подобные исследования в промежуточной области - миллиметро-

вом и субмиллиметровом диапазонах, по-видимому, проводились только в работе /7/. Такие исследования представляют интерес в связи с практическим применением тонких металлических пленок. С этой целью на автоматизированном квазиоптическом монохроматическом ЛЮВ-спектрометре были проведены с высокой точностью ($\sim 2,0\%$) измерения коэффициента пропускания (по мощности) электромагнитного излучения тонкими металлическими пленками в диапазоне $0,3 \pm 8$ мм.

Пленки были изготовлены термическим испарением металлов с высокой проводимостью: алюминия, никеля, золота, палладия в вакууме не хуже 10^{-5} торр на лавсановые подложки толщиной 7 мкм. Одна из пленок палладия (Pa I) была осаждена на подложке из полиэтилена толщиной 43 мкм. К металлическим пленкам предъявлялись высокие требования однородности коэффициента пропускания ($\Delta T \sim 1\%$) по поверхности в пределах диаметра пучка излучения (~ 50 мм). Измерения проводились в ограниченных интервалах диапазона: $0,31-0,32$; $3,1-3,2$; $7,8-8$ мм. Каждый интервал с равномерным шагом по частоте разбивался на 50 точек, и вычислялось среднее арифметическое коэффициентов пропускания во всех точках интервала. В качестве приемника использовался неселективный оптикоакустический приемник ОАП-5М с динамическим диапазоном 10^5 при полосе 1 Гц и нелинейности 3%. Увеличение времени накопления результатов измерения позволило увеличить динамический диапазон до 10^6 .

Измеренные коэффициенты пропускания на длине волны $\lambda = 3$ мм были равны для лавсана $T_{\text{Л}} = 100\%$ и полиэтилена $T_{\text{П}} = 99,9\%$; на $\lambda = 0,32$ мм — $T_{\text{Л}} = 97,1\%$ и $T_{\text{П}} = 84\%$. Из этих измерений следует, что влияние подложки необходимо учитывать в коротковолновой части диапазона. Коэффициент пропускания системы металлическая пленка — подложка можно вычислить по формуле (14) из работы /8/, которая для малопоглощающей подложки ($k \ll 1$) толщиной a имеет вид:

$$T = 4n^2(n^2 C \cos^2 \beta d + B^2 \sin^2 \beta d + 2n \alpha C + 2k \alpha \sin \beta d \cos \beta d)^{-1}, \quad (1)$$

где

$$A = C(n^2 - 1 - f), \quad B = 1 + f + n^2, \quad C = 2 + f, \quad \alpha = 2\pi k/\lambda,$$

$$\beta = 2\pi n/\lambda, \quad f = W/R_2, \quad W = 377 \text{ Ом.}$$

Для длинноволнового излучения систему можно рассматривать с большой точностью как одиночную металлическую пленку, для которой при известном R_s коэффициент пропускания определится из выражения

$$T_{CB} = 4/(r + 2)^2. \quad (2)$$

Для практических расчетов по формуле (I) в коротковолновой части субмиллиметрового диапазона были измерены коэффициенты преломления лавсана $1,77 \pm 0,02$, полиэтилена $1,55 \pm 0,02$ и коэффициент поглощения лавсана $k = 0,012 \pm 0,006$. Коэффициент поглощения полиэтилена был по крайней мере на порядок меньше, чем у лавсана.

В таблице приведены экспериментальные результаты измерений коэффициента пропускания T_0 и рассчитанные величины R_s . Чтобы исключить влияние подложки на измерения T_0 на длине волны $\lambda = 0,32$ мм, величина R_s определялась из формулы (I) путем подбо-

Таблица I.

$\lambda, \text{мм}$	$T_0, \%$			$T_{CB}, \%$	$R_s, \text{Ом}$			$\left(\frac{T_{CB}-T_0}{T_{CB}}\right)_{\text{max}} \%$
	8	3	0,32	0,32	8	3	0,32	
Pa 1		95,28	81,38	95,5		7703	8094	0,23
Pa 2	88,78	89,98	86,7	88,7	3075	3477	3051	1,4
Pa 3		82,05	81,2	82,8		1821	1905	0,9
Pa 4		58,25	57,34	57,7		607,6	596	0,94
Al 1	56,8	57,9	57,2	57,6	576	600	594	1,9
Al 2	53,3	52,3	53,1	53,3	509,8	492	510	1,88
Al 3	23,65	24,09	23,9	23,6	178,5	181,7	178	2
Al 4		3,49	3,62	3,49		43,28	43,35	0
Ni 1		12,16	12,3	12,04		100,9	100	0,99
Ni 2	11,64	11,85	12,02	11,7	97,6	98,95	98,2	1,35
Au		0,050	0,0515	0,0491		4,3	4,26	1,8

ра безразмерного параметра $f = W/R_g$. Из найденной таким образом величины R_g "свободной" (без подложки) металлической пленки по формуле (2) рассчитывалась величина T_{CB} .

Из таблицы видно, что в пределах точности эксперимента ($\sim 2\%$) величины коэффициентов пропускания пленок, измеренные в 2-х и в 3-х точках диапазона $0,3 \pm 8$ мм совпадают. Повторные, с интервалом в год, измерения пленок палладия и никеля показали хорошую их стабильность во времени (с точностью 2%). Для пленок алюминия провести повторное измерение не удалось, т.к. одновременно со значительным изменением величины T ухудшилась однородность пленок по поверхности.

Пленка палладия (Pa 3) была подвергнута нагреву до температуры 150°C в течение 30 мин в вакууме 10^{-4} торр. После нагрева эта пленка (Pa 4) уменьшила величины T и R_g , что говорит об изменении структуры пленки, но зависимости от частоты T и R_g обнаружено не было.

Характер зависимости между коэффициентами T , R и R_g приводит к тому, что для очень тонких пленок ($T \geq 90\%$) определение T с точностью 1% позволяет определить R_g с точностью не более 10% , а R — не более 20% , поэтому для увеличения точности определения величины R_g предпочтительнее измерять коэффициент отражения R .

Таким образом, результаты проведенных исследований показали, что выводы работы /7/ о действительности импеданса пленок металлов с высокой проводимостью и толщиной меньшей скин-слоя в диапазоне 1 ± 2 мм справедливы и в более широком диапазоне длин волн — субмиллиметровом и миллиметровом. Полученные результаты имеют важное значение для создания элементов и устройств (боллометров, аттенкуаторов и т.д.) с высоким постоянством и прецизионной точностью характеристик в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне.

Поступила в редакцию
6 июля 1983 г.

Л и т е р а т у р а

1. W. Woltersdorff, Z. Physik, 91, 230 (1934).
2. А. Е. Каплан, РИЭ, 9, № 10, 1781 (1964).
3. В. И. Валокенас и др., Литовск. физ. сб. УІІ, № 4, 603 (1968).

4. В. Л. Ивашка и др., Литовск. физ. сб. У, № 3, 385 (1970).
5. L. Nagis, A. L. Loeb, J. O. S. A., 45, 3, 179 (1955).
6. Технология тонких пленок, Справ. в 2 т., "Сов. радио", М., 1977 г.
7. Е. А. Виноградов и др., Краткие сообщения по физике ФИАН, № 12, 53 (1981).
8. В. В. Гаврилин и др., Изв. АН Лат. ССР, сер. физ. тех. наук, № 4, 70 (1976).