

ОТРАЖЕНИЕ ОТ ТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ
ПЛЕНОК ПРИ $\lambda \sim 1$ ММ

Е. А. Виноградов, В. И. Голованов, Н. А. Ирисова,
А. Б. Латышев

УДК 539.216.2

Измерены фазы и амплитуды коэффициентов отражения тонких металлических пленок при $\lambda \sim 1$ мм. Зависимости коэффициентов отражения от угла падения и направления поляризации совпали с теоретическими соотношениями, полученными ранее импедансным методом. Величины импедансов пленок, определенные из независимых измерений отражения и пропускания, оказались равными и вещественными.

В работе /1/ было проведено экспериментальное исследование зависимостей от угла падения θ и поляризации энергетических коэффициентов пропускания T тонких металлических пленок, применяемых в качестве поглотителей в тепловых приемниках СВЧ и ИК диапазонов. Было показано, что на длине волны $\lambda \sim 1 \div 2$ мм все явления, связанные с пропусканием такой пленкой излучения при углах падения $\pm 70^\circ$, с точностью до единиц процентов могут быть описаны через один параметр — импеданс пленки Z (который для всех пленок оказался вещественным) при помощи формул, полученных в /2/:

$$T_{\parallel} = \left| \frac{2Z}{W \cos \theta + 2Z} \right|^2, \quad T_{\perp} = \left| \frac{2Z \cos \theta}{W + 2Z \cos \theta} \right|^2, \quad (1)$$

где W — волновое сопротивление среды (для воздуха $W \approx 377$ Ом), а значки \parallel и \perp соответствуют ТМ и ТЕ поляризациям излучения.

Выражения (1) были получены в /2/ на основании предположения об "электродинамической тонкости" рассматриваемых пленок, т.е. о малости отличия тангенциальных компонент напряженностей электрического поля на противоположных поверхностях пленки. Следствием этого предположения является также то, что и отражение излучения от таких пленок можно описать через тот же самый импеданс Z выражениями:

$$R_{\parallel} = \left| \frac{W \cos \theta}{W \cos \theta + 2Z} \right|^2, \quad R_{\perp} = \left| \frac{W}{W + 2Z \cos \theta} \right|^2, \quad (2)$$

где W - энергетический коэффициент отражения пленки.

Целью настоящей работы является экспериментальная проверка справедливости соотношений (2), что фактически эквивалентно непосредственной проверке выполнимости условия "электродинамической тонкости" исследуемых пленок.

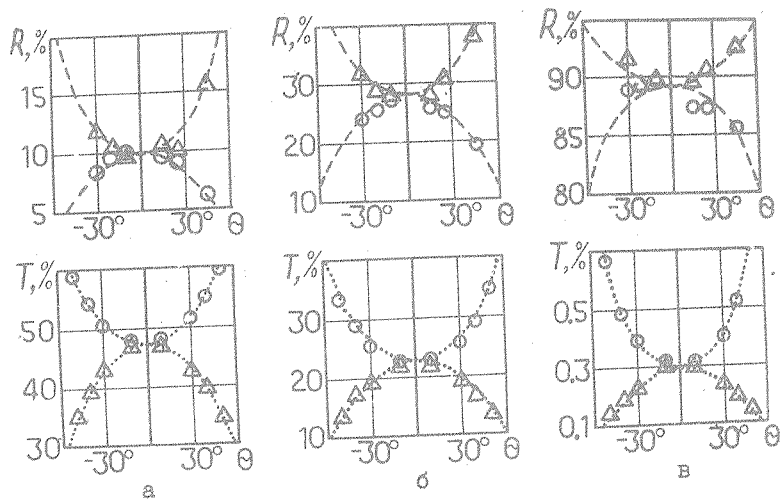
При $\lambda = 1$ мм были проведены измерения амплитуд и фаз коэффициентов отражения и пропускания пяти различных алюминиевых пленок при разных углах падения ($-50^\circ \leq \theta \leq +50^\circ$) и поляризациях. Пленки были изготовлены вакуумным напылением металла на лавсановые подложки толщиной ~ 10 мкм. При проведении экспериментов на отражение с целью уменьшения влияния подложки на результат измерений пленку всегда размещали так, чтобы металлизированная сторона подложки была обращена к источнику излучения.

Измерения пропускания проводились по методике /1/. Величины измеренных энергетических коэффициентов пропускания пленок, приведенные к нормальному падению, лежали в широких пределах от 0,3% до 47%.

Измерения отражения были выполнены при помощи двух различных квазиоптических схем. Первая позволяла измерять при фиксированном угле падения $\theta = 45^\circ$ и фазу, и амплитуду коэффициента отражения как в ТЕ, так и в ТМ поляризациях. Вторая обеспечивала лишь амплитудные измерения коэффициента отражения, однако при широких изменениях угла падения от $+25^\circ$ до -30° при обеих поляризациях.

Измерения показали, что фазы коэффициентов отражения и пропускания отличаются от нуля не более, чем на 4° , что находится

на уровне экспериментальной погрешности. Таким образом, характеристические импедансы Z всех исследованных пленок можно считать вещественными. Проведенные амплитудные измерения показали, что для каждой пленки можно определить всего один параметр — импеданс Z , такой, что с относительной точностью не хуже единиц процентов зависимости как коэффициентов пропускания T , так и коэффициентов отражения R пленок от угла падения и поляризации описываются формулами (1) и (2).



Р и с. I. Некоторые результаты измерений зависимости энергетических коэффициентов отражения R и пропускания T от угла падения θ для различных алюминиевых пленок и теоретические кривые, рассчитанные по формулам (1) и (2): Δ — экспериментальные данные при ТЕ поляризации (R_{\perp} и T_{\perp}); \circ — экспериментальные данные при ТМ поляризации (R_{\parallel} и T_{\parallel}); - - - - - кривые рассчитанные по формулам (2) при $Z = Z_t$, т.е. по усредненным данным "на пропускание"; — кривые, рассчитанные по формулам (1) при $Z = Z_r$, т.е. по усредненным данным "на отражение";
 а) $Z_t = 411,9$ Ом, $Z_r = 411,7$ Ом, $R_{\square} = 625$ Ом; б) $Z_t = 169$ Ом, $Z_r = 173$ Ом, $R_{\square} = 310$ Ом; в) $Z_t = 11,1$ Ом, $Z_r = 11,0$ Ом, $R_{\square} = 11,3$ Ом

Характерный вид полученных зависимостей энергетических коэффициентов отражения R и пропускания T от угла падения θ и поляризации приведен на рис. I. Обратим внимание, что на рисунке экспериментальные данные "на отражение" совмещены с теоретическими кривыми (2), вычисленными при $Z = Z_0$, т.е. при импедансах, определенных из экспериментальных данных "на пропускание". Экспериментальные данные "на пропускание" напротив совмещены с теоретическими кривыми (1), рассчитанными для импедансов $Z = Z_0$, полученных из экспериментов на отражение. Таким образом при построении теоретических кривых (рис. I) была намеренно исключена информация, соответствующая экспериментальным данным, с которыми эти кривые совмещены. Как видно из рисунка, даже в этом случае относительное отклонение результатов измерений от теоретических кривых не превышает единиц процентов.

Таким образом можно сделать вывод, что металлические пленки с энергетическими коэффициентами пропускания T от 0,3% до 50% (соответствующие отражение R от 10% до 90% и поглощение G от 10% до 50%) при умеренных углах падения ($|\theta| \leq 45^\circ - 70^\circ$) являются электродинамически тонкими. Каждую из них с большой точностью электродинамически можно охарактеризовать одним параметром - импедансом Z , который для всех исследованных пленок оказался вещественным.

Для всех пленок кроме того были выполнены измерения их сопротивлений R_{\square} на постоянном токе ^{*)}. Сравнение измеренных величин R_{\square} с импедансами Z при $\lambda \approx 1$ мм показало, что, как и в /1/, всегда $R_{\square} > Z$. Отношение R_{\square}/Z лежало в пределах от $1,05 \pm 0,2$ до $2,17 \pm 0,4$ и было как правило тем больше, чем выше пропускание соответствующей пленки.

Для выяснения вопросов о верхней частотной границе применимости импедансного подхода и наличии зависимостей от частоты вещественных и, возможно, мнимых частей импедансов пленок необходимы дальнейшие эксперименты.

Поступила в редакцию
16 апреля 1982 г.

^{*)} Измерения проведены четырехзондовым методом.

Л и т е р а т у р а .

1. Е. А. Виноградов и др., Краткие сообщения по физике ФИАН
№ 12, 53 (1981).
2. Н. А. Ирисова, А. Б. Латышев, Препринт ФИАН № 232, М., 1981 г.