

ПРОПУСКАНИЕ ТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК
В ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН $1 - 2$ ММ

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

УДК 539.216.2

Исследована зависимость коэффициента пропускания тонких металлических пленок в диапазоне длин волн $1 - 2$ мм от угла падения и поляризации. Найдены аналитические выражения для полных зависимостей.

В диапазоне длин волн $\lambda \sim 1 - 2$ мм квазиоптическим методом были исследованы зависимости коэффициентов пропускания T (по мощности) тонких металлических пленок от угла падения θ и поляризации. Измерения были выполнены для 30 пленок из пяти различных металлов: Au, Ag, Al, Cu, Ni. Пленки были нанесены методом вакуумного напыления ($p \sim 10^{-5}$ тор) на лавсановую подложку толщиной $d \sim 10$ мкм, натянутую в плоских пальцах диаметром 200 мм. Пленки имели различные величины коэффициентов пропускания, составлявшие от 0,27% до 80% при нормальном падении. Диаметр квазиоптического пучка излучения миллиметрового диапазона в измерительном тракте был 30 мм, что определяло дифракционную неопределенность угла падения $\Delta\theta \sim 3^\circ$. Относительная аппаратная погрешность измерения коэффициента пропускания $\Delta T/T$ составляла $\sim 2\%$. Дополнительную погрешность в результате эксперимента вносило несовершенство изучаемых пленок. Их макроскопическая (характерные размеры ~ 30 мм) относительная неоднородность по коэффициенту пропускания была в основном в пределах 10%, доходя иногда до 30%.

Измерения показали, что величина коэффициента пропускания T всех пленок сильно зависит от угла падения и от поляризации,

при этом вид этих зависимостей одинаков для пленок различных материалов (см. рис. 1). Полученные экспериментальные данные хорошо аппроксимируются предложенными нами аналитическими выражениями вида:

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

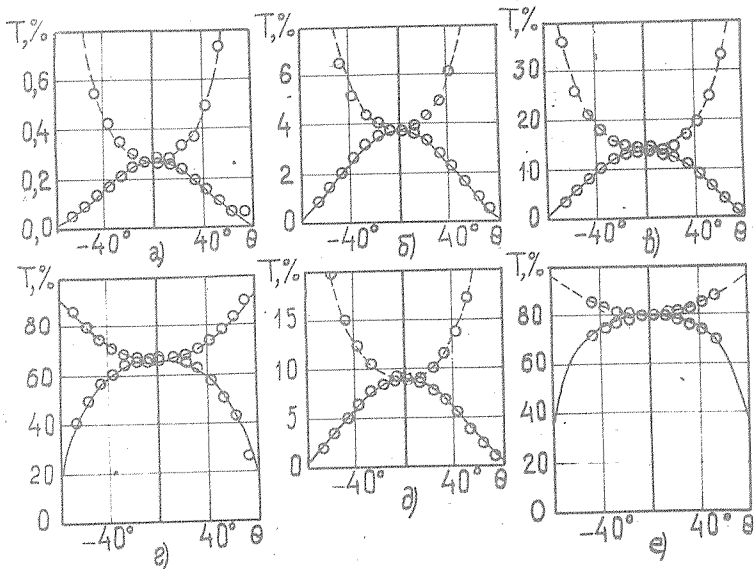
$$T_{\parallel} = \left| \frac{2R_t}{W \cos \theta + 2R_t} \right|^2, \quad (2)$$

где T_{\perp} — коэффициент пропускания пленки по мощности при ТЕ поляризации, T_{\parallel} — коэффициент пропускания при ТМ поляризации, θ — угол падения, W — размерная константа, равная 377 Ом, а R_t — параметр пленки, имеющий размерность сопротивления, который мы будем называть ее характеристическим сопротивлением. Сопротивление R_t , в общем случае комплексное, можно вычислить с точностью до знака мнимой части в соответствии с выражениями (1) и (2) по двум или более измеренным коэффициентам пропускания при разных углах падения или поляризациях. Оказалось, что в пределах точности эксперимента характеристические сопротивления R_t всех исследованных пленок можно считать действительными. Сплошные кривые на рис. 1 соответствуют выражению (1), а штриховые — выражению (2) с одним и тем же действительным значением параметра R_t . Проведенные нами независимые измерения фазы коэффициента пропускания подтвердили, что сопротивление R_t рассматриваемых пленок существенно действительная величина.

Измерения пленок выполнены в диапазоне длин волн $1,24 \text{ мм} \leq \lambda \leq 1,64 \text{ мм}$. При этом отклонение экспериментальных данных от выражений (1) и (2) в предположении, что R_t не зависит от частоты, не превышало допустимых погрешностей.

Выражения, близкие к (1) и (2), были ранее приведены в работе /1/, однако в них вместо параметра R_t фигурировал параметр R_{\square} , равный сопротивлению квадрата произвольного размера пленки постоянному току *).

* Введенному нами параметру R_t можно приписать физический смысл сопротивления квадрата данной пленки на частоте падающей волны, т.е. в диапазоне $\lambda = 1 - 2 \text{ мм}$.



Р и с. 1. Угловые зависимости коэффициентов пропускания (по мощности) металлических пленок при ТЕ и ТМ поляризациях: о — результаты экспериментов на длине волны $\lambda = 1,24$ мм; расчет по формуле (1) — сплошные линии; по формуле (2) — штриховые линии; а) Al; $R_{\square} = 17$ Ом; $R_{\perp} = 10,3$ Ом; б) Al; $R_{\square} = 1050$ Ом; $R_{\perp} = 45,3$ Ом; в) Ni; $R_{\square} = 130$ Ом; $R_{\perp} = 113$ Ом; г) Ni; $R_{\square} = 1200$ Ом; $R_{\perp} = 816$ Ом; д) Au; $R_{\square} = 88$ Ом; $R_{\perp} = 81$ Ом; е) Cu; $R_{\square} = 2700$ Ом; $R_{\perp} = 1600$ Ом

Нами были измерены на постоянном токе для всех 30 пленок величины R_{\square} по методике, описанной в работе /1/. Сравнение значений параметров R_{\square} и R_{\perp} показало, что в общем случае они не равны друг другу. Величина отличия R_{\square} от R_{\perp} зависела от материала и прозрачности пленки, а также от технологии ее изготовления, но во всех случаях R_{\square} было не меньше, чем R_{\perp} . Что касается верхней границы отношения R_{\square}/R_{\perp} , то для золота R_{\square} превосходило R_{\perp} не более, чем в 1,2 раза, для серебра, меди и никеля — не более, чем в 2,5 раза, а для алюминия отношение

R_{\square}/R_t доходило до 23. Для серебра, меди и алюминия была замечена тенденция к уменьшению отношения R_{\square}/R_t по мере уменьшения прозрачности пленки.

Таким образом, в данной работе показано, что при $\lambda \sim 1$ мм зависимость коэффициентов пропускания тонких металлических пленок от угла падения и поляризации в общем случае нельзя описать с помощью сопротивления той же пленки постоянному току R_{\square} , как это сделано в работе /1/. В то же время эти зависимости можно описать с помощью другого параметра R_t , тоже имеющего размерность сопротивления, который практически не зависит от частоты в диапазоне $\lambda = 1 - 2$ мм. Сопротивление R_t реальных пленок оказалось существенно действительным, ввиду чего для определения в соответствии с выражениями (1) и (2) достаточно всего одного измерения коэффициента пропускания пленки при произвольном угле падения и поляризации.

В заключение авторы выражают благодарность Г. В. Козлову за предоставленную возможность измерений на ЛЮВ-спектрометре, а также А. А. Волкову, С. П. Лебедеву и В. И. Мальцеву за помощь при проведении эксперимента.

Поступила в редакцию
8 июля 1981 г.

Л и т е р а т у р а

Г. В. В. Слуцкая, Тонкие пленки в технике СВЧ, Гостехиздат, М-Д, 1962 г.