

О ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТОЛЩИНЕ ПРОВОДЯЩИХ ПЛЕНОК,  
ОПИСЫВАЕМЫХ ИМПЕДАНСНОЙ МОДЕЛЬЮ

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

УДК 539.216.2

Экспериментально показано, что при  $\lambda \sim 1 - 2$  мм геометрическая толщина неоднородных металлических пленок, описываемых импедансной моделью, может достигать десятков микрон, что на несколько порядков превышает оценки толщины аналогичных пленок, сделанные в предположении их однородности по толщине.

Известно, что электродинамические свойства некоторых тонких электропроводящих пленок в ИК-СВЧ диапазонах можно аналитически описывать при помощи импедансной модели /1-4/. В этом случае реальная пленка уподобляется плоскости нулевой толщины, не вносящей разрыва в тангенциальную компоненту электрического поля, но обуславливающей разрыв тангенциальной компоненты магнитного поля волны, величина которого определяется импедансом пленки  $Z$ . Будем в дальнейшем называть пленки, описываемые импедансной моделью, электродинамически тонкими. В работах /5-7/ нами экспериментально показано, что при длинах волн  $\lambda \sim 1$  мм пленки многих металлов, полученные вакуумным напылением на лавсановую подложку и имеющие энергетическое пропускание  $\tau > 10^{-3}$ , являются электродинамически тонкими.

Часто задается вопрос: каковы геометрические толщины тонких металлических пленок? Этот вопрос возникает при попытках определения геометрической толщины  $d$  пленок путем зондирования излучением ИК-СВЧ диапазонов, а также при попытках использования толщины пленки, измеренной каким-либо иным способом, в качестве критерия применимости к ней импедансной модели /8/. Например, в работах /9-11/ пленку рассматривали как плоско-

параллельный однородный по толщине<sup>\*)</sup> слой проводящего вещества с известными параметрами, имеющий толщину  $d$ , много меньшую скин-слоя (при  $\lambda \sim 1$  мм  $d \ll 0,1$  мкм). При этих условиях энергетическим пропусканиям  $T$ , лежащим в пределах от единиц до десятков процентов, соответствуют толщины металла от долей до сотни ангстрем.

В настоящей работе экспериментально показано, что существуют электродинамически тонкие, неоднородные по толщине проводящие пленки, с геометрической толщиной, много большей скин-слоя при данной частоте. По методике работ /5-7/ были определены при  $\lambda \sim 1 - 2$  мм коэффициенты пропускания и отражения пленок, полученных вакуумным напылением различных металлов на одну сторону лавсановой подложки толщиной  $d_1 \sim 10$  мкм. Было выяснено, что все они электродинамически тонкие, а измеренные величины их импедансов  $z_i$  ( $i = 1, 2, \dots$ ) вещественны и не зависят от частоты. Затем пленки попарно накладывались вплотную друг на друга металлизированными сторонами наружу. У таких комбинированных пленок измерены зависимости величин  $T$  от угла падения  $\Theta$  для  $s$ - и  $p$ -поляризации. Результаты проиллюстрированы на рис. 1, где приведены также и теоретические зависимости, которые были рассчитаны по соотношениям импедансной модели /3-5/

$$T_s = \left| \frac{2Z \cos \Theta}{W + 2Z \cos \Theta} \right|^2, \quad T_p = \left| \frac{2Z}{W \cos \Theta + 2Z} \right|^2, \quad (1)$$

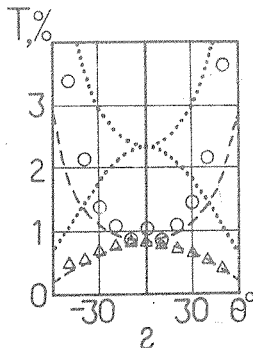
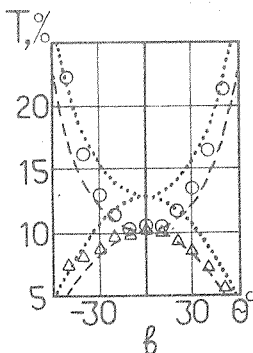
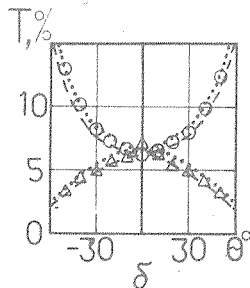
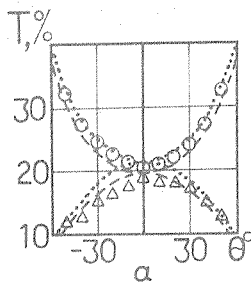
где  $W$  - волновое сопротивление окружающей среды ( $W = 377$  Ом), а  $Z$  - параметр модели. Величина  $Z$  для каждой комбинированной пленки определялась двумя способами: во-первых ( $Z = Z^a$ ), из условия наилучшего совпадения выражений (1) с экспериментом при значениях  $\Theta$ , близких к нулю, во-вторых ( $Z = Z^b$ ), из соотношения

$$Z = Z_{i,j}^b = (z_i z_j) / (z_i + z_j), \quad (2)$$

где  $z_i$  и  $z_j$  - измеренные импедансы одиночных пленок.

Из рис. 1 видно, что когда теоретические кривые, полученные для  $Z$ , выбранного двумя различными способами (штриховая при

<sup>\*)</sup> Известно, что для реальных тонких металлических пленок эти предположения обычно не выполняются /12/.



Р и с. 1. Экспериментальные зависимости коэффициентов пропускания по мощности  $T$  комбинированных пленок, составленных из односторонних пленок с импедансами  $z_1$  и  $z_2$ , от угла падения  $\theta$  при  $s$ -поляризации ( $\Delta$ ) и  $p$ -поляризации ( $\circ$ ) и расчетные кривые (формула (1)) для аналогичных зависимостей, соответствующие импедансам  $Z_{1,j}^t$  (пунктирные кривые) и  $Z_{1,j}^e$  (штриховые кривые):

а)  $z_1 = 267 \text{ Ом}$ ;  $z_2 = 418 \text{ Ом}$ ;  $Z_{1,2}^t = 163 \text{ Ом}$ ;  $Z_{1,2}^e = 149 \text{ Ом}$ ;

$\lambda = 2 \text{ мм}$ , б)  $z_3 = 418 \text{ Ом}$ ;  $z_4 = 79 \text{ Ом}$ ;  $Z_{3,4}^t = 66 \text{ Ом}$ ;  $Z_{3,4}^e = 62 \text{ Ом}$ ;

$\lambda = 2 \text{ мм}$ , в)  $z_5 = 186 \text{ Ом}$ ;  $z_6 = 237 \text{ Ом}$ ;  $Z_{5,6}^t = 104 \text{ Ом}$ ;  $Z_{5,6}^e = 88 \text{ Ом}$ ;

$\lambda = 1 \text{ мм}$ , г)  $z_7 = 68 \text{ Ом}$ ;  $z_8 = 68 \text{ Ом}$ ;  $Z_{7,8}^t = 34 \text{ Ом}$ ;  $Z_{7,8}^e = 19 \text{ Ом}$ ;  
 $\lambda = 1 \text{ мм}$

$Z = Z_{i,j}^e$  и пунктирная при  $Z = Z_{i,j}^t$ ) близки друг к другу, то они хорошо совпадают и с экспериментальными точками (рис. 1а и 1б), когда же они расходятся, то и экспериментальные точки не укладываются целиком ни на одну из них (рис. 1в и 1г). При

этом отличие заметнее для р-поляризации. Таким образом, если комбинированной пленке можно приписать импеданс  $Z$  (рис. 1а и 1б), то он определяется соотношением (2), если же такой пленке нельзя приписать  $Z$ , определяемого (2), то ей нельзя приписать вообще никакого импеданса.

Соотношение (2) имеет простой физический смысл, который проиллюстрируем следующим рассуждением. Предположим, что расстояние между металлическими слоями в комбинированной пленке столь мало, что диэлектрическая прокладка не вносит дополнительных разрывов ни в электрическую, ни в магнитную компоненты поля. Тогда электрическая компонента не имеет разрыва и на всей комбинированной пленке, а магнитная имеет скачок, равный сумме скачков на металлических слоях. Скачок магнитной компоненты на каждом из металлических слоев пропорционален току в нем, поэтому суммирование скачков магнитного поля эквивалентно суммированию токов. Каждый из токов, в свою очередь, пропорционален проводимости (обратному импедансу) соответствующего металлического слоя. Отсюда ясно, что соотношение (2) отвечает параллельному соединению импедансов  $z_1$  и  $z_2$ .

Из сказанного следует, что комбинированные пленки рис. 1а и 1б являются электродинамически тонкими, т.е. они полностью электродинамически эквивалентны одиночным металлическим пленкам с соответствующими коэффициентами пропускания. Однако геометрическая толщина  $d$  комбинированных пленок не может быть меньше двойной толщины лавсановых подложек, т.е.  $d > 2d_1 \approx 20$  мкм.

Таким образом мы получили электродинамически тонкие металлические пленки, геометрическая толщина которых много больше не только единиц или десятков ангстрем, предсказываемых для металлических пленок с аналогичными импедансами по /9-II/, но и характерных глубин скин-слоев для металлов (доли микрон). Это показывает несостоятельность попыток связывать величину  $d$  реальных металлических пленок с их электродинамическими свойствами в миллиметровом или субмиллиметровом диапазоне без детальной информации об их внутренней структуре /8/.

Комбинированные пленки рис. 1в и 1г оказались электродинамически не тонкими. Это следует из невыполнения соотношений как (2), так и (1) ни при каких  $Z$ . Дополнительным указанием на отклонение пленки от тонкости может служить заметная зависи-

мость от частоты величины  $T$ , наблюдавшаяся у пленок  $I_b$  и  $I_g$ .

Можно показать, что в комбинированных пленках такого типа малость толщины диэлектрической прокладки по отношению к  $\lambda$  является необходимым, но не достаточным условием электродинамической тонкости комбинированной пленки в целом. Последнее обстоятельство зависит также и от импедансов металлических слоев, обрамляющих диэлектрик. По-видимому, этим объясняется тот факт, что исследованные комбинированные пленки тем хуже подчинялись импедансной модели, чем меньше были импедансы отдельных слоев, их образующих.

Поступила в редакцию  
14 января 1983 г.

#### Л и т е р а т у р а

1. Ю. В. Троицкий, Одночастотная генерация в газовых лазерах, "Наука", Новосибирск, 1975 г.
2. В. В. Гаврилин, Ю. К. Григулис, Изв. АН Латв. ССР, сер. физ. и техн. наук, № 4, 70 (1976).
3. Н. А. Ирисова, А. Б. Латышев, Препринт ФИАН № 232, М., 1981 г.
4. Е. А. Виноградов и др., Препринт ФИАН № 35, М., 1982 г.
5. Е. А. Виноградов и др., Краткие сообщения по физике ФИАН № 12, 53 (1981).
6. Е. А. Виноградов и др., ЖТФ, 52, 573 (1982).
7. Е. А. Виноградов и др., Краткие сообщения по физике ФИАН № 8, II (1982).
8. В. А. Конев, Н. Н. Пунько, Дефектоскопия, № 6, 31 (1980).
9. W. Woltersdorff, Zeitschrift für Physik, 91, 230 (1934).
10. А. Е. Каплан, Радиотехника и электроника, 9, 1781 (1964).
11. В. В. Слуцкая, Тонкие пленки в технике СВЧ, Гостехиздат, М.-Л., 1962.
12. Г. В. Розенберг, Оптика тонкослойных покрытий, ГИИМЛ, М., 1958 г.