

05.2;07

Экспериментальное исследование поглощения волн миллиметрового диапазона в тонких металлических пленках

© В.Г. Андреев, В.А. Вдовин, П.С. Воронов

Институт радиофизики и электроники РАН, Москва
E-mail: chusov@cplire.ru

Поступило в Редакцию 2 июня 2003 г.

Исследованы зависимости оптических коэффициентов (R , T , A) на длине волны 8 mm тонкой алюминиевой пленки в диапазоне толщин 1.7–15 nm с учетом материала подложки. Показано наличие максимума поглощения при толщине пленки 2.5 nm. Объяснение экспериментальных результатов проведено с учетом зависимости проводимости пленки от толщины.

Специфические свойства тонких металлических пленок при взаимодействии их с электромагнитным излучением были замечены давно. Особенно такие свойства наблюдаются при прохождении излучения через тонкую металлическую пленку, толщина которой много меньше толщины скин-слоя. Несмотря на то что ослабления электрического поля в пленке из-за малости ее толщины практически не происходит, пленка оказывается сильно отражающей и имеет максимум поглощения. Это явление можно объяснить проявлением аномального скин-эффекта [1]. В случае, когда толщина пленки сравнима с длиной свободного пробега электронов в толстом слое металла, длина свободного пробега в тонкой пленке определяется в основном уже не взаимодействием с кристаллической решеткой, а отражениями от границ. Детальное теоретическое исследование оптических свойств металлических пленок для случая нормального падения волны в СВЧ- и радиодиапазоне было дано в работе [2]. Было показано, что для пленок, толщина которых много меньше толщины скин-слоя, оптические характеристики не зависят от частоты.

В данной работе исследуется поведение коэффициентов отражения, пропускания и поглощения тонких пленок при падении на них излучения с длиной волны 8 мкм.

Исследуемые пленки алюминия были получены методом термического испарения в высоком вакууме. Метод испарения позволяет легко регулировать толщину покрытия и обеспечивает хорошее качество и воспроизводимость свойств пленок. Пленки напылялись на оптически полированные кварцевые стекла толщиной 2.3 мм. Выбор алюминия в качестве материала для напыления объяснялся следующими соображениями. Прочность сцепления алюминиевых пленок со стеклом очень велика, эти пленки являются довольно твердыми и коррозионно стойкими из-за постоянного присутствия самопроизвольно возникающей на воздухе поверхностной пленки окиси алюминия. (Это было важно для случая их использования [3], так как они контактируют с водой). Равномерное распределение пленки по толщине на поверхности стекла достигалось путем использования точечного испарителя, расположенного на большом расстоянии от подложки. Это позволило получить пленки с разбросом по толщине не более 5%. Толщина пленки контролировалась профилометром Talystep с точностью до 0.5 нм.

Схема измерений характеристик пленок с использованием панорамного измерителя КСВН Р2-65 позволяла одновременно фиксировать коэффициенты отражения и прохождения. Калибровка коэффициента отражения проводилась по отражению от металлической пластины в месте нахождения пленки алюминия. Коэффициент поглощения A рассчитывался по формуле:

$$A = 1 - R - T, \quad (1)$$

где R — коэффициент отражения, $R = P_2/P_1$, T — коэффициент прохождения, $T = P_3/P_1$; P_1, P_2, P_3 — мощности соответственно падающей, отраженной и прошедшей волн.

Модель исследуемой трехслойной структуры показана на рис. 1. Исследовались два варианта падения СВЧ волны на поверхность алюминиевой пленки. Результаты измерений отражения, пропускания и поглощения волны в зависимости от толщины пленки представлены на рис. 2. Измерения проводились в диапазоне толщин d от 1.7

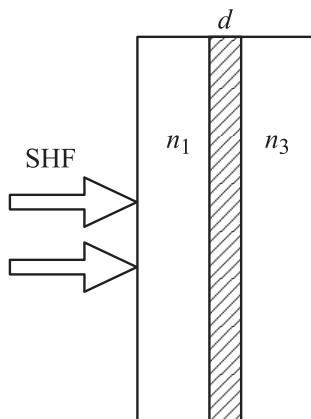


Рис. 1. Схема исследуемой трехслойной структуры, n_1 и n_3 — коэффициенты преломления.

до 15 nm. Изготовление пленок с толщиной менее 1.5 nm было связано с большими техническими трудностями и поэтому результаты измерений при малых толщинах имели большие погрешности. При толщине пленки более 15 nm значения коэффициентов отражения и пропускания практически не изменялись. Коэффициент отражения металлической пленки монотонно увеличивался с ростом ее толщины, приближаясь к практически единичному значению. Соответственно коэффициент пропускания пленки практически обращался в нуль при толщине пленки 6–8 nm. При этом значения коэффициентов пропускания практически были одинаковы при падении волны на пленку из воздуха (рис. 2, *a*) и из стеклянной подложки (рис. 2, *b*). Коэффициент поглощения волны имел максимум в области 2–3 nm, причем измеренная величина максимального коэффициента поглощения при падении волны со стороны стекла ($A_m = 0.49$) превышала значение полученного максимального коэффициента поглощения при падении волны со стороны воздуха ($A_m = 0.34$). Погрешность измерения коэффициентов в наших экспериментах не превышала 5–7%.

Теоретический анализ поведения оптических коэффициентов для случая нормального падения плоской волны на трехслойную структуру,

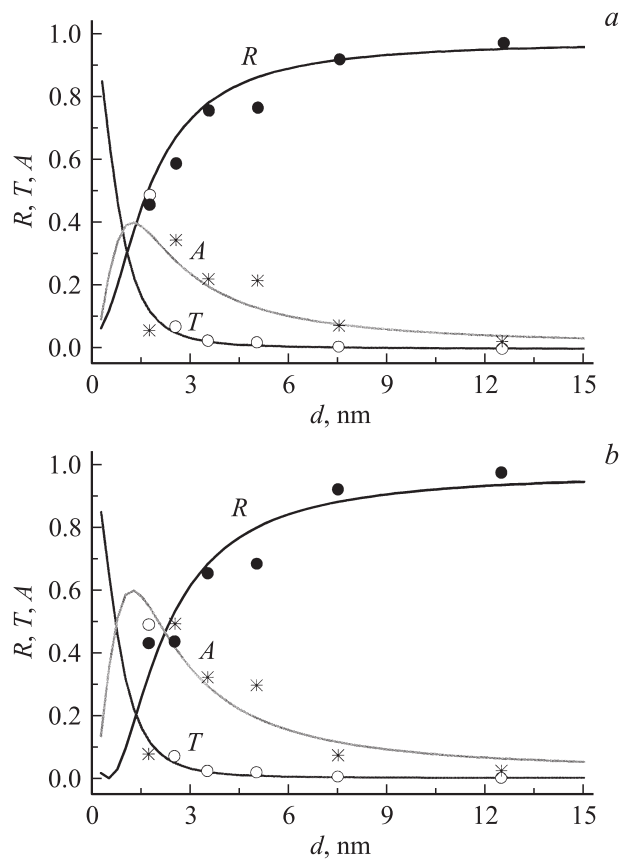


Рис. 2. Зависимость оптических коэффициентов алюминиевой пленки от ее толщины с учетом материала подложки. Теоретические зависимости показаны сплошными линиями, экспериментальные результаты представлены соответствующими символами. *a* — излучение падает непосредственно на поверхность металлической пленки, что соответствует случаю трехслойной структуры: воздух ($n_1 = 1$), пленка, стекло ($n_3 = 1.5$). *b* — излучение со стороны стекла, структура: стекло ($n_1 = 1.5$), пленка, воздух ($n_3 = 1$).

подобную рис. 1, дает следующие зависимости [4]:

$$R = \frac{\left((n_3 - n_1) + 2 \frac{d}{b} \right)^2}{\left((n_3 + n_1) + 2 \frac{d}{b} \right)^2}, \quad T = \frac{4n_1n_3}{\left((n_3 + n_1) + 2 \frac{d}{b} \right)^2},$$

$$A = \frac{8 \frac{d}{b} n_1}{\left((n_3 + n_1) + 2 \frac{d}{b} \right)^2}, \quad (2)$$

где d — толщина пленки, $b = c/2\pi\sigma$, σ — проводимость металла. Учет размерных эффектов (так как $d \leq l_0$) для случая сплошной металлической пленки приводит к зависимости проводимости σ от толщины (при $d \sim 10$ nm) [4]:

$$\sigma(d) = \sigma_0(d/2l_0)(1 + \ln(l_0/d)), \quad (3)$$

где σ_0 — удельная проводимость, а l_0 — средняя длина свободного пробега электронов в бесконечно толстом образце металла. Для алюминия $\sigma_0 = 3.54 \cdot 10^7$ S/m, $l_0 = 15$ nm (при комнатной температуре).

Зависимости коэффициентов R , T и A от толщины и ориентации пленки относительно источника электромагнитного излучения, полученные по формулам (2) с учетом зависимости (3), представлены на рис. 2 сплошными линиями. Отметим, что коэффициент поглощения алюминиевой пленки имеет максимум при толщине пленки 1.3 nm, причем значение поглощения в пленке при падении волны со стороны стеклянной подложки в $n_3/n_1 = 1.5$ выше, чем в случае падения волны на пленку из воздуха.

Как видно из рис. 2, экспериментальные и теоретические результаты находятся в хорошем соответствии, начиная с толщин пленки порядка 3 nm. При меньших толщинах поведение экспериментальных результатов качественно совпадает с теоретическими. Зарегистрирован максимум коэффициента поглощения в зависимости от толщины пленки. Измеренное отношение максимальных значений коэффициента поглощения при падении волны со стороны стеклянной подложки в 1.44 выше, чем в случае падения волны на пленку из воздуха, что соотносится с теоретическим значением. Однако максимум поглощения зарегистрирован при толщине пленки 2.5 nm, что в 2 раза превышает теоретически полученную толщину.

Указанное поведение можно объяснить следующим образом. Сплошная пленка алюминия формируется с толщин порядка 3 nm. До этого пленка неоднородна, проявляет свойства „островковой“ структуры. Это существенно влияет на проводимость, и зависимость $\sigma(d)$ может не соответствовать выражению (3). Кроме этого, на поверхности всегда присутствует пленка окисла металла. В случае окиси алюминия Al_2O_3 толщина ее пленки может достигать 1–2 nm, что тоже приводит к изменению проводимости. Учет уменьшения величины проводимости и даст смещение положения максимума поглощения в сторону больших толщин пленки.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 01–02–17344.

Список литературы

- [1] Reuter G.E.H., Sondheimer E.H. // Proc. Roy. Soc. A. 1948. V. 195. № 1042. P. 336–364.
- [2] Каплан А.Е. // РЭ. 1964. Т. 9. № 10. С. 1781–1787.
- [3] Андреев В.Г., Вдовин В.А., Карабутов А.А. // Изв. РАН. Сер. физ. 2002. Т. 66. № 12. С. 1750–1753.
- [4] Розенберг Г.В. Оптика тонкослойных покрытий. М., 1958. 570 с.