

Исследование оптических коэффициентов нанометровых пленок меди и золота в СВЧ диапазоне

С. М. Пронин^{1,*}, В. А. Вдовин^{2,†}, В. Г. Андреев^{3,‡}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра фотоники и физики микроволн Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Институт Радиотехники и Электроники имени В. А. Котельникова РАН Россия, 125009, Москва, ул. Моховая, д. 11, стр. 7

³Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра акустики Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

Исследуются оптические коэффициенты пленок меди и золота с толщинами от 0.5 нм до 10 нм на частоте 10 ГГц. В схеме измерений используется векторный анализатор цепей R&S ZVA 24 и волноводный резонатор. Показано, что экспериментальные результаты для коэффициента пропускания пленок меди соответствуют расчетным значениям при введении эквивалентной толщины, уменьшенной на 3 нм. Измеренное значение проводимости пленки меди почти на порядок меньше проводимости объемной меди.

PACS: 73.61.-g. УДК: 537.86.

Ключевые слова: тонкая металлическая плёнка, оптический коэффициент, векторный анализатор цепей.

При взаимодействии электромагнитного излучения с металлическими пленками нанометровой толщины возникает размерный эффект, проявляющийся в аномально большом поглощении падающего излучения [1]. Этот эффект проявляется наиболее заметно при толщине пленки сравнимой с длиной свободного пробега электронов проводимости материала пленки. Большинство работ по исследованию особенностей взаимодействия тонких пленок с электромагнитным излучением выполнено в видимом и ближнем ИК диапазонах [2–4]. Коэффициенты отражения, прохождения и поглощения волн на частоте 37.5 ГГц для алюминиевых нанометровых пленок на кварцевой подложке исследованы в работе [5]. Оптические коэффициенты пленок хрома нанометровой толщины, синтезированных на кварцевой подложке, в диапазоне частот 0.1–1 ГГц были исследованы в работе [6]. При этом было замечено, что при малых толщинах пленки теоретические и экспериментальные зависимости могут иметь значительные расхождения.

Целью работы является исследование оптических коэффициентов пленок меди и золота с толщинами от 0.5 нм до 10 нм, напыленных на кварцевые стекла толщиной 2 мм.

Теоретический анализ поведения оптических коэффициентов для случая нормального падения плоской волны на трехслойную структуру типа диэлектрик-металлическая пленка-диэлектрик, проводился по работе [5]. Зависимости амплитудных оптических коэффициентов отражения R , пропускания T , и поглощения A медной пленки от толщины представлены на рис. 1.

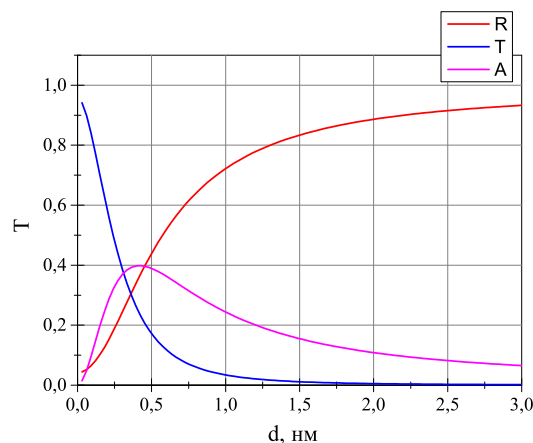


Рис. 1: Зависимости оптических коэффициентов пленок меди от толщины d

Рассчитанные зависимости коэффициентов R , T , и A для пленок золота от толщины представлены на рис. 2. В вычислениях использовались следующие значения констант для меди и золота соответственно при комнатной температуре: удельная проводимость $\sigma_0 = 5.95 \times 10^7$ См/м, $\sigma_0 = 4.55 \times 10^7$ См/м, длина свободного пробега электронов $l_0 = 2.987 \times 10^{-9}$ м, $l_0 = 22 \times 10^{-9}$ м. Показатели преломления стекла и воздуха принимались равными 1.5 и 1.0 соответственно.

Отметим, что теоретические зависимости не зависят от частоты в СВЧ диапазоне. Для измерения оптических коэффициентов использовался векторный анализатор электрических цепей R&S ZVA 24. Методика измерений следующая. Образец в виде кварцевого стекла с напыленной пленкой вставляется в волновод трехсантиметрового диапазона. В схеме измерения коэффициента отражения используется волноводный ре-

*E-mail: strelokxxx94@gmail.com

†E-mail: vdv@cplire.ru

‡E-mail: andreev@acs366.phys.msu.ru

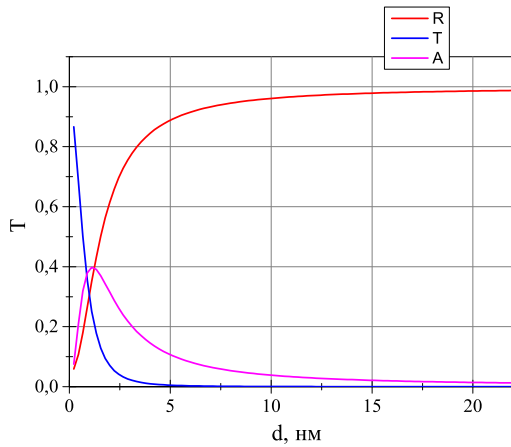


Рис. 2: Зависимости оптических коэффициентов пленок золота от толщины d

зонатор с металлическим зеркалом в виде подвижного поршня, позволяющего регулировать длину резонатора так, чтобы добиваться как максимального отражения падающей волны, так и максимального поглощения. Для калибровки в волновод перед подвижным зеркалом устанавливается кварцевая подложка без напыления. На частоте порядка 10 ГГц поршень устанавливается на расстояние, при котором амплитуда отраженного сигнала максимальна. Затем чистая подложка убирается, и на её место устанавливается подложка с напыленной пленкой. Таким образом были измерены коэффициенты отражения исследуемых образцов.

На рис. 3 представлены результаты экспериментальных измерений коэффициента пропускания пленок меди, а также дана для сравнения теоретическая зависимость. Погрешность измерений коэффициента пропускания не превышала 5–7 %.

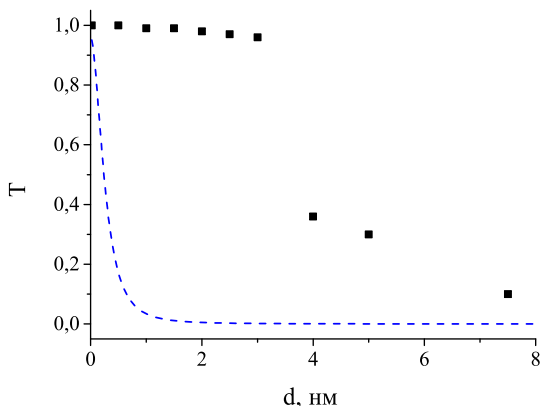


Рис. 3: Экспериментальная (символы) и теоретическая (штриховая кривая) зависимости коэффициента пропускания плёнок меди от толщины d

Видно существенное расхождение между экспериментальной и теоретической зависимостями. Из литературных данных известно, что медные плёнки на воздухе сильно окисляются [8]. В частности, пленка меди толщиной 3 нм в результате хранения на воздухе оказывается практически полностью (на 98.5 %) окислена. Пленка Cu толщиной 6.25 нм окислена на 84.5 %. И даже пленка толщиной 11.25 нм (что сравнимо с самой толстой пленкой, используемой в измерениях) окислена на 62 %. Окисел меди является в большей степени диэлектриком, поэтому реальная проводимость пленки должна быть существенно ниже, чем проводимость самой меди.

Кроме того, отличие расчетных кривых от экспериментальных в диапазоне толщин пленок до 3 нм может быть связано с островковой структурой пленок.

Влияние окисла и островковость структуры пленок мы предлагаем учесть путем введения эквивалентной толщины, которая в данном конкретном измерении может быть рассчитана как заявленная толщина минус 3 нм: $d_{эфф} = d - 3$ нм.

Если учесть эти особенности, то можно построить предполагаемые зависимости. Скорректированные данные представлены ниже на рис. 4. На рисунке черными квадратиками представлены экспериментальные измерения со сдвигом по толщине пленки в 3 нм, пунктиром показана теоретическая кривая коэффициента прохождения при условии, что проводимость пленки равна проводимости объемной меди с $\sigma_0 = 5.95 \times 10^7$ См/м, а сплошной кривой показана зависимость для проводимости $\sigma_0 = 5.35 \times 10^6$ См/м, которая наилучшим образом соответствует экспериментальным значениям.

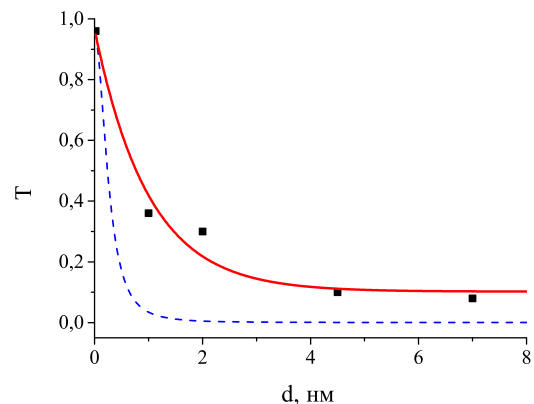


Рис. 4: Зависимость коэффициента пропускания пленки меди от эквивалентной толщины $d_{эфф}$. Сплошная кривая соответствует проводимости $\sigma_0 = 5.35 \times 10^6$ См/м, штриховая — проводимости объемной меди

Видно, что соответствие теоретической кривой и экспериментальных значений довольно хорошее, что подтверждает предположение, высказанное в работах [7] о том, что проводимость металлических пленок с тол-

щинами порядка единиц нм может быть ниже на порядок и более, чем в объемном металле.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 16-07-01246 и № 16-29-09581).

-
- [1] *Reuter G. E. H., Sondheimer E. H.* Proc. Roy. Soc. A. **195**, № 1042. P. 336. (1948).
 [2] *Sennett R. S., Scott G. D.* JOSA. **40**. P. 203. (1950).
 [3] *Henning P. F.* et.al. Phys. Rev. Lett. **83**, N 83. P. 4880. (1999).
 [4] *Arndt D. P.* et. al. APPLIED OPTICS. **23**, N 20. P 3571. (1984).
 [5] *Андреев В. Г., Вдовин В. А., Воронов П. С.* Письма в ЖТФ. **29**. С. 68. (2003).
 [6] *Андреев В. Г.* и др. Письма в ЖТФ. **41**, Вып. 4. С. 52. (2015).
 [7] *Андреев В. Г., Вдовин В. А.* Изв. ВУЗов. Радиофизика. **48**, № 10–11. С. 1006-1011. (2005).
 [8] *Гирка И. А., Грицына В. Т., Казаринов Ю. Г., Мисюра И. Н.* Uzhhorod University Scientific Herald. Series Physics. Issue 29. (2011).

Studying the optical coefficients of nanometer–thick copper and gold films at microwave frequencies

S. M. Pronin^{1,a}, V. A. Vdovin^{2,b}, V. G. Andreev^{3,c}

¹*Department of photonics and microwave physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia*

²*V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS, Mokhovaya ul. 11, str. 7, Moscow, 125009 Russia*

³*Department of acoustics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University*
E-mail: ^astrelokxxx94@gmail.com, ^bvdv@cplire.ru, ^candreev@acs366.phys.msu.ru

Optical coefficients of copper and gold films with thicknesses 0.5 to 10 nm are studied at the frequency of 10 GHz. The vector network analyzer R&S ZVA 24 and waveguide resonator are used in measuring circuit. It is shown that the experimental results for transmission coefficient of the copper films correspond to the calculated values when equivalent thickness reduced on the 6 nm is introduced. The measured value of conductivity of the copper film is almost an order of magnitude less than the bulk conductivity of copper.

PACS: 73.61.-r.

Keywords: thin metallic film, optical coefficient, vector network analyzer.

Сведения об авторах

1. Пронин Сергей Михайлович — студент; e-mail: strelokxxx94@gmail.com.
2. Вдовин Владимир Александрович — канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: vdv@cplire.ru.
3. Андреев Валерий Георгиевич — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 9392952, e-mail: andreev@acs366.phys.msu.ru.