

УДК 535.4.016

## ВЛИЯНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ И ТОЛЩИНЫ ОКСИДНОГО СЛОЯ НА СПЕКТРАЛЬНУЮ ЗАВИСИМОСТЬ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МЕДНОГО ЗЕРКАЛА

Л. Ю. Мельниченко, Л. В. Поперенко, И. А. Шайкевич

*Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко,  
Украина, 03601, г. Киев, просп. Академика Глушкова, 4  
E-mail: lmeln@ukr.net*

Проведены спектроэллипсометрические исследования двух медных зеркал с разной шероховатостью поверхности. Установлено, что спектральные зависимости оптической проводимости качественно одинаковы, но смещены по ординате; в то же время некоторые их максимумы могут быть связаны с поглощением света поверхностным окисным слоем.

*Ключевые слова:* шероховатость поверхности, поверхностный слой окисла, эллипсометрия, оптические постоянные, массивные медные зеркала.

**Введение.** Проблема влияния физико-химического состояния поверхности на оптические свойства металлов и сплавов возникла практически одновременно с появлением экспериментальной и теоретической металлооптики, основными методами исследования в которой являются эллипсометрические [1, 2]. Спектральные металлооптические исследования этой проблемы важны, прежде всего, потому, что они дают необходимую информацию об энергетической электронной структуре металлов и сплавов и позволяют определить ряд важных электронных параметров.

Полированный поверхностный слой металлического зеркала представляет собой шероховатую поверхность, на которой в условиях воздушной атмосферы имеется тонкий слой окисла и адсорбированных веществ. При этом как величина среднеарифметического отклонения профиля поверхности от среднего уровня, так и толщина слоя окисла и адсорбированных веществ могут быть по порядку величины сравнимы с глубиной скин-слоя. Следовательно, вопрос о соответствии реально полученных металлооптических данных результатам для идеально гладкой поверхности химически чистого металла является весьма важным. В большинстве публикаций, посвящённых этой проблеме, детальные исследования проводились лишь для отдельных длин волн [3–6].

Для решения указанной задачи в данной работе проведены систематические исследования в широкой спектральной области для массивных медных зеркал. Оптические свойства меди изучались в [7, 8].

**Описание эксперимента.** Медные зеркала были изготовлены из бескислородной меди чистоты 99,97 % с различной шероховатостью поверхности. Исследование среднеарифметического отклонения профиля поверхности  $R_a$  от идеальной поверхности проводилось на профилометре фирмы «Тейлор — Хобсон» (Англия) для двух образцов. Измерения оптических постоянных выполнены методом Битти [9] на спектроэллипсометре оригинальной конструкции в спектральном интервале 1–4,5 эВ. В этом методе измеряемыми параметрами являются азимут восстановленной линейной поляризации  $\Psi$  и сдвиг фаз  $\Delta$  между  $p$ - и  $s$ -компонентами отражённого света. Затем на их основе в модели полубесконечной среды вычисляются оптические постоянные, а именно показатели преломления  $n$  и поглощения  $k$ . Относительная ошибка измерения азимута  $\Psi$  составляла 1,5 %, сдвига фаз  $\Delta$  — 2,5 %.

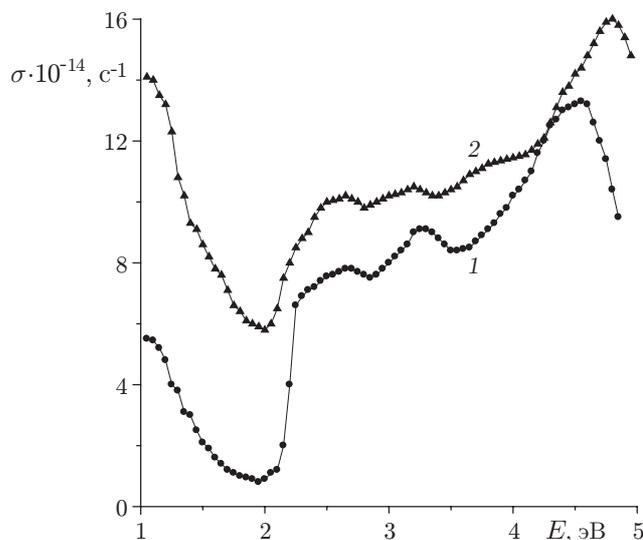


Рис. 1. Дисперсионные зависимости оптической проводимости медных зеркал с разной шероховатостью поверхности (кривая 1 — среднеарифметическое отклонение профиля поверхности  $R_a = 12,8$  нм, кривая 2 —  $R_a = 24,8$  нм)

**Результаты измерений и их обсуждение.** В электронной теории металлов информативной величиной для анализа является оптическая проводимость металла  $\sigma$ , которая определяется соотношением  $\sigma = nk\nu$ , где  $\nu$  — частота световой волны.

Зависимости оптической проводимости от энергии квантов света  $E = h\nu$  для измеряемых образцов приведены на рис. 1. Прежде всего, необходимо отметить, что качественно ход дисперсионных кривых оптической проводимости для обоих образцов почти одинаков и совпадает с её дисперсионной зависимостью [8]. Однако количественно наблюдаются существенные различия. Положение обеих кривых на рисунке зависит от величины шероховатости, причём как в области энергии фотонов  $E > 2$  эВ, где присутствуют мощные межзонные переходы, так и в области  $E < 2$  эВ, где преобладает поглощение свободными носителями заряда. Как отмечалось в работе [10], увеличение шероховатости поверхности может приводить к уширению максимумов поглощения, вызванных межзонными переходами, и к уменьшению их по абсолютной величине, а также к смещению. Именно это и наблюдается для максимума обоих образцов в области энергий фотонов 4,2–4,4 эВ (см. рис. 1).

Анализ квантового поглощения меди показывает, что мощное межзонное поглощение в области энергии фотонов 2–5 эВ вызвано переходами в окрестностях  $L$  и  $X$  точек зоны Бриллюэна. На кривых 1 и 2 наблюдаются незначительные максимумы в области энергий фотонов 2,2–2,8 эВ и 3–3,6 эВ. Первый из них может быть связан с поглощением света поверхностным окисным слоем  $\text{Cu}_2\text{O}$ , что подтверждают исследования [11]. Более высокоэнергетичный максимум при энергиях фотонов 3–3,6 эВ может быть обусловлен поглощением света смесью окислов  $\text{Cu}_2\text{O}$  и  $\text{CuO}$ . Аналогичный результат поведения максимума, связанного со слоем окисла, обнаружен для олова [12].

Таким образом, если влияние шероховатости сводится к смещению кривых оптической проводимости по абсолютной величине и к смещению положения отдельных максимумов, то поверхностный слой окисла влечёт за собой появление дополнительных максимумов на спектральных кривых.

Спектральные зависимости коэффициента отражения  $R$  образцов 1 и 2 при нормальном падении света представлены на рис. 2. Если оптическая проводимость  $\sigma$  на рис. 1 для

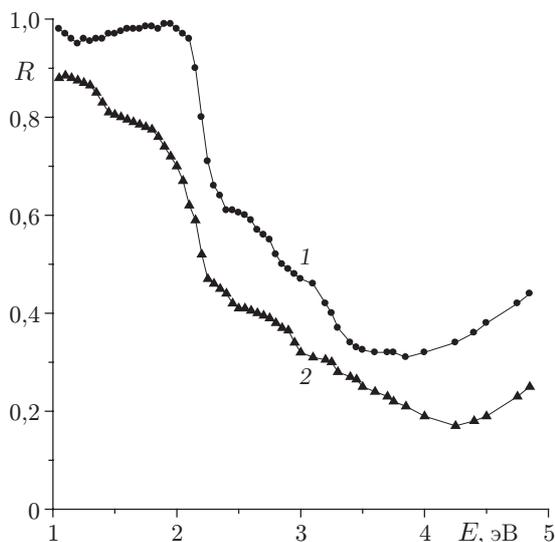


Рис. 2. Дисперсионные зависимости коэффициента отражения медных зеркал с разной шероховатостью (кривая 1 — среднеарифметическое отклонение профиля поверхности  $R_a = 12,8$  нм, кривая 2 —  $R_a = 24,8$  нм)

образца 1 меньше, чем для образца 2, то коэффициент отражения для образца 1 выше, чем для образца 2, в полном соответствии с теоретической формулой Топорца [13, 14]:

$$R = R_0 e^{-(5\pi R_a \cos \varphi / \lambda)^2}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  — длина световой волны,  $\varphi$  — угол падения света,  $R_0$  — коэффициент отражения от идеально гладкой поверхности.

**Заключение.** Проведённые в данной работе эксперименты показали, что шероховатость поверхности медных зеркал влияет как на величину оптической проводимости, так и на положение максимумов их спектра оптического поглощения. Поверхностный слой окисла приводит к появлению дополнительных максимумов при энергиях фотонов 2,2–2,8 эВ и 3–3,6 эВ на кривой оптической проводимости, вызванных квантовым поглощением в этом слое.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Основы** эллипсометрии / Под ред. А. В. Ржанова. Новосибирск: Наука, 1979. 422 с.
2. **Спесивцев Е. В., Рыхлицкий С. В., Швец В. А.** Развитие методов и средств оптической эллипсометрии в Институте физики полупроводников СО РАН // Автометрия. 2011. **47**, № 5. С. 5–12.
3. **Ржанов А. В., Свиташева С. Н., Свиташев К. К.** Графический метод интерпретации результатов эллипсометрических измерений на шероховатых поверхностях // ДАН СССР. 1983. **273**, № 5. С. 1123–1126.
4. **Ржанов А. В., Свиташева С. Н., Свиташев К. К. и др.** Эллипсометрический метод определения качества обработки поверхности // ДАН СССР. 1982. **267**, № 2. С. 373–377.
5. **Петровский Г. Т., Пшеницын В. И., Антонов В. А. и др.** Эллипсометрические измерения параметров шероховатости металлических зеркал // ДАН СССР. 1986. **290**, № 2. С. 317–321.

6. **Чистый И. Л., Горохова Л. Н.** Оптические свойства полированной медной поверхности // Поверхность. Физика, химия, механика. 1986. Вып. 1. С. 100–107.
7. **Ordall M. A., Bell R. J., Alexander R. W. et al.** Optical properties of fourteen metals in the infrared and far infrared: Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Mo, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, V and W // Appl. Opt. 1985. **24**, Is. 24. P. 4493–4499.
8. **Handbook of Optical Constants of Solids** /Ed. E. D. Palik. N. Y.: Academic Press, 1985. 3187 p.
9. **Beattie J. R.** Optical constants of metals in the IR. Experimental methods // Phil. Mag. 1955. **46**, N 373. P. 235–245.
10. **Носков М. М.** Оптические и магнитооптические свойства металлов. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1983. 219 с.
11. **Губанов В. А., Мельниченко Л. Ю., Шайкевич И. А.** Оптические свойства поверхностного слоя на меди // Поверхность. 2001. № 11. С. 82–85.
12. **Шайкевич И. А., Дрозд П. Й., Поперенко Л. В., Сопинский И. В.** Исследование процессов окисления олова в твердом и жидком состоянии эллипсометрическим методом // Оптика и спектроскопия. 1982. **53**, вып. 1. С. 145–149.
13. **Топорец А. С.** Определение размеров шероховатости непрозрачной полированной поверхности // ОМП. 1978. № 5. С. 68–69.
14. **Белов В. К., Ботнева З. Н., Давтян А. М., Ковган П. И.** К вопросу о связи коэффициента отражения света с профильными характеристиками поверхности // ЖПС. 1983. **39**, № 2. С. 291–295.

*Поступила в редакцию 15 августа 2011 г.*

---