

ЭЛЛИПСОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ КРЕМНИЯ

Р. Б. Бендере, Р. П. Калыня и И. А. Фелынь

Рассмотрена возможность эллипсометрического определения параметров микронеровностей шероховатых кремниевых поверхностей. На основе исследований шероховатых поверхностей двух видов показано, что при установленном виде шероховатости эллипсометрические методы дают результаты, хорошо соответствующие микроскопическим исследованиям. Для определения вида шероховатости предложено использовать иммерсионную эллипсометрию.

Чувствительность эллипсометрических параметров к шероховатости поверхностей отражающих систем известна из многочисленных теоретических и экспериментальных работ [1-3]. Благодаря высокой чувствительности эллипсометрические методы дают возможность исследовать микронеровности со средней высотой намного меньше используемой длины волны света λ , т. е. порядка нескольких нм, что затруднено другими методами. Однако на практике эллипсометрические измерения используются крайне редко, так как для оценки параметров микронеровностей возникают трудности выбора теоретической модели адекватной реальной поверхности.

Среди различных методов расчета эллипсометрических параметров шероховатых поверхностей наиболее широкое применение получили два метода — метод эквивалентной пленки [4, 5] и метод, основанный на дифракционной теории [6, 7]. В принципе каждый из этих методов охватывает определенный вид микронеровностей, так как для применимости метода эквивалентной пленки размеры неровностей в плоскости отражающей поверхности должны быть меньше λ , а для метода дифракции больше λ (средний наклон неровностей $\text{tg } \beta_0 \leq 0.1$). Поэтому для выбора соответствующего метода расчета требуется установить вид шероховатости реальной поверхности. В работах по эллипсометрическому исследованию шероховатых поверхностей вопрос о возможности определения вида неровностей до сих пор не рассматривался. В основном исследования посвящены теоретическому анализу методов расчета и для экспериментов избирались шероховатые поверхности определенного вида, соответствующие требованиям данной теории [6, 7]. При решении задачи определения параметров шероховатости для образцов с шероховатостью поверхности неизвестного вида произвольный выбор метода расчета не всегда приводил к получению удовлетворительных результатов [5].

В настоящей работе дан анализ возможности установления вида и определения параметров микронеровностей при помощи основных методов эллипсометрических измерений: на воздухе, при одном угле падения и многоугловых измерениях, а также в различных иммерсионных средах. Экспериментальные исследования проведены на двух различных партиях кремниевых поверхностей, конфигурация микронеровностей которых определена с помощью интерференционного и электронного микроскопа и соответствует условиям теорий эквивалентной пленки и теории дифракции.

Эксперимент

Эллипсометрические измерения проводились на эллисметре ЛЭФ-2 при $\lambda=6328 \text{ \AA}$ с точностью определения параметров $\delta\Delta=\pm 0.1^\circ$ и $\delta\psi=\pm 0.05^\circ$. Многоугловые ($\varphi=60\div 80^\circ$) измерения проводились на воздухе, а иммерсионные под углом падения 65° в трех разных иммерсионных средах (в воде $n_0=1.334$, четыреххлористом углероде $n_0=1.460$ и толуоле $n_0=1.496$). Вид шероховатых поверхностей исследуемых образцов определялся интерференционным микроскопом МИИ-4 и электронным микроскопом JEM-100 С. Шероховатые поверхности, относящиеся, согласно микроскопическим измерениям, к первому виду неровностей (высота неровностей порядка нескольких десятков нм, средние размеры в плоскости отражающей поверхности от 1000 до 2000 нм, т. е. средний наклон $\text{tg } \beta_0 \approx 0.01\div 0.05$), были созданы травлением в 30%-ном растворе NaOH. Второй вид неровностей (оба параметра не превышают $10\div 20$ нм, т. е. $\text{tg } \beta_0 \approx 0.2\div 0.7$) был получен в результате химико-механической полировки кремниевых поверхностей ионами меди при некоторых отклонениях от обычного технологического режима. Основные характеристики обоих видов образцов даны в таблице.

Средние значения параметров неровности	I группа образцов			II группа образцов		
	микроскопические исследования	значения, определенные по методу эквивалентной пленки	значения, определенные по методу дифракции	микроскопические исследования	значения, определенные по методу эквивалентной пленки	значения, определенные по методу дифракции
Высота неровностей σ , нм	20÷30	3÷8	—	5÷15	3÷13	—
Степень заполнения слоев q	—	0.93÷0.99	—	—	0.90÷0.99	—
Наклон неровностей $\text{tg } \beta_0$	0.01÷0.05	—	0.01÷0.05	0.2÷0.7	—	0.01÷0.05

Методы расчета

Расчет теоретических зависимостей нами проводился по методу эквивалентной пленки [4] и методу дифракции [6]. Согласно методу эквивалентной пленки, шероховатый слой поверхности заменялся слоем с гладкими поверхностями, толщина которого равна средней квадратичной высоте неровностей (σ), и комплексный показатель преломления слоя (N_s) определялся согласно уравнению Максвелла—Гарнета

$$\frac{N_s^2 - 1}{N_s^2 + 2} = q \frac{N_A^2 - 1}{N_A^2 + 2} + (q - 1) \frac{N_B^2 - 1}{N_B^2 + 2}, \quad (1)$$

где q — часть объема занимаемого материалом образца (степень заполнения слоя); N_A — комплексный показатель преломления материала подложки, N_B — комплексный показатель преломления окружающей среды.

Эллипсометрические параметры Δ и ψ далее вычислялись по фундаментальному уравнению эллипсометрии для системы подложка—эквивалентная пленка—слой естественного окисла—окружающая среда. Как показали вычисления, эллипсометрические параметры, соответствующие экспериментально определенным, возможно получать только при очень высоких средних коэффициентах заполнения ($q \geq 0.9$). Так как форма неровностей при столь высоких коэффициентах заполнения сравнительно мало влияет на величину эллипсометрических параметров, шероховатая поверхность моделировалась в виде узких прямоугольных углублений (пор), отделенных гладкими участками поверхности.

Расчет эллипсометрических параметров Δ и ψ для шероховатой поверхности, согласно теории дифракции, проводился по выражению

$$\operatorname{tg} \psi \exp(i\Delta) = \frac{\operatorname{tg} \psi_0 \exp(i\Delta_0) + \frac{1}{2} \operatorname{tg}^2 \beta_0 \frac{R''_{px}(\varphi) + R''_{py}(\varphi)}{R_s(\varphi)}}{1 + \frac{1}{2} \operatorname{tg}^2 \beta_0 \frac{R''_{sx}(\varphi) + R''_{sy}(\varphi)}{R_s(\varphi)}}, \quad (2)$$

где ψ_0 , Δ_0 — эллипсометрические параметры для данной системы с абсолютно гладкими граничными поверхностями, $\operatorname{tg} \beta_0$ — средний наклон неровностей, $R''_{px}(\varphi)$; $R''_{py}(\varphi)$; $R''_{sx}(\varphi)$; $R''_{sy}(\varphi)$; $R_s(\varphi)$ — функции, зависящие от угла падения φ , длины волны λ , оптических постоянных и толщины окисной пленки и подложки, полное выражение которых дано в [6].

Вычисления были проведены для системы кремний—окись кремния с шероховатыми граничными поверхностями кремний—окись и окись—окружающая среда при условии, что для обеих поверхностей конфигурация неровностей одинакова и описывается гауссовским распределением. Средний наклон неровностей при многоугловых измерениях определялся по сдвигу псевдоугла Брюстера [7], так как, согласно литературным данным, изменение параметров шероховатости поверхности влияет на расположение зависимостей эллипсометрических параметров Δ и ψ от угла падения света φ , не меняя их конфигурацию.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1 показаны экспериментальные эллипсометрические данные шероховатых поверхностей обоих видов, измеренные на воздухе при одном угле падения света вместе с расчетными как по методу эквивалентной пленки (рис. 1,

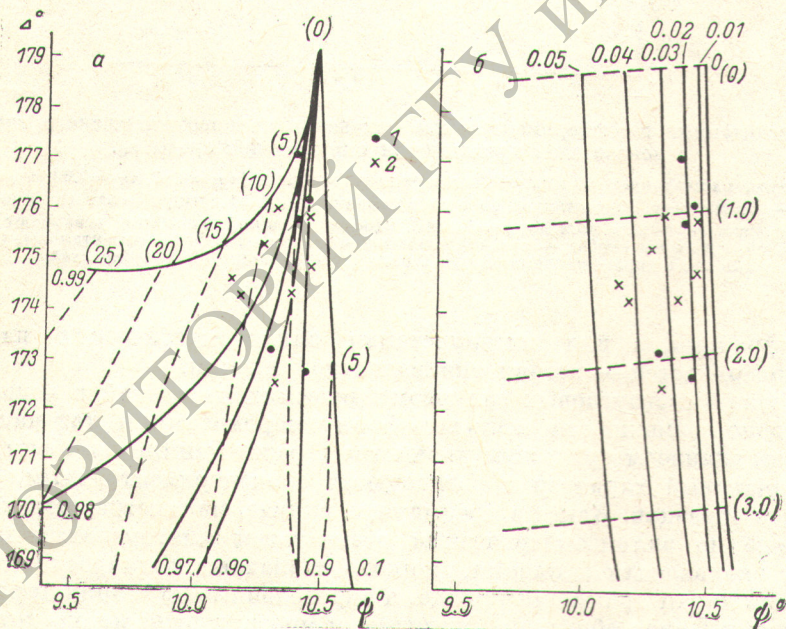


Рис. 1. Номограммы Δ — ψ с экспериментальными данными, полученными для образцов I вида (1) и II вида (2).

a — номограмма, рассчитанная по методу эквивалентной пленки, толщина окисного слоя 1 нм. Цифры в скобках указывают толщину эквивалентной пленки в нм, цифры без скобок — средний коэффициент заполнения q ; *b* — номограмма, рассчитанная по методу дифракции. Цифры в скобках указывают толщину окисного слоя в нм, цифры без скобок — средний наклон неровностей $\operatorname{tg} \beta_0$.

a), так и согласно дифракционной теории (рис. 1, *b*). Экспериментально определенные параметры как для образцов I, так и для II вида весьма близки и характеризуются уменьшенными значениями Δ и ψ по сравнению с соответствующими значениями для гладкой поверхности. Эллипсометрические измерения

параметров Δ и ψ на воздухе при одном угле падения света не дают возможности определить вид шероховатости и выбрать соответствующий метод расчета, так как согласно обоим методам расчета полученные теоретические сетки Δ — ψ номограмм полностью охватывают все экспериментальные данные и интерпретация их возможна как с помощью теории эквивалентной пленки, так и теории дифракции.

Из сопоставления экспериментальных данных с теоретическими, рассчитанными по обоим методам, видно, что удовлетворительное согласие с данными микроскопических исследований имеет место в тех случаях (таблица), когда при вычислении параметров шероховатости для I вида поверхностей использовалась

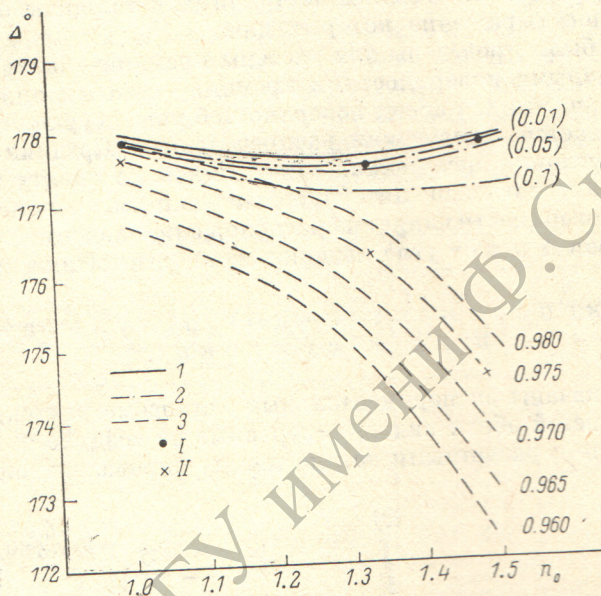


Рис. 2. Рассчитанные и экспериментальные изменения эллипсометрического параметра Δ с показателем преломления окружающей среды n_0 .

1 — зависимости, рассчитанные для гладкой поверхности кремния ($n_{Si}=3.87$, $k_{Si}=0.02$; $n_{ок}=1.55$, $d_{ок}=1.0$ нм); 2 — зависимости, рассчитанные по методу дифракции ($d_{ок}=1.0$ нм); 3 — зависимости, рассчитанные по методу эквивалентной пленки ($d_{экв}=5.0$ нм). Цифры у линий в скобках указывают средний наклон неровностей, цифры без скобок — средний коэффициент заполнения. Экспериментальные данные даны для двух характерных образцов I вида (I) и II вида (II) поверхностей.

теория дифракции, а для интерпретации эллипсометрических параметров II вида поверхностей — теория эквивалентной пленки.

Применение многоугловых эллипсометрических измерений в нашей работе также не дало возможности различать форму шероховатости, так как угловые зависимости эллипсометрических параметров, рассчитанные по обоим теориям, имеют одинаковый характер и согласуются с экспериментальными данными обоих видов образцов. Как и в предыдущем случае, параметры шероховатости, вычисленные по эллипсометрическим результатам многоугловых измерений по методу эквивалентной пленки, хорошо совпадают с микроскопически определенными параметрами для II вида, а определенные по теории дифракции — с параметрами I вида образцов. Очевидно, и многоугловой метод, хорошо себя оправдывающий при заранее определенном виде шероховатости [6], не позволяет установить форму неровностей.

Расчеты эллипсометрических параметров шероховатых поверхностей в иммерсионных средах согласно теории эквивалентной пленки и теории дифракции показали, что в иммерсионных средах с показателем преломления $n_0 > 1$ изменения эллипсометрического параметра Δ (рис. 2), рассчитанного по методу эквивалентной пленки и методу дифракции, имеют различный характер. С увеличением показателя преломления среды увеличивается разница в параметрах Δ , определенных по обоим методам, что дает возможность различить вид шерохова-

тости. Значения параметров ϕ с изменением показателя преломления окружающей среды различаются незначительно.

Экспериментальные зависимости эллипсометрического параметра Δ от показателя преломления внешней среды, снятые для I и II вида образцов, подтверждают теоретические расчеты. На рис. 2 вместе с расчетными зависимостями показаны экспериментальные данные, характерные для обоих видов шероховатостей. Эллипсометрические параметры образцов I вида с небольшим средним наклоном неровностей согласуются со значениями, полученными на основе теории дифракции, а для II вида поверхностей с большим средним наклоном неровностей — со значениями, полученными по методу эквивалентной пленки.

Таким образом, на основе анализа расчетных зависимостей и экспериментальных данных показано, что иммерсионный метод в отличие от других эллипсометрических методов дает возможность различить виды шероховатостей поверхностей кремния и тем самым определить некоторые параметры шероховатости поверхности.

Литература

- [1] R. S. Sirohi. *Opt. Commun.*, *1*, 304, 1970.
- [2] T. Smith. *Surf. Sci.*, *56*, 252, 1976.
- [3] R. M. Pashley. *Surf. Sci.*, *71*, 139, 1978.
- [4] C. A. Fenstermaker, F. L. McCrackin. *Surf. Sci.*, *16*, 85, 1969.
- [5] К. К. Свиташев, А. И. Семенов, Л. В. Семенов, Н. Л. Шварц. *Опт. и спектр.*, *43*, вып. 1, 1977.
- [6] I. Ohlidal, F. Lukeš. *Opt. Acta*, *19*, 817, 1972.
- [7] I. Ohlidal, F. Lukeš, K. Navratil. *Surf. Sci.*, *45*, 91, 1974.

Поступило в Редакцию 1 января 1981 г.