

КОНТРОЛЬ ЧИСТОТЫ ПОВЕРХНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЛИПСОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

С. А. Филин¹, В. Е. Рогалин², И. А. Каплунов^{3*}

УДК 543.42

<https://doi.org/10.47612/0514-7506-2022-89-3-410-418>

¹ Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова, Москва, Россия

² Институт электрофизики и электроэнергетики Российской АН, Санкт-Петербург, Россия

³ Тверской государственный университет, Тверь, Россия; e-mail: kaplunov.ia@tversu.ru

(Поступила 21 марта 2022)

Проанализирована возможность контроля химической чистоты поверхности оптических элементов эллипсометрическим методом. Приведено обоснование возможности измерения параметров загрязняющих пленок на оптической поверхности элементов эллипсометрическим методом. Показано упрощение процесса определения толщины загрязняющей пленки при расширении возможности ее измерения на оптическом элементе из разных материалов. Выполнены эллипсометрические исследования свежеполитованных и побывавших в эксплуатации металлических зеркал из меди и сплава меди (циркониевой бронзы), алюминия и его сплавов АМГ-6, АЛ-9, АЛ-24. Проведены исследования на элементах из оптических стекол К-8 и К-108 (ГОСТ 3514-94) — наиболее типичных материалов, используемых для изготовления оптических деталей для лазерной техники видимого и ближнего ИК-диапазона, из монокристаллов NaCl, BaF₂ и сапфира (Al₂O₃); измерены параметры загрязняющих пленок на поверхности данных элементов. Установлено, что метод эллипсометрии целесообразно использовать при входном (перед проведением физико-химической очистки) и выходном (после очистки) контроле оптического элемента для оценки загрязненности оптической поверхности, а также для количественного анализа концентрации загрязнений на оптической поверхности элементов при отработке технологии их физико-химической очистки.

Ключевые слова: эллипсометрия, оптическая поверхность, загрязнения, физико-химическая очистка, количественный анализ.

The possibility of controlling the chemical purity of the surface of optical elements by the ellipsometric method has been analyzed. The rationale of the possibility of measuring the parameters of contaminating films on the optical surface of elements by the ellipsometric method has been given simplification has been shown of the process of determining the thickness of the contaminating film while expanding the possibility of its measurement on an optical element made of different materials. Ellipsometric studies of freshly polished and used metal mirrors made of copper and copper alloy (zirconium bronze), aluminum and its alloys AMG-6, AL-9, AL-24 have been carried out. Research has also been conducted on elements made of K-8 and K-108 (State Standard 3514-94) optical glasses, which are the most typical materials used for manufacture of optical parts for laser technique of visible and near IR-range, from single crystals of NaCl, BaF₂ and sapphire (Al₂O₃). Parameters of contaminating films on the surface of these elements have been measured. It has been concluded that it is advisable to use the ellipsometry method during the input (before carrying out physicochemical cleaning) and during the output (after cleaning) control of the optical element to assess

CONTROL OF THE OPTICAL SURFACE PURITY OF THE ELEMENTS BY THE ELLIPSO-METRIC METHOD

S. A. Filin¹, V. E. Rogalin², I. A. Kaplunov^{3*} (¹ Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia; e-mail: safilin@mail.ru; ² Institute of Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia; e-mail: v-rogalin@mail.ru; ³ Tver State University, Tver, Russia; e-mail: kaplunov.ia@tversu.ru)

the contamination of the optical surface and also for the quantitative analysis of the concentration of contaminants on the optical surface of the elements while working off the technology of their physicochemical cleaning.

Keywords: *ellipsometry, optical surface, contamination, physical and chemical cleaning, quantitative analysis.*

Введение. С появлением лазеров и полупроводниковой электроники резко ужесточились требования к качеству поверхности оптических элементов [1—4] и чипов [5]. В связи с этим возрос интерес к методам контроля, позволяющим проводить неразрушающую, бесконтактную диагностику состояния поверхности деталей. В процессе изготовления элементов образуется поверхностный слой, включающий в себя зашаржированные технологические примеси и отличающийся по структуре и свойствам от объема материала. Как показано в многочисленных исследованиях (см., например, [6]), поверхностный слой определяет зависимость важнейших эксплуатационных характеристик от наличия в нем примесей. Наличие примесей обуславливает ухудшение эксплуатационных характеристик элементов, а именно их оптических параметров — оптической чистоты, коэффициента отражения, коррозионной стойкости и т. д. Это приводит к уменьшению адгезионной и механической прочности наносимых покрытий и значительному снижению порога плазмообразования (под действием лазерного излучения происходят выгорание примесей взрывного характера и разрушение оптической поверхности при мощностях потока намного ниже расчетных [6]).

Основные источники загрязнения оптической поверхности следующие: неизбежные примеси, образующиеся при изготовлении оптических элементов (смазки, смазочно-охлаждающие жидкости, включая адсорбированную воду), и абразивные материалы; остатки щелочей, кислот, солей после химической обработки (обезжиривания, травления, полирования); пары масел в вакуумных насосах; несовершенство технологических процессов и низкая чистота исходных материалов; загрязнения в технологических средах (химической, термической и т. д.) — в органических растворителях и воде, применяемых для обезжиривания и промывки элементов; примеси в газах, используемых для сушки и отжига элементов, при нанесении покрытий; недостаточная культура производства и нарушение технологического режима; пыль в воздухе помещений, в которых осуществляются изготовление и сборка элементов и узлов; предметы, с которыми соприкасаются элементы в процессе контроля, хранения, транспортировки и сборки (тара, монтажный инструмент, монтажные столы и т. д.). Кроме того, загрязнения (от рук, перчаток, косметических средств и др.) могут вносить операторы, ведущие обработку, контроль, упаковку и сборку элементов. Таким образом, загрязнение оптического элемента возможно практически на всех стадиях изготовления, контроля, хранения и монтажа.

Резка металлических слитков на пластины сопровождается интенсивным механическим воздействием на поверхность и придает ей значительные нарушения и определенную степень шероховатости. Последующие процессы шлифования и полирования с целью придания элементу требуемой толщины, определенных геометрических параметров (плоскостности и параллельности) и оптической чистоты поверхности также оставляют после себя нарушенный слой [7, 8]. При полировке поверхность обычно соприкасается с мягким полировальником. Абразив поддерживается мягкой поверхностью, не царапает обрабатываемую поверхность, а за счет пластической деформации вызывает вязкое течение материала поверхности. На полированной поверхности в микроскоп виден слой, который даже при максимальном увеличении кажется совершенно аморфным и напоминает пленку вязкой жидкости, нанесенную на неровности отполированной поверхности и как бы застывшую в стекловидный слой [7, 8]. Обычно эта пленка заполняет видимые трещины и углубления, оставшиеся после предшествующей шлифовки, но иногда углубления диаметром <0.01 мм затягиваются прозрачной пленкой лишь сверху.

В случае предельно отполированных металлических поверхностей их поверхностный слой является аморфным до глубины, доступной исследованию методом дифракции медленных электронов. Неполированная поверхность металла дает дифракционную картину, идентичную картине кристаллической структуры металла. По мере полировки дифракционная картина изменяется и становится более размытой, что свидетельствует об уменьшении размеров кристаллов. В итоге кольца и точки дифракционной картины металлической структуры исчезают, уступая место сильно размытым кольцам. Полировка металла превращает его поверхность в аморфную структуру [9].

Считается, что для монокристаллов слой с нарушенной монокристаллическостью после полирования можно разделить на разные по характеру зоны: аморфная глубиной ~ 30 Å, аморфная с трещинами, деформированная с повышенной плотностью дислокаций (третий слой). Деформированная зона

является переходной от аморфной структуры к ненарушенному монокристаллу и содержит механические напряжения, а в некоторых случаях и микротрещины. Нарушенный слой может составлять десятки микрометров. В аморфной зоне образуется оксидный слой, на котором находятся загрязнения. При этом на поверхности аморфного поверхностного слоя образуются продукты абразивного износа в виде мелкодисперсных частиц, а при полировании поверхностные слои могут претерпевать мгновенные акты плавления, обусловленные взаимодействием с полирующим материалом (шероховатость контактирующих тел по высотным параметрам больше или меньше в 1.5—10 раз, контакт происходит при скольжении в диапазоне скоростей 0.5—100 м/с). Температура в зоне контакта 50—1600 °С [8, 10], причем она быстро повышается до температуры плавления металла, если последняя входит в этот диапазон.

Степень нарушения нормальной структуры металла постепенно изменяется при переходе от поверхности к более глубоким слоям: под аморфным поверхностным слоем расположены слои с постепенным увеличивающимися размерами кристаллов, на глубине нескольких микрометров (возможно, больше) наблюдается нетронутая структура.

Как показано в [11], все металлы покрыты пленкой из оксидов. Кинетические кривые, характеризующие кинетику роста толщины оксидной пленки на поверхности зеркала из меди, показывают ее увеличение на воздухе при 20 °С в течение 8 дней с 0 до 35 Å, при 100 °С в течение 1 ч — с 0 до 114 Å. В большинстве случаев при очистке металлооптики имеют дело с окисленной поверхностью. Прочность сцепления загрязнения с поверхностью зависит от механизма их взаимодействия: неполярные минеральные масла прочнее удерживаются на поверхности, свободной от оксида (межмолекулярное дисперсионное взаимодействие), жирные кислоты, наоборот, — на поверхности, покрытой оксидом (химическая связь).

Неоднородность химической активности поверхности металлов, как правило, обусловлена наличием активных центров. Они обладают максимальной энергией адсорбции, поэтому на них приходится основная масса адсорбированного вещества.

Наличие загрязнений на поверхности может привести к ухудшению параметров оптического элемента при воздействии на него интенсивного лазерного излучения [1, 12], в частности, значительно снижается порог оптической стойкости (плотности мощности (энергии) лазерного излучения, при которой оптический элемент выходит из строя). При этом повреждение может быть необратимым. Кроме того, наличие загрязнений на поверхности может вызывать рассеяние падающего излучения, а также снижать пропускание оптического элемента.

При исследованиях металлооптики возникает проблема интерпретации оптических констант сильно поглощающих объектов, в том числе оптических элементов, в зависимости от углов падения. Так, метод преломляющих призм из металлов не работает вследствие принципиальной трудности изготовления достаточно тонких и одновременно прозрачных объектов для заметного преломления в них лучей. Метод сливающихся рефракций полупрозрачных пленок в подходящих жидкостях работает плохо вследствие одновременного несовпадения показателей преломления и поглощения разных материалов, которые как эквивалентные вещества различаются только своими гетерогенными фазами, например, при наличии аморфного слоя у оптических элементов вследствие полировки [13]. Рассмотрим преимущества эллипсометрического метода.

Развитые методы прикладной традиционной эллипсометрии имеют классическое теоретическое и аппаратное обеспечение и приборную базу для анализа амплитудно-фазового состояния поляризации света, взаимодействующего с исследуемым материалом. Возможности эллипсометрии по чувствительности на порядок выше, чем измерения на спектрально-энергетических приборах: эллипсометры способны работать в УФ-, ИК- и видимом диапазонах спектра с миллисекундным быстродействием при качественном метрологическом обеспечении; хотя отраженное пятно не стационарно и прерывисто, оно строго синхронизировано жесткостью конструкции эллипсометра, данную нестационарность и прерывистость можно погасить, используя азимуты скрещенных поляризаторов для определения первичных амплитудно-фазовых параметров оптического элемента и высокую точность механического задания равных углов падения и отражения в эллипсометре; поверхность оптического элемента является не плоской, а чаще вогнутой, однако при хорошей юстировке отражение можно поймать от экстремально низкой точки, малые размеры которой формируют измерительное отраженное пятно практически как от плоскости за счет малого размера (<0.5 мм) отверстия в диафрагме, пропускающей свет на фотоэлектронный умножитель. На расстоянии ~0.5 м от точки отражения расходимость составляет 10^{-3} [13].

Развитие новых методов нетрадиционной интерпретации эллипсометрических измерений с соответствующими теоретической и практической апробациями [14—18] связано в том числе с тем, что основными проблемами эллипсометрического исследования оптических элементов являются получение однозначных измерений и выбор адекватной оптической модели для конкретной расшифровки численных модельных решений для исследуемых элементов.

Метод эллипсометрического контроля химической чистоты поверхности оптических элементов основан на измерении состояния поляризации (как правило, отраженного) света после его взаимодействия с поверхностью исследуемого элемента. На основании данных о параметрах эллиптической поляризации отраженного света определяются оптические константы поверхности: показатель преломления n и индекс экстинкции K для чистой поверхности или n , K и толщина d в случае наличия пленки загрязнений на поверхности оптического элемента. Метод эллипсометрического контроля может быть использован для оценки состояния химической чистоты оптических элементов из металлов и их сплавов [19—30], полупроводников [31] и диэлектриков [32], а также для исследования переходных слоев [33]. В связи с этим в настоящей работе для контроля химической чистоты поверхности оптических элементов с использованием метода эллипсометрического контроля как неразрушающей, бесконтактной оптической контрольно-измерительной технологии предложена адекватная оптическая модель для однозначной расшифровки соответствующих численных модельных решений.

Эксперимент. Исследования состава остаточных газов масс-спектрометрическим методом в процессе нанесения покрытий на оптические элементы из металлов и подложки из стекла [34] демонстрируют, что на всех этапах давление паров органических загрязнений значительно. Состав остаточных газов при прогреве оптических элементов показывает плохую подготовку их под напыление (давление паров воды и органических загрязнений увеличивается на 1.5—2 порядка). Чистка газовым разрядом позволяет на 0.5—1 порядок снизить давление паров воды и органических загрязнений, однако их уровень остается значительным, а при нанесении покрытий давление паров значительно возрастает.

Известные методы контроля химической чистоты поверхности оптических элементов можно разделить на два класса: прямые (непосредственный контроль поверхности) и косвенные (контроль моющей среды после очистки ею поверхности). К прямым относятся методы измерения смачиваемости поверхности [35], использования индиевого адгезиометра [36], радиоактивных изотопов [37], оже-спектроскопии [38], масс-спектрометрии [39], ИК-спектроскопии [40], испытания на разрыв водной пленки [41] и распыления [41, 42]. Данные методы обладают недостатками. Так, метод смачивания поверхности не всегда дает однозначные результаты вследствие того, что одни загрязнения могут приводить к ухудшению смачиваемости, другие — к ее улучшению, т. е. уменьшению краевого угла. Также смачивание приводит к загрязнению и может вызывать коррозию оптической поверхности химически активных металлов. Использование индиевого адгезиометра приводит к загрязнению исследуемой поверхности индием, также невозможна дифференциация разных уровней загрязнений при толщинах слоев >7.5 нм. Применение метода радиоактивных изотопов требует специальных условий для введения их в состав загрязнения. В работах [38, 39] показано, что масс-спектрометрия и оже-спектроскопия наряду со сложностью и высокой стоимостью исследований могут приводить к повреждению исследуемых поверхностей.

Преимуществами ИК-спектроскопии [13] являются возможность различать химический состав адсорбированных пленок [43, 44] и слабая зависимость от оксидного слоя подложки, когда толщина слоя меньше длины волны зондирующего излучения. Исследуемые методами масс-спектрометрии [39] и ИК-спектроскопии [40] объекты ограничены по габаритам.

Метод испытания на разрыв водной пленки заключается в фиксировании времени образования разрывов водной пленки из дистиллированной воды в результате ее испарения с поверхности и не может применяться для качественной оценки химической чистоты поверхности оптических элементов в связи с ее загрязнением. Метод распыления заключается в опрыскивании поверхности мелкодисперсной деионизованной водой (при наличии хорошо очищенной поверхности вода смачивает ее и хорошо растекается, в противном случае образуются краевые углы смачивания), позволяет обнаруживать загрязнения в количестве $1.6 \cdot 10^{-8}$ г/см², но обладает всеми недостатками методов, основанных на измерении смачиваемости.

Отполированная поверхность имеет шероховатость, средние размеры которой обусловлены полирующим материалом, режимом и длительностью обработки, применявшимися в процессе полировки и особенно на последней стадии доводки, и составляют $Rz = 0.01—0.05$. Шероховатость спо-

способствует скоплению загрязнений, например масляных соединений, и при повышенной шероховатости методы определения чистоты поверхности (распыления и испытания на разрыв водной пленки) становятся менее надежными.

На основании данных о параметрах эллиптической поляризации отраженного света эллипсометрическим методом осуществляется количественный анализ технологических загрязнений на оптической поверхности при входном и выходном контроле после физико-химической очистки оптических элементов, а также при обработке технологии физико-химической очистки. Сущность метода состоит в том, что при отражении поляризованной электромагнитной волны на границе раздела двух сред с разными оптическими характеристиками амплитуды p - и s -компонент электрического вектора E изменяются по-разному, а частота колебаний сохраняется. Поэтому линейно поляризованный свет, падающий под углом к поверхности (которая способна поглощать свет или покрыта тонкой инородной пленкой), после отражения становится эллиптически поляризованным.

Связь между амплитудами и фазами электрических векторов падающей и отраженной волн описывается формулами Френеля для амплитудных коэффициентов отражения R [19, 45]:

$$R_p = E_p^r / E_p^j, \quad R_s = E_s^r / E_s^j, \quad (1)$$

где r и j — индексы падающей и отраженной волн.

Если $E = A \exp(i\sigma)$, то

$$R_p = |R_p| \exp(-i\sigma_p), \quad R_s = |R_s| \exp(-i\sigma_s), \quad (2)$$

где σ_p и σ_s — относительное изменение фаз p - и s -компонент электрического вектора E световой волны при отражении; i — ориентация эллипса, описывающего вектор волны в плоскости, нормальной к направлению ее распространения.

Характеристика отражающей системы ρ определяется по экспериментальным результатам:

$$\rho = R_p / R_s = \operatorname{tg} \psi e^{i\Delta}, \quad (3)$$

где $\operatorname{tg} \psi = \frac{A_p^r / A_p^j}{A_s^r / A_s^j}$ — относительное изменение амплитуд; ψ и Δ — эллипсометрические параметры

отражающей системы (град); $\Delta = \arctg(R_p / R_s) = \sigma_p - \sigma_s$ — относительное изменение фаз p - и s -компонент электрического вектора E световой волны при отражении.

Уравнение (3) — основное уравнение эллипсометрии, устанавливающее связь эллипсометрических параметров ψ и Δ отражающей системы с ее физическими свойствами. Для интерпретации полученных значений ψ и Δ решают прямую задачу для конкретной модели отражающей системы по уравнению (3). За одно измерение на эллипсометре ЛЭФ-ЗМ определяют оба угла ψ и Δ и рассчитывают физические параметры отражающей системы: n и K , n и d , K и d на $\lambda = 0.63$ мкм.

Для измерения оптических констант и толщин материалов и сред использован лазерный фотоэлектрический эллипсометр ЛЭФ-ЗМ-1, с помощью которого фиксировались изменения поляризации монохроматического излучения в результате взаимодействия его с исследуемым образцом. Эллипсометр построен по схеме PCSA (polarizer-compensator-sample-analyzer), рабочая длина волны излучения лазера $\lambda = 0.6328$ мкм. Измерительный поляризационный прибор имеет ручное управление и визуальный отсчет азимутальных углов оптических элементов (поляризатора, компенсатора и анализатора). Поляризатором и анализатором в эллипсометре служат призмы Глана из исландского шпата, компенсатором — хроматическая четвертьволновая пластинка из кристаллического кварца.

Для исследования взяты следующие образцы: металлические зеркала из меди и ее сплава (циркониевой бронзы) [46] диаметром 40 и 50 мм с оптическими характеристиками: форма $N = 2$, ошибка по форме $\Delta N = 0.2$, класс оптической чистоты $P = V$; плоские оптические элементы из алюминия диаметром 50 мм и сплавов алюминия [47]: АМГ-6 диаметром 50 мм ($N = 2$, $\Delta N = 0.2$, $P = V$), АЛ-9 диаметром 50 мм ($N = 2$, $\Delta N = 0.3$, $P = V$), АЛ-24 диаметром 50 мм ($N = 2$, $\Delta N = 0.5$, $P = V$); оптические элементы из оптических стекол К-8 и К-108, монокристаллов NaCl, BaF₂ и сапфира (Al₂O₃) диаметром 30 мм ($N = 1$, $\Delta N = 0.5$, $P = V$). Каждый из трех видов исследуемых элементов изготовлен групповым методом (в едином технологическом процессе), отполирован с помощью свободного абразива согласно стандартной технологии [48]. Образцы каждого вида получены из одной партии исходного материала (заготовки).

Результаты и их обсуждение. Оценка химической чистоты оптической поверхности эллипсометрическим методом осуществлялась следующим образом. По уравнению (3) на основании данных

по оптическим свойствам материалов [19] рассчитывались ψ и Δ для определяемых чистых материалов измеряемого оптического элемента. Данные расчетов приведены в табл. 1. Для тех же параметров в табл. 2 приведены диапазоны углов поворота поляризатора P и анализатора A измеряемого оптического элемента.

Т а б л и ц а 1. Эллипсометрические параметры для чистых материалов

Материал	ψ , град	Δ , град	n	K
Cu	43.37	1000.97	0.19	2.98
Al	41.80	141.41	1.30	7.11
Стекло марки К-8	20.27	0.72	1.52	0.01
Al ₂ O ₃	15.44	0.78	1.76	0.01
NaCl	19.48	0.72	1.55	0.01

Т а б л и ц а 2. Диапазоны углов поворота (град) поляризатора и анализатора

Материал	Диапазон 1	Диапазон 2
Медь и ее сплавы	$P = 268—278$ $A = 310—320$	$P = 0—10$ или $350—360$ $A = 225—235$
Алюминий и его сплавы АМГ-6, АЛ-9, АЛ-24	$P = 262—272$ $A = 308—318$	$P = 355—5$ $A = 230—240$
NaCl, BaF ₂	$P = 262—272$ $A = 308—318$	$P = 355—5$ $A = 230—240$
К-8, К-108, Al ₂ O ₃	$P = 40—50$ $A = 278—290$	$P = 310—320$ $A = 250—260$

По уравнению (3) рассчитаны номограммы (рис. 1) с использованием данных n и K для исследуемых оптических элементов из соответствующих материалов и возможных численных наборов n , d , K для пленки загрязнения. Проведено сравнение данных эллипсометрических измерений с результатами расчетов прямой задачи и оценено состояние поверхности исследуемого оптического элемента. При оценке химической чистоты поверхности оптических элементов данные, полученные по (1) и (2), сравнивали с данными табл. 1 для соответствующего материала. Совпадение данных табл. 1 и полученных эллипсометрических параметров для чистых материалов с точностью 30' для Δ и 10' для ψ указывают на отсутствие посторонних пленок (загрязнений) толщиной $>50 \text{ \AA}$ на поверхности исследуемого оптического элемента. В случае отличия полученных Δ и ψ от данных табл. 1 определяли толщину и показатель преломления пленки загрязнения с помощью номограммы для соответствующих материалов. Для установления соответствия методики определения загрязнений исследовались контрольные образцы. Пленки загрязнения формировались на оптической поверхности элементов в процессе их обработки методом свободного абразива согласно стандартной технологии со стандартными материалами [48].

Проведено эллипсометрическое исследование свежеполированных и побывавших в эксплуатации металлических зеркал из меди и ее сплава (циркониевой бронзы), алюминия и его сплавов АМГ-6, АЛ-9, АЛ-24, а также оптических элементов из оптических стекол К-8 и К-108, из монокристаллов NaCl, BaF₂ и сапфира (Al₂O₃). Измерены параметры загрязняющих пленок на поверхности данных элементов. Результаты подтверждают эффективность использования предлагаемой методики для оценки толщин загрязнений. Построенные номограммы можно применять в технологических работах, связанных с подготовкой оптических поверхностей, свободных от загрязнений. В качестве примера представлены оценки толщин загрязнений для различных материалов путем использования номограмм (рис. 1).

С использованием номограммы (рис. 1, а) для подложки из меди с пленкой загрязнения на ее поверхности при $\Delta = 98^{\circ}29'$ и $\psi = 42.78^{\circ}$ получена толщина пленки $d = 300 \text{ \AA}$. Для подложки из алюминия при $\Delta = 83.44^{\circ}$ и $\psi = 34.68^{\circ}$ $d = 300 \text{ \AA}$ (рис. 1, б). Для подложки NaCl при $\Delta = 1.82^{\circ}$ и $\psi = 19.50^{\circ}$ $d = 200 \text{ \AA}$ (рис. 1, в). Для подложки из сапфира при $\Delta = 12.00^{\circ}$ и $\psi = 15.64^{\circ}$ $d = 200 \text{ \AA}$ (рис. 1, г). Удаление загрязнений с оптической поверхности элементов осуществлялось с помощью моющей среды для очистки оптических поверхностей, например азеотропной смеси фреон 114В2-ацетон.

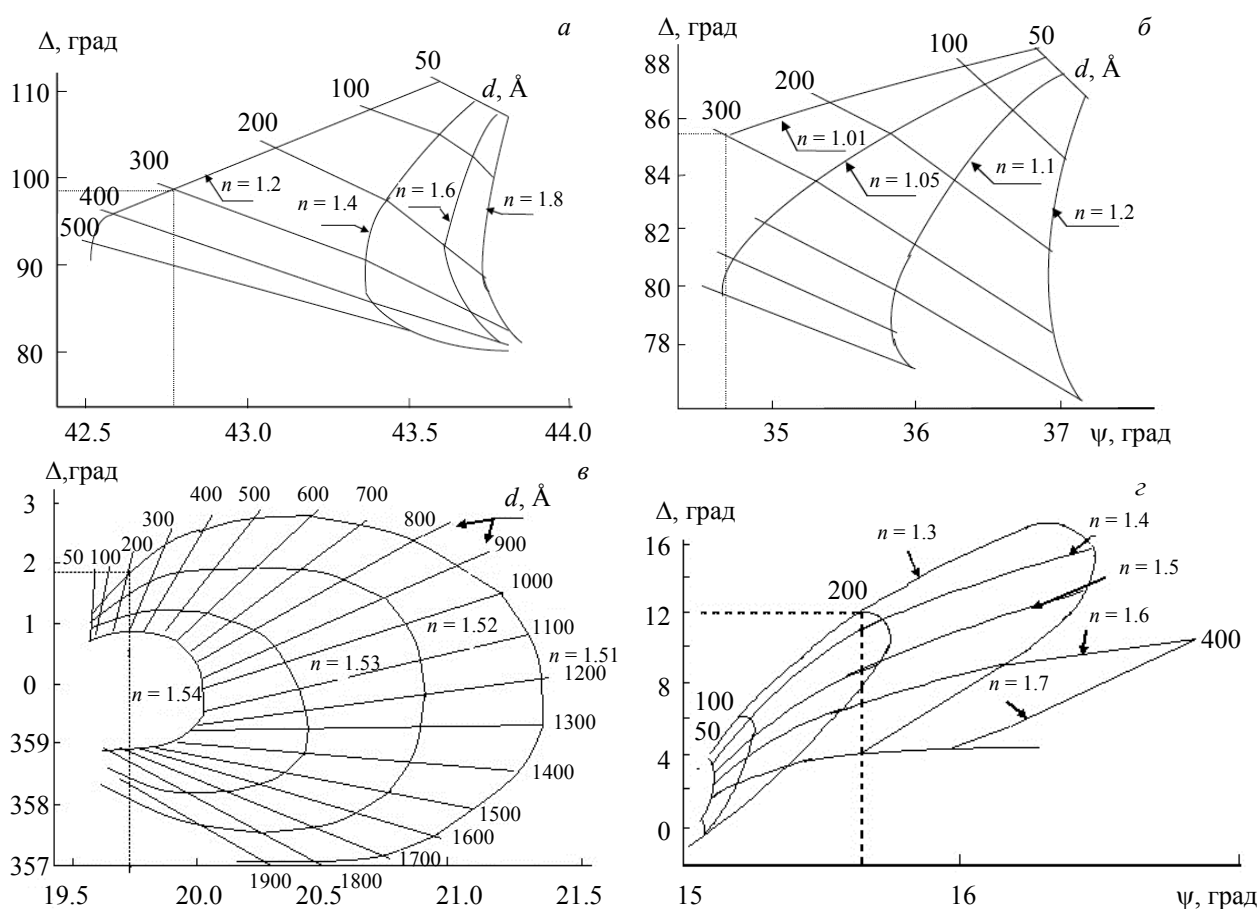


Рис. 1. Номограммы: а — для меди, $n_i = 0.19 - 4i$, $K_{\text{пленки}} = 0.05$; б — алюминия, $n_1 = 1.3 - 7.11i$, $n_2 = 0.58 - 2.35i$, $K_1 = 0.1$; в — NaCl, $n_i = 1.55 - 0.01i$; з — оксида алюминия (сапфира)

Ограничения применимости полученных результатов заключаются в том, что для определения толщины пленки загрязнения применена однослойная оптическая модель объекта исследования, а исследуемые эллипсометрическим методом и объекты ограничены по габаритам. Точность определения оптических констант n и K с помощью данной модели составляет 1 %, а точность определения толщины пленки загрязнения 50 Å [45], как правило, в сторону завышения, что показывают эксперименты с аналогичными образцами, проведенные методом ИК-спектроскопии [43, 44, 49]. Тем не менее считаем, что предлагаемая модель обеспечивает необходимую точность оценки при входном контроле количественного анализа загрязнений на поверхности оптического элемента для подбора наиболее целесообразных физико-химических характеристик процесса его очистки, при выходном контроле после нее и при отработке технологии физико-химической очистки оптических элементов.

Заключение. Метод эллипсометрии целесообразно использовать при входном контроле оптического элемента перед проведением физико-химической очистки и при выходном контроле после нее, для корреляции данных по загрязненности оптической поверхности, определенной в процессе физико-химической очистки, и для количественного анализа загрязнений на оптической поверхности элементов при отработке технологии их физико-химической очистки.

[1] В. Е. Роголин, И. А. Каплунов. Изв. Сочинского гос. ун-та, **4-2(28)** (2013) 120—127

[2] Б. И. Макшанцев, Р. Е. Ровинский, В. Е. Роголин. Квант. электрон., **12**, 1 (1985) 22—28
[B. I. Makshantsev, R. E. Rovinskiĭ, V. E. Rogalin. Sov. J. Quantum Electron., **15**, N 1 (1985) 10—14],
doi: 10.1070/QE1985v015n01ABEH005834

[3] И. А. Каплунов, В. Е. Роголин, С. А. Филин. Цветные металлы, **7** (2014) 72—75 [I. A. Kaplunov, V. E. Rogalin, S. A. Filin. Non-Ferrous Metals, **1** (2015) 29—31], doi: 10.17580/nfm.2015.01.07

- [4] S. A. Filin, V. E. Rogalin, I. A. Kaplunov, K. M. Zingerman. AIP Conf. Proc., **1915** (2017) 040016, doi: 10.1063/1.5017364
- [5] В. И. Иванов. Науковедение, **4**, № 23 (2014) 87
- [6] Ю. В. Архипов, И. Н. Белашков, Н. П. Дацкевич, В. Н. Егоров, А. Ф. Изюмов, Н. В. Карлов, В. И. Конов, Н. Н. Кононов, Г. П. Кузьмин, А. А. Нестеренко, Н. И. Чаплиев. Квант. электрон., **13**, № 1 (1986) 103—109 [Yu. V. Arkhipov, I. N. Belashkov, N. P. Datskevich, V. N. Egorov, A. F. Izyumov, N. V. Karlov, V. I. Konov, N. N. Kononov, G. P. Kuz'min, A. A. Nesterenko, N. I. Chapliev. Sov. J. Quantum Electron., **16**, N 1 (1986) 63—67]
- [7] Г. М. Мансуров, Р. К. Мамедов, А. С. Сударушкин, В. К. Сидорин, К. К. Сидорин, В. И. Пшеницын, В. М. Золотарев. Опт. и спектр., **52**, № 5 (1982) 852—857
- [8] А. П. Ящерицын, А. К. Цокур, М. Л. Еременко. Тепловые явления при шлифовании и свойства обработанных поверхностей, Минск, Наука и техника (1973) 88—102
- [9] М. К. Адам. Физика и химия поверхностей, Москва, ОГИЗ (1947) 50—110
- [10] А. П. Семенов. Трение и контактное воздействие графита и алмаза с металлами и сплавами, Москва, Наука (1974) 125—128
- [11] С. П. Русин. Теплофизика и аэромеханика, **19**, № 5 (2012) 643—654
- [12] В. В. Аполлонов, Ю. М. Васильковский, М. И. Жаворонков, А. М. Прохоров, Р. Е. Ровинский, В. Е. Рогалин, Н. Д. Устинов, К. Н. Фирсов, И. С. Ценина, В. А. Ямщиков. Квант. электрон., **12**, № 1 (1985) 5—9 [V. V. Apollonov, Yu. M. Vas'kovskii, M. I. Zhavoronkov, A. M. Prokhorov, R. E. Rovinskii, V. E. Rogalin, N. D. Ustinov, K. N. Firsov, I. S. Tsenina, V. A. Yamshchikov. Sov. J. Quantum Electron., **15**, N 1 (1985) 1—3], doi: 10.1070/QE1985v015n01ABEH005831
- [13] И. Е. Скалецкая, В. Т. Прокопенко, Е. К. Скалецкий. Введение в прикладную эллипсометрию, СПб, НИУ ИТМО (2014) 28—66
- [14] А. И. Семененко, И. А. Семененко. Науч. приборостроение, **17**, № 3 (2007) 54—64
- [15] А. И. Семененко, И. А. Семененко. Науч. приборостроение, **17**, № 4 (2007) 42—54
- [16] В. Т. Прокопенко, Е. К. Скалецкий, Л. В. Лапушкина, О. В. Майорова, И. Е. Скалецкая, Е. Е. Орлова. Науч.-техн. вестн. Санкт-Петербург. гос. ун-та информ. технол., механ. и оптики, **18** (2005) 107—109
- [17] В. И. Ковалев, А. И. Руковишников, Н. М. Россуканый, С. В. Ковалев, В. В. Ковалев, В. В. Амеличев, Д. В. Костюк, Д. В. Васильев, Е. П. Орлов. Приборы и техн. эксперимента, **5** (2016) 87—91
- [18] А. М. Штеренберг, Ю. В. Великанова. Эллипсометрия, Самара, Самар. гос. техн. ун-т (2012) 28—30
- [19] И. Г. Бурькин, Л. П. Воробьева, В. В. Грушецкий, Э. Е. Дагман, Р. И. Любинская, Г. А. Сапрыкина, К. К. Свиташев, А. И. Семененко, Л. В. Семененко. Алгоритмы и программы для решения некоторых задач эллипсометрии, под ред. А. В. Ржанова, Новосибирск, Наука, Сиб. отд-е (1980) 40—55
- [20] В. С. Стащук, В. И. Шкураг. В кн. “Эллипсометрия — метод исследования поверхности”, Новосибирск, Наука (1983) 35—40
- [21] H. Jiang, Z. Ma, H. Gu, X. Chen, S. Liu. Appl. Sci., **9**, N 4 (2019) 698, doi: 10.3390/app9040698
- [22] J. Bousquet, E. Bustarret, D. Eon, F. Jomard. Diamond Related Mater., **86** (2018) 41—46, doi: 10.1016/j.diamond.2018.04.009
- [23] В. В. Базаров, В. И. Нуждин, В. Ф. Валеев, Н. М. Лядов. Жур. прикл. спектр., **86**, № 1 (2019) 151—154 [V. V. Bazarov, V. I. Nuzhdin, V. F. Valeev, N. M. Lyadov. J. Appl. Spectr., **86**, N 1 (2019) 134—137], doi: 10.1007/s10812-019-00793-6
- [24] В. Н. Кручинин, В. А. Володин, Т. В. Перевалов, А. К. Герасимова, В. Ш. Алиев, В. А. Гриценко. Опт. и спектр., **124**, № 6 (2018) 777—782, doi: 10.21883/OS.2018.06.46080.39-18 [V. N. Kruchinin, V. A. Volodin, T. V. Perevalov, A. K. Gerasimova, V. Sh. Aliev, V. A. Gritsenko. Opt. Spectrosc., **124** (2018) 808—813], doi: 10.1134/S0030400X18060140
- [25] F. Lyzwa, P. Marsik, V. Roddatis, C. Bernhard, M. Jungbauer, V. Moshnyaga. J. Phys. D: Appl. Phys., **51**, N 12 (2018) 125306, doi: 10.1088/1361-6463/aaac64
- [26] N. Farid, N. Mahmoud, N. J. Nagib. J. Opt., **47** (2018) 366—373, doi: 10.1007/s12596-018-0455-0
- [27] A. Furchner, C. Walder, K. Hinrichs, M. Zellmeier, J. Rappich. Appl. Opt., **57**, N 27 (2018) 7895—7904, doi: 10.1364/AO.57.007895

- [28] **M. B. Bouzourâa, Y. Battie, S. Dalmasso, A. En Naciri, M. Oueslati, M. A. Zaïbi.** Superlattices Microstruct., **117** (2018) 457—468, doi: 10.1016/j.spmi.2018.03.078
- [29] **X.-D. Zhu, R.-J. Zhang, Y.-X. Zheng, S.-Y. Wang, L.-Y. Chen.** Chin. Opt., **12**, N 6 (2019) 1195—1234, doi: 10.3788/CO.20191206.1195
- [30] **G. A. Ermolaev, D. I. Yakubovsky, Y. V. Stebunov, A. V. Arsenin, V. S. Volkov.** J. Vac. Sci. Technol. B: Nanotechnol. Microelectron., **38**, N 1 (2020) 014002, doi: 10.1116/1.5122683
- [31] **S. Zollner, P. P. Paradis, F. Abadizaman, N. S. Samarasingha.** J. Vac. Sci. Technol. B: Nanotechnol. Microelectron., **37**, N 1 (2019) 012904, doi: 10.1116/1.5081055
- [32] **В. М. Золотарев, К. К. Свиташев, А. И. Семенов.** Опт. и спектр., **34**, № 5 (1973) 941—946
- [33] **Л. Л. Васильева, К. К. Свиташев, А. И. Семенов, Л. В. Семенов, В. К. Соколов.** Опт. и спектр., **37**, № 3 (1974) 574—581
- [34] **А. В. Гаврилов, С. А. Бурцев, А. В. Бурмистров.** Вестн. Казан. технол. ун-та, **17**, № 18 (2014) 183—185
- [35] **Г. А. Григорьев, Н. К. Золкина, Ю. Ю. Столяров, Г. Р. Аллахвердов.** ЖФХ, **75**, № 10 (2001) 1843—1845 [G. A. Grigor'ev, N. K. Zolkina, Yu. Yu. Stolyarov, G. R. Allahverdov. Russ. J. Phys. Chem. A, **75**, N 10 (2001) 1688—1690]
- [36] **R. E. Cuthrell.** The Quantitative Detection of Molecular Layers with the Indium Adhesion Nester. Sandia Laboratories Report SC-DR-66-300, July 1966 (1966)
- [37] **В. В. Климов, А. В. Шостаков.** Геофизические исследования скважин. Метод радиоактивных изотопов, Краснодар, ФГБОУ ВПО “КубГТУ”, Издательский дом “Юг” (2014) 135—137
- [38] **В. П. Афанасьев, П. В. Афанасьев, И. В. Грехов, Л. А. Делимова, С. П. Ким, Ю. М. Коо, Д. В. Машовец, А. В. Панкрашкин, Я. Парк, А. А. Петров, С. Шин.** ФТТ, **48**, № 6 (2006) 1130—1134 [V. P. Afanas'ev, P. V. Afanas'ev, I. V. Grekhov, L. A. Delimova, S.-P. Kim, J.-M. Koo, D. V. Mashovets, A. V. Pankrashkin, Y. Park, A. A. Petrov, S. Shin. Phys. Solid State, **48**, N 6 (2006) 1200—1204], doi: 10.1134/S1063783406060588
- [39] **M. J. Pellin, I. Veryovkin, W. F. Calaway.** Изв. РАН. Сер. физ., **70**, № 6 (2006) 859—861
- [40] **Е. А. Виноградов, В. А. Яковлев.** Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, № 2 (2018) 51—57, doi: 10.7868/S0207352818020087 [E. A. Vinogradov, V. A. Yakovlev. J. Surf. Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques, **12**, N 1 (2018) 139—144], doi: 10.1134/S1027451018010330
- [41] **А. Н. Ишматов, Б. И. Ворожцов.** Опт. атм. и океана, **25**, № 7 (2012) 653—656
- [42] **Р. И. Непомнящий, К. Г. Зверев.** Контроль и оценка качества очистки поверхности металлов, Москва, Советское радио (1978) 35—40
- [43] **E. D. Palik, R. T. Holm.** Opt. Eng., **17**, N 5 (1978) 512—525
- [44] **S. A. Hawkins, V. Park, G. H. Poole, T. Gottwald, W. R. Windham, K. C. Lawrence.** Appl. Spectrosc., **64**, N 1 (2010) 100—103
- [45] **Р. Р. Резвый.** Эллипсометрия в микроэлектронике, Москва, Радио и связь (1983) 26—45
- [46] **О. Е. Осинцев, В. Н. Федоров.** Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки. Справочник, Москва, Машиностроение (2004) 33—39
- [47] **А. А. Шибков, А. Е. Золотов.** Кристаллография, **56**, № 1 (2011) 147—154
- [48] **М. А. Окатов.** Справочник технолога-оптика, Санкт-Петербург, Политехника (2004) 208—262
- [49] **Э. Я. Гоз, Р. С. Соколова, А. Я. Кузнецов.** Опт.-мех. промышленность, **12** (1969)