

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТА, ОТРАЖЕННОГО ЗАЩИТНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

© 2019 г. А.И. Потапов¹, В.Е. Махов², В.Т. Прокопенко³, Я.Г. Смородинский^{4,5,**}

¹Санкт-Петербургский горный университет, Россия 199106 Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2

²Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Россия 197198 Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13

³Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Россия 197101 Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, 49

⁴ИФМ УрО РАН, Россия 620108 Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18

⁵Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина, Россия 620002 Екатеринбург, ул. Мира, 19

E-mail: *wmahov@gmail.ru; **sm@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 11.03.2019; после доработки 26.04.2019

Принята к публикации 17.05.2019

Проведены исследования зависимости поляризационных характеристик отраженного света различными поверхностями. Проведен анализ неоднородной системы методом секционирования и физико-математического моделирования структуры, при этом используются модели «эффективной подложки» или «эффективного слоя». Разработана методика измерений поляризации отраженного излучения и проведены экспериментальные исследования их поляризационных характеристик. Показано, что для всех образцов азимут поляризации отраженного света уменьшается с увеличением угла падения излучения. Экспериментально установлено, что отраженный от исследуемых образцов свет остался практически линейно поляризованным.

Ключевые слова: поляризационная характеристика, эффективная подложка, эффективный слой, напряженно-деформированное состояние, метод физико-математического моделирования неоднородной структуры.

DOI: 10.1134/S0130308219070042

ВВЕДЕНИЕ

Контроль качества продукции позволяет оперативно определять отклонения технологических показателей от норм и своевременно принимать меры по их устранению. Именно контроль, как одно из эффективных средств достижения намеченных целей и важнейшая функция управления, способствует правильному использованию объективно существующих, а также созданных человеком предпосылок и условий выпуска продукции высокого качества. От степени совершенства контроля качества, его технического оснащения и организации во многом зависит эффективность производства в целом.

Одним из широко распространенных методов контроля является визуальный контроль качества. Такого рода задачи возникают в системах неразрушающего контроля качества, требующих выделения неоднородности физико-технических параметров изделия. В подавляющем большинстве известных устройств, решающих эту задачу, положен принцип измерения мощности сигнала, определяемой свойствами отражающей поверхности объекта и фона, на котором этот объект находится [1]. Вследствие возможного сходства отражательной способности объектов, отличающихся физико-техническими характеристиками, выделение неоднородности на общем фоне, может быть затруднено. Такого рода ситуация определяет необходимость поиска дополнительных отличительных признаков, одним из которых может служить поляризация отраженного излучения.

Действительно, если рассматривать различные наиболее часто используемые способы описания векторных характеристик световой волны с помощью вектора Стокса, то можно заметить, что энергетическая характеристика — интенсивность является лишь одним из параметров, отображающих полную характеристику поляризации [2]. Дополнив информацию об объекте, построенную на основе энергетических характеристик, информацией, использующей векторные характеристики световой волны, появляется возможность увеличить надежность (вероятность) обнаружения неоднородности свойств контролируемого объекта.

При проектировании оптико-электронных систем (ОЭС), обеспечивающих высокопроизводительный объективный контроль качества, необходима информация о состоянии поляризации света, отраженного различного рода объектами.

С целью повышения достоверности информации об объекте учет векторных характеристик световой волны ставят в разряд актуальных задач проведения неразрушающего контроля. При определении качества защитных покрытий актуально иметь результаты исследования зависимости поляризационных характеристик отраженного света от различных поверхностей в зависимости от характеристик поверхности. Установленные различия в поляризации отраженного излучения позволяют разработать принципы и построения опико-электронных средств неразрушающего контроля покрытий и создать методики измерений поляризации отраженного излучения от таких объектов.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

подавляющее большинство изделий, с которыми приходится иметь дело в повседневной жизни, как правило, имеют защитные покрытия. Часто это связано с необходимостью защиты поверхности от внешнего воздействия либо с необходимостью придания этой поверхности определенных эстетических свойств. Качество покрытий при неразрушающем контроле определяется ОЭС, основанное на анализе величины отраженной энергии, в том числе с учетом спектральных характеристик (цвета). Однако этих двух параметров может быть недостаточно для получения достоверной и своевременной информации об исследуемом объекте.

Широкий класс лакокрасочных покрытий с точки зрения объекта, подлежащего оптическим исследованиям, можно представить в виде плоского диэлектрического слоя, толщина которого значительно превышает длину волны инструментального источника излучения.

В силу технологических особенностей нанесения покрытий в диэлектрическом слое возникают напряжения, присутствие которых может оказывать воздействие на характер поляризации отраженного излучения.

Это приводит к необходимости решения целого ряда взаимосвязанных задач, в том числе: выбора метода математического моделирования напряженно-деформированного и физико-химического состояния многослойной системы «однородная подложка (ОП₁) — неоднородный слой (ПС₁) — зона оптического контакта (ЗОК) поверхности элементов (I, II) — неоднородный слой (ПС₂) — однородная подложка (ОП₂)» и методики определения ее поляризационно-оптических характеристик, которые, в общем случае, должны решаться в рамках теории эллипсометрии неоднородных анизотропных оптических систем [3—6].

МОДЕЛЬ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

На рис. 1 представлены основные оптические схемы для анализа напряженно-деформированного состояния и поляризационно-оптических характеристик оптических соединений элементов оптоэлектроники методами просветной, отражательной (рис. 1а) эллипсометрии (рис. 1б).

В используемых интерференционных методах технологического контроля напряженно-деформированного состояния прозрачного изотропного диэлектрика, как правило, применяется упро-

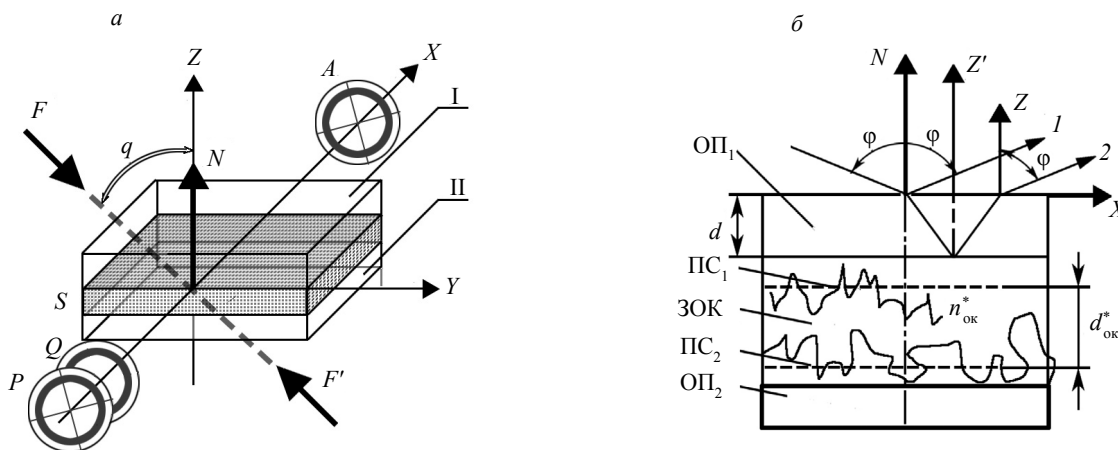


Рис. 1. Оптические схемы напряженно-деформированного состояния оптических соединений элементов оптоэлектроники.

ценная модель плоскопараллельной пластинки одноосного кристалла, оптическая ось которого перпендикулярна световому пучку света и находится в плоскости ее параллельных поверхностей [7—9]. В пределах границ применимости теории упругой деформации и напряженного состояния оптической детали изменение показателя преломления $\Delta n(\sigma)$ для одностороннего «растяжения» или «сжатия» в первом приближении будет пропорционально величине напряжения σ [10]:

$$n - n_{pN} = \Delta n_{pN} = \pm C_1 \sigma, \quad n - n_{sN} = \Delta n_{sN} = \pm C_2 \sigma, \quad (1)$$

где n — показатель преломления силикатного стекла; n_{pN} , n_{sN} — показатели преломления для поляризованного света с электромагнитными колебаниями, параллельными (p) и перпендикулярными (s) направлению действия напряжений; C_1 и C_2 — фотоупругие постоянные стекла для тех же направлений электромагнитных колебаний. В теории упругой деформации детали напряжения «сжатия» принято считать отрицательными, а напряжения «растяжения» — положительными, $\Delta n = n_{pN} - n_{sN}$.

Метод эллипсометрии обладает высокой чувствительностью к изменению двулучепреломления $\Delta n = n_{pN} - n_{sN}$, вызванного напряженно-деформированным состоянием детали в оптическом узле, и позволяет определить направление воздействия напряжений q (или механической нагрузки F) в области зоны оптического соединения (ОС) деталей (см. рис. 1а).

Для изотропных диэлектриков, находящихся в напряженно-деформированном состоянии, измерение основных эллипсометрических параметров — азимута линейной восстановленной поляризации Ψ и разности фаз Δ между p - и s - компонентами светового пучка — можно проводить в отраженном световом пучке. Наибольшая точность измерения поляризационных параметров достигается при использовании метода «нулевой» (компенсационной) эллипсометрии, суть которого состоит в том, что азимуты поляризующих элементов прибора (поляризатора P , компенсатора Q , анализатора A) фиксируются в момент «гашения» светового пучка, прошедшего оптическую схему прибора и объект измерения S (см. рис. 1а). В этом случае поляризационные характеристики объекта S можно определить в результате решения нелинейного уравнения [7]:

$$-\operatorname{tg} A_1 = \rho_s [\rho_c + \operatorname{tg} Q_1 \operatorname{tg} P_1] \cdot [\rho_c \operatorname{tg} Q_1 - \operatorname{tg} P_1]^{-1}, \quad (2)$$

$$A_1 = A - q, Q_1 = Q - q, P_1 = Q - P, \quad \rho_s = \left| \frac{T_s^{(p)}}{T_s^{(s)}} \right| \exp i \delta_s, \quad \rho_c = \left| \frac{T_c^{(p)}}{T_c^{(s)}} \right| \exp i \delta_c. \quad (3)$$

Здесь $T_c^{(p,s)}$, $T_s^{(p,s)}$ и δ_c , δ_s — коэффициенты пропускания и разность фаз между p - и s -поляризацией светового пучка для компенсатора Q и объекта S соответственно; q — ориентация главной плоскости падения светового пучка в анизотропной оптической системе [10], где значение угла q определяет направление действия сил F «растяжения» или «сжатия» относительно нормали N к поверхности (см. рис. 1а, линия FF'). При азимуте ориентации осей компенсатора относительно плоскости падения светового пучка (плоскость XOZ) $Q = \pm \pi/4$ и значения $\rho_c = i$, основные эллипсометрические параметры объекта исследования (δ_s , q) при нормальном падении светового пучка вдоль зоны ОС деталей определяются соотношениями:

$$q = (0,5 \operatorname{tg}[-\cos 2A(\sin 2A + \sin 2P)]^{-1}), \quad \delta_1 = \operatorname{arctg}[-(\operatorname{tg} 2P \cos 2q)^{-1}]. \quad (4)$$

Для модели напряженно-деформированного состояния изотропного прозрачного диэлектрика, представленной в виде плоскопараллельной пластинки одноосного кристалла, фазовый сдвиг определяется как $\delta_s = \delta_{s,0} + \delta_1$, где поправка δ_1 учитывает многократные отражения от поверхностей объекта исследования [8]. При малой величине Δn_{pN} и Δn_{sN} значение фазового параметра $\delta_{s,0} \gg \delta_1$, тогда для определения величины напряжений σ в исследуемом слое можно использовать следующие соотношения:

$$\Delta n_{p,s} = n_{pN} - n_{sN} = \pm(C_1 - C_2) \cdot \sigma = B \cdot \sigma = \delta_{s,0} / (k_0 L), \quad (5)$$

где $k_0 = 2\pi/\lambda$, B — оптический коэффициент напряжений; λ — длина волны излучения; L — длина объекта измерений S вдоль оси X (см. рис. 1а).

Для оценки качества исследуемых элементов при различных технологических условиях их изготовления определение поляризационно-оптических характеристик можно проводить двумя

путями: методом секционирования и физико-математического моделирования структуры неоднородной системы, используя при этом модели «эффективной подложки» или «эффективного слоя» [8, 9]. В методе «эффективной подложки» многослойная система ПС₁—ЗОК—ПС₂—ОП₂ (см. рис. 1б, луч 2) описывается эффективным показателем преломления N_{oc}^* , который для анизотропной однородной подложки при $q \approx 0$ можно определить как $N_{oc}^* = \sqrt{n_{pN} n_{sN}}$. Критерием применимости данного способа моделирования оптической системы является условие [9]:

$$\Phi(N_{oc}) = (\rho_s + \cos 2\varphi_s) \cdot (R_s^{(s)} + R_s^{(p)} \cos 2\varphi_s)^{-1}, \quad (6)$$

$$\rho_s = R_s^{(p)} / R_s^{(s)} = \operatorname{tg} \Psi \cdot \exp(i\Delta),$$

где $\rho_s, R_s^{(p)}, R_s^{(s)}$ — эллипсометрическое отношение и коэффициенты отражения для p - и s -компоненты поляризованного света от исследуемой поверхности; φ_s — угол падения светового пучка; Δ, Ψ — основные эллипсометрические параметры многослойной системы ПС₁—ЗОК—ПС₂—ОП₂.

Для однородной изотропной подложки выполняется условие $|\Phi(N_{oc}^*)| = 1$ и отличие этого параметра для системы ПС₁—ЗОК—ПС₂—ОП₂ от единицы будет свидетельствовать о влиянии оптической неоднородности, анизотропии или шероховатости элементов. Экспериментальная ошибка измерения параметра, в пределах которой неоднородную отражающую систему можно заменить моделью «эффективной подложки», — $\delta\Phi(N_{oc}^*) \sim 5 \cdot 10^{-4}$ [9].

В методе «эффективного слоя» для системы ПС₁—ЗОК—ПС₂ вводятся эффективный показатель преломления n^* и толщина d^* неоднородной оптической системы (см. рис. 1б). Физический смысл этих параметров состоит в том, что модель однородного слоя с параметрами n^* и $d_{ок}^*$ и исследуемое диэлектрическое покрытие по своим поляризационно-оптическим свойствам эквивалентны. В рамках этой модели можно описывать анизотропные свойства деталей, используя при этом методы эллипсометрических измерений элементов нормированной матрицы отражения $M = (\rho_{pp}, \rho_{ps}, \rho_{sp})$ объекта S [10].

В общем случае эллипсометрические параметры элементов нормированной матрицы отражения $\rho_{pp}, \rho_{ps}, \rho_{sp}$ будут отличаться от измеренных значений $\rho_{изм}$ (см. рис. 1б, луч 2) за счет преломления светового пучка на границах раздела «внешняя среда — ОП₁» и «ОП₁ — внешняя среда» на величину эллипсометрического отношения $\rho^{(T)} = T^{(p)}/T^{(s)}$. При малой величине анизотропии однородной подложки ОП₁ ($\Delta n(p,s) \ll 10^{-6}$) и измеренном значении коэффициента эллиптичности отраженного светового пучка от однородной подложки ОП₁) (см. рис. 1б, луч 1) эллипсометрические соотношения для нахождения параметров $\rho_{pp}, \rho_{ps}, \rho_{sp}$ имеют вид:

$$\rho_{pp} (\rho^{(T)})^2 = \rho_{pp}^{изм}, \quad \rho_{ps}^{(T)} = \rho_{pp}^{изм}, \quad \rho_{sp}^{(T)} = \rho_{sp}^{изм}, \quad (7)$$

$$\operatorname{tg} \Psi^{(T)} = \left(\frac{n_0(U_0^{(s)} + U_B^{(s)})}{n_B U_0^{(s)} + n_0^2 \cos \varphi} \right), \quad \Delta^{(T)} = \pm 4\chi \frac{n_B(n_0^2 - n_B^2) \sin^2 \varphi}{\sqrt{n_B^2 + n_0^2(n_0^2 \cos^2 \varphi + n_B U_0^{(s)})}}, \quad (8)$$

$$U_B^{(s)} = \sqrt{\varepsilon_B} \cos \varphi, \quad U_0^{(s)} = (\varepsilon_0 - \varepsilon_B \sin^2 \varphi)^{1/2}, \quad (9)$$

где n_B, n_0 — показатель преломления внешней среды и однородной подложки; (φ — угол падения светового пучка; χ — эллиптичность светового пучка, отраженного при угле Брюстера $\varphi_B = \arctg(n_0/n_B)$ (при изменении угла падения светового пучка $\varphi > \varphi_B$ значение $\Delta^{(T)} > 0$ и при $\varphi < \varphi_B - \Delta^{(T)} < 0$ [10]). В том случае, когда главная плоскость анизотропной системы совпадает с плоскостью падения светового пучка, то есть при $q \approx 0$, параметры $\rho_{ps} = \rho_{sp} = 0$, а эллипсометрическое отношение ρ_s , входящее в уравнение (2), определяется как

$$\rho_a = \rho_{pp} = R^{(p)} / R^{(s)} = \operatorname{tg} \Psi \cdot \exp(i\Delta), \quad \operatorname{tg} \Psi = \operatorname{tg} \Psi^{изм} / (\operatorname{tg} \Psi^{(T)})^2, \quad \Delta = \Delta^{изм} \pm \Delta^{(T)}. \quad (10)$$

Из вышеизложенного видно, что с помощью техники эллипсометрии можно измерить даже весьма незначительные изменения амплитудно-фазовых соотношений в отраженной волне, связанных с особенностью исследуемого объекта. Однако эллипсометрические измерения сложны и трудоемки, что не позволяет непосредственно их использовать в системах экспресс контроля качества.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Из вышеизложенного следует, что для разработки эффективных систем обнаружения дефектов поверхности, построенных на поляризационном контрасте, необходима информация о влиянии защитных покрытий на характер поляризации отраженного ими излучения.

В связи с этим, актуальной задачей исследования является разработка методики измерений поляризации отраженного излучения от такого рода объектов.

Измерения поляризационных характеристик отраженного света выполняли на экспериментальной установке, собранной на основе гониометра ГС-5, функциональная схема которой представлена на рис. 2. Излучение He-Ne лазера 1 с высокой степенью линейно-поляризованного света, азимут которого по отношению к плоскости падения света на образец составляет 45° . Это обеспечивает идентичность характеристик *p*- и *s*-компонент в падающем луче. В модуляторе Фарадея 2 под действием переменного магнитного поля азимут линейно-поляризованного света изменяется относительно своего первоначального положения на угол $\pm 1^\circ$ с частотой 500 Гц. Если плоскость поляризации призмы анализатора 5 ортогональна плоскости поляризации лазерного излучения, то на фотоприемник падает минимальный поток модулированной интенсивности с удвоенной частотой, то есть $f = 1000$ Гц.

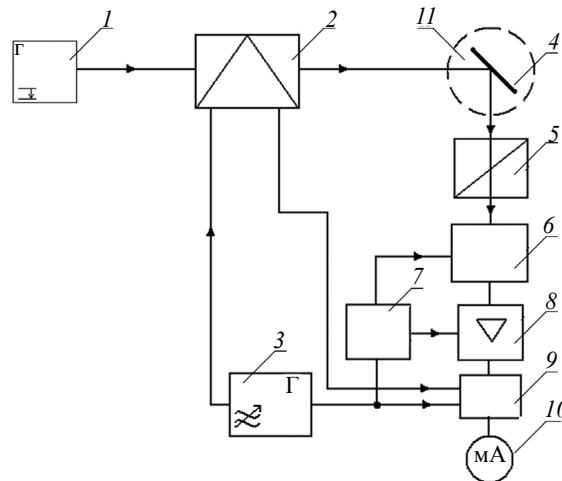


Рис. 2. Функциональная схема экспериментальной установки:

1 — лазер, 2 — модулятор (ячейка Фарадея), 3 — генератор, 4 — образец, 5 — анализатор (призма Глана), 6 — фотоприемник, 7 — блок питания, 8 — усилитель избирательный 500 Гц, 9 — фазовый детектор, 10 — микроамперметр М-95, 11 — предметный столик гониометра.

Равенство нулю электрического сигнала, поступающего на вход усилителя, указывает на то, что плоскость пропускания поляризационной призмы ориентирована строго под углом 90° к плоскости поляризации лазерного излучения. Если анализатор повернут вокруг своей оси на малый угол σ , то возникает рассогласование системы, и в каждый полупериод на ФЭУ 8 поступает неодинаковое количество излучения, которое преобразуется в ток с различной амплитудой. После соответствующего усиления и преобразования сигнал поступает на регистрирующий прибор в виде информационного сигнала о рассогласованности системы. Этот (полезный) сигнал усиливается узкополосным усилителем 8, настроенным на частоту полезного сигнала $f = 500$ Гц. Напряжение полезного сигнала воздействует на фазовый детектор 9, основная задача которого состоит в том, чтобы по фазе сигнала, поступающего на него, определить направление угла рассогласования относительно скрещенного положения анализатора и плоскости поляризации излучения. Анализатор представляет собой призму Глана, азимут которого устанавливается с помощью оптического микрометра с точностью 10 угловых минут. Ток ФЭУ регистрируется с помощью микроамперметра 10.

Образец 4 установлен на предметном столике гониометра 11, что позволяет изменять угол падения света на образец от 0 до 90° . Метод измерения заключается в изменении угла падения падающего излучения лазера на образец и регистрации азимута поляризации отраженного света от него.

В соответствии с задачей разработки методики для исследования влияния защитных покрытий на состояние поляризации отраженного излучения были исследованы образцы акриловых покрытий, оксидированная алюминиевая пластина. Для исключения влияния подложки на резуль-

тат эксперимента, акриловые покрытия выполнены на стеклянной полированной подложке [11]. Покрытия выполнены по технологии естественного высыхания. В качестве первого образца выбран бесцветный нитролак. Образцы 2, 3, 4 — это акриловые краски на водной основе белого, красного и желтого цвета соответственно. В качестве пятого образца выбрана оксидированная алюминиевая пластина.

Для первого образца зависимость азимута поляризации отраженного света от угла падения почти линейная. При изменении угла падения от 25 до 50° азимут поляризации изменяется на 25°.

Для углов падения 70 и 75° азимуты поляризации для всех образцов практически одинаковы. Несмотря на цветовое различие образцов 2, 3, 4, графики зависимости очень схожи друг с другом. График (рис. 3б) зависимости поляризационного контраста (Δ) образца 5 сильно отличается от всех остальных. Это связано с тем, что в качестве образца 5 выбрана металлическая дюралевая оксидированная пластина.

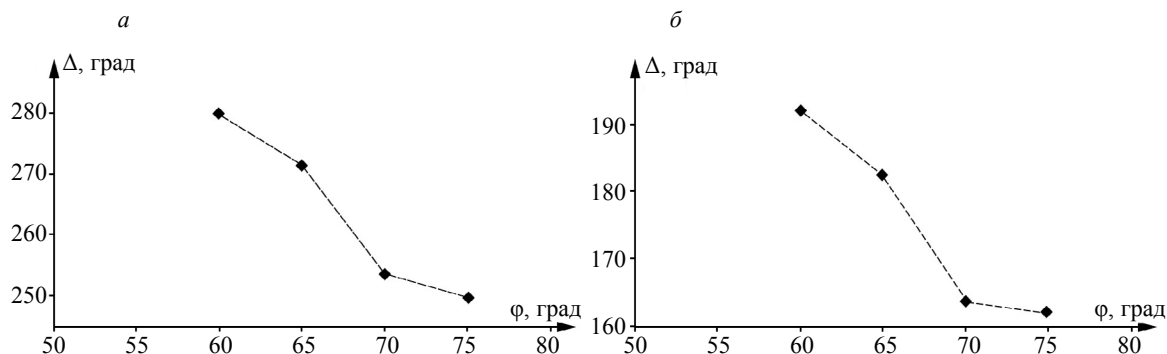


Рис. 3. Зависимости поляризационного контраста от угла падения пучка света.

Неизбежным вопросом остается повышение точности измерения в условиях факторов шума. Проведение измерения в условиях когерентного излучения [12] показало, что эффективными являются фазовые измерения [13], а так же интегральные методы обработки выборки сигналов (информации) на основе вейвлет-анализа [14]. Другая проблема при построении ОЭС для практического использования — механическая стабильность объекта контроля и оптико-электронной системы [15], что требует введения дополнительных программных средств контроля и диагностики состояния оптико-электронных системы [16] в процессе проведения измерений. В заключение можно отметить, что результаты исследования можно применить к широкому классу материалов, в том числе для газотермических покрытий [17].

ВЫВОДЫ

Исследование зависимости характеристик поляризации отраженного излучения от величины угла падения позволяет сделать вывод: для всех образцов азимут поляризации отраженного света уменьшается с увеличением угла падения излучения. При этом, отраженный от образцов свет остался практически линейно поляризованным.

Установленные различия в поляризации отраженного исследуемыми образцами света показывают, что векторные характеристики отраженного излучения могут быть использованы при разработке автоматизированных оптико-электронных средств неразрушающего контроля покрытий.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», № АААА-А18-118020690196-3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волохатюк В.А. Кочетков В.М. Вопросы оптической локации. М.: Сов. радио, 1971. 256 с.
2. Азам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет / Пер. с англ. под ред. чл.-корр. АН СССР А.В. Ржанова и К.К. Свиташева. М.: Мир, 1981. 583 с.
3. Обреимов И.В., Трехов Е.С. Оптический контакт полированных стеклянных поверхностей // ЖЭТФ. 1957. Т. 32. Вып. 2. С. 185—192.
4. Абаев М.И., Лисицын Ю.В., Путилин Э.С. Исследование зоны оптического контакта стеклянных поверхностей методом эллипсометрии // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 4. Вып. 24. С. 1505—1507.

5. Герасимов С.Ю., Компалова Л. А., Торбин И.Д. Прозрачность оптических клеев // ОМП. 1987. № 9. С. 40—44.
6. Левинок В.Е. Влияние условий полимеризации однокомпонентного оптического клея на свойства склеиваемого слоя // ОМП. 1980. № 6. С. 24—26.
7. Горшков М.М. Эллипсометрия. М.: Сов. радио, 1974. 200 с.
8. Эллипсометрия — метод исследования поверхности / Под ред. А.В. Ржанова. Новосибирск: Наука, 1983. 180 с.
9. Эллипсометрия: теория, методы, приложение / Под ред. А.В. Ржанова и Л.А. Ильина. Новосибирск: Наука, 1987. 192 с.
10. Филиппов В.В., Тронин А.Ю., Константинов А.Ф. Эллипсометрия анизотропных сред / Физическая кристаллография. М., 1992. С. 254—289.
11. Березина Е. Е. Фотоупругие постоянные оптических стекол // Оптич. журн. 1994. № 7. С. 38—39.
12. Махов В.Е., Репин О.С., Потапов А.И. Измерение линейных размеров системами технического зрения в когерентном свете // Контроль. Диагностика. 2014. № 4. С. 12—19.
13. Махов В.Е., Потапов А.И. Гетеродинно-растровый метод контроля качества изделий // АН СССР. Дефектоскопия. № 10. 1989. С. 68—84.
14. Махов В.Е., Потапов А.И. Использование алгоритмов вейвлет-анализа для построения оптических измерительных систем // Контроль. Диагностика. 2013. № 1. С. 12—21.
15. Махов В.Е., Потапов А.И. Исследование измерительной оптической системы в условиях механической нестабильности объекта контроля // Контроль. Диагностика. 2013. № 2. С. 12—23.
16. Махов В.Е., Потапов А.И. Использование вейвлет-анализа для диагностики системы технического зрения // Контроль. Диагностика. 2011. № 9. С. 11—18.
17. Olt Y., Maksarov V.V., Krasnyi V.A. Provision of adhesion strength of gasthermal coatings on piston rings of quarry transport engines // Journal of Mining Institute. 2018. V. 229. P. 77—83.