ФИЗИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 681.7.02 PACS: 81. 81.07.-b

Исследование влияния качества поверхностей оптических подложек на эксплуатационные характеристики тонкопленочных покрытий

Д. Г. Денисов, О. Ф. Просовский, Ю. О. Просовский

Анализируются основные результаты работы современной технологической системы нанесения и контроля оптических покрытий на подложки с различной степенью шероховатости по данным регистрации характеристик индикатрисы рассеянного лазерного излучения. Рассматриваются особенности приближений метода дифференциального рассеяния, используемого для оценки статистических параметров профилей оптических подложек: спектральной плотности корреляционной функции (СПКФ) и эффективного среднеквадратического отклонения (СКО) – $\sigma_{эф}$. Приводятся основные характеристики рассеянного лазерного излучения от поверхностей оптических подложек с различным уровнем шероховатости. Обсуждаются результаты экспериментальных исследований, посвящённые влиянию качества поверхностей оптических подложек на эксплуатационные характеристики различных пленкообразующих материалов оптических покрытий, нанесённых с ионным ассистированием и без него. На основании проведенного эксперимента исследуются возможности снижения светорассеяния и нивелирования неровностей поверхностей подложек с различной степенью шероховатости.

Ключевые слова: шероховатая оптическая поверхность, статистические характеристики профиля оптической поверхности, спектральная плотность корреляционной функции, эффективное среднеквадратическое отклонение, характеристики индикатрисы рассеянного лазерного излучения, метод дифференциального рассеяния, оптические покрытия.

Ссылка: *Денисов Д. Г., Просовский О. Ф., Просовский Ю. О.* // Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 4. С. 282.
Reference: D. G. Denisov, O. F. Prosovsky, and Yu. O. Prosovsky, Usp. Prikl. Fiz., **8** (4), 282 (2020).

Введение

На сегодняшний день применение современных и перспективных оптических изделий конструкционной и приборной оптики, немыслимо без использования тех или иных видов покрытий на их поверхности. Так, например, прочно вошли в жизнь покрытия, модифицирующие поверхность изделий. Модификация поверхности позволяет сделать изделие более устойчивым к воздействию внешних факторов (истиранию, воздействию агрессивных веществ), улучшить оптические свойства (на основе физического эффекта просветления), придать принципиально новые оптические свойства лазерному излучению, взаимодействующему с поверхностями изделия (управлять состоянием поляризации излучения, производить фильтрацию излучения по тем или иными параметрам и т. д.).

Одной из самых важных характеристик является чистота оптической поверхности,

Денисов Дмитрий Геннадьевич[1], к.т.н., доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы».
Просовский Олег Федорович[2], нач. лаб.
Просовский Юрий Олегович[1,2], магистрант, сотрудник лаб.
[1] МГТУ им. Н. Э. Баумана.
Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5.
E-mail: denisov_dg@mail.ru
[2] АО ОНПП «Технология».
Россия, 249031, г. Обнинск, Калужская область, Киевское шоссе, 15.

Статья поступила в редакцию 02 сентября 2020 г.

© Денисов Д. Г., Просовский О. Ф., Просовский Ю. О., 2020

определяемая классом оптической чистоты и уровнем остаточной шероховатости. Эксплуатационные свойства оптических деталей напрямую связаны с этим параметром. Невозможно получить качественное оптическое изделие, если его оптические поверхности имеют остаточную шероховатость, царапины или поверхностные включения. В связи с чем представленные в работе исследования нацеленные на анализ влияния качества поверхностей оптических подложек, определяемое остаточными поверхностными неоднородностями на результаты измерений характеристик индикатрисы рассеянного излучения, являются важными и актуальными.

Методика, используемая в работе

В настоящее время, существует несколько основных методов нанесения покрытия. Существуют как методы нанесения покрытия при помощи испарения, так и при помощи распыления [1–3]. Методы нанесения покрытия при помощи испарения являются более простыми в эксплуатации, но при этом менее точными. Методы нанесения покрытия при помощи распыления являются более точными, перспективными, но в то же время и более дорогостоящими. Не менее важным параметром в производстве оптических покрытий является их воспроизводимость от процесса к процессу, а также определение оптических констант при помощи интегрированных в технологическую систему нанесения оптических покрытий оптических методов [1–3]. На сегодняшний день, активно используются методы широкополосного и монохроматического контроля (см. рис. 1).

Важно отметить, что системы широкополосного и монохроматического контроля используются в оптической промышленности в равной степени. Каждая из данных систем обладает своими особенностями. Так, система монохроматического контроля обладает большей точностью, в то время как система широкополосного контроля позволяет нивелировать ошибки многослойных конструкций уже нанесенных слоев при помощи пересчета оставшихся слоев.

На сегодняшний день, так же, можно выделить классификатор по двум основным типам систем контроля оптических постоянных покрытий: косвенного и прямого контроля [1–3].

Системы косвенного контроля постепенно вытесняются более современными и перспективными системами прямого контроля толщины напыляемых оптических покрытия.

а) *б*) *в*)

Рис. 1. Конструктивные элементы широкополосного контроля оптических констант оптических покрытий: а) магнитный энкодер; б) встроенный спектрофотометр; в) фокусировочно-юстировочная система световода.

На рис. 1, *а–в* приведена техническая реализация широкополосной системы контроля на производственной площадке «Технология» (г. Обнинск). На рис. 1, *а* показан магнитный энкодер, отвечающий за вращение и за запуск измерения в одной и той же части подложкодержателя. Рис. 1, *б* демонстрирует спектрофотометр, на который по световоду подается

прошедшее излучение. Спектрофотометр обрабатывает регистрируемое излучение и выводит на экран оператора спектральную зависимость пропускания в реальном времени, что позволяет корректировать нанесение покрытия не останавливая технологический процесс. На рис. 1, *в* приведена фокусировочно-юстировочная система световода, целью которой является фокусировка прошедшего излучения в канал световода для последующей передачи излучения на спектрометр.

С целью практического анализа влияния поверхностных неоднородностей профилей используемых подложек на качество наносимых оптических покрытий в работе были рассмотрены методы диагностики индикатрисы рассеянного лазерного излучения [4–7].

В мировой практике методы, основанные на анализе характеристик индикатрисы рассеянного лазерного излучения классифицируются, как [4–7]: методы полного интегрального рассеяния (TIS – Total Integrated Scattering), модификации метода определения функции распределения коэффициента отражения по двум угловым координатам (метод определения характеристики BRDF – Bidirectional Reflectance Distribution Function), методы дифференциального рассеяния (ARS – Angle-Resolved Scattering), а также метод динамического дифференциального рассеяния в изменяющийся телесный угол регистрирующего фотоприёмного устройства.

Оптико-электронные приборы (ОЭП), принцип действия которых основан на выше приведённых методах обладают существенным преимуществом по сравнению с существующими динамическими интерференционными системами с точки зрения высокоточного контроля высотных и латеральных параметров регистрируемых профилей в широком пространственно-частотном диапазоне.

Одним из методов измерения шероховатости сверх гладких поверхностей, высота микронеровностей которых составляет менее 1 нм, является метод дифференциального рассеяния (ARS), основанный на приближениях малых поверхностных возмущений (MB).

Аппаратная реализация данного метода в настоящее время ограничена небольшой номенклатурой выпускаемых опытных макетных образцов (см. рис. 2).

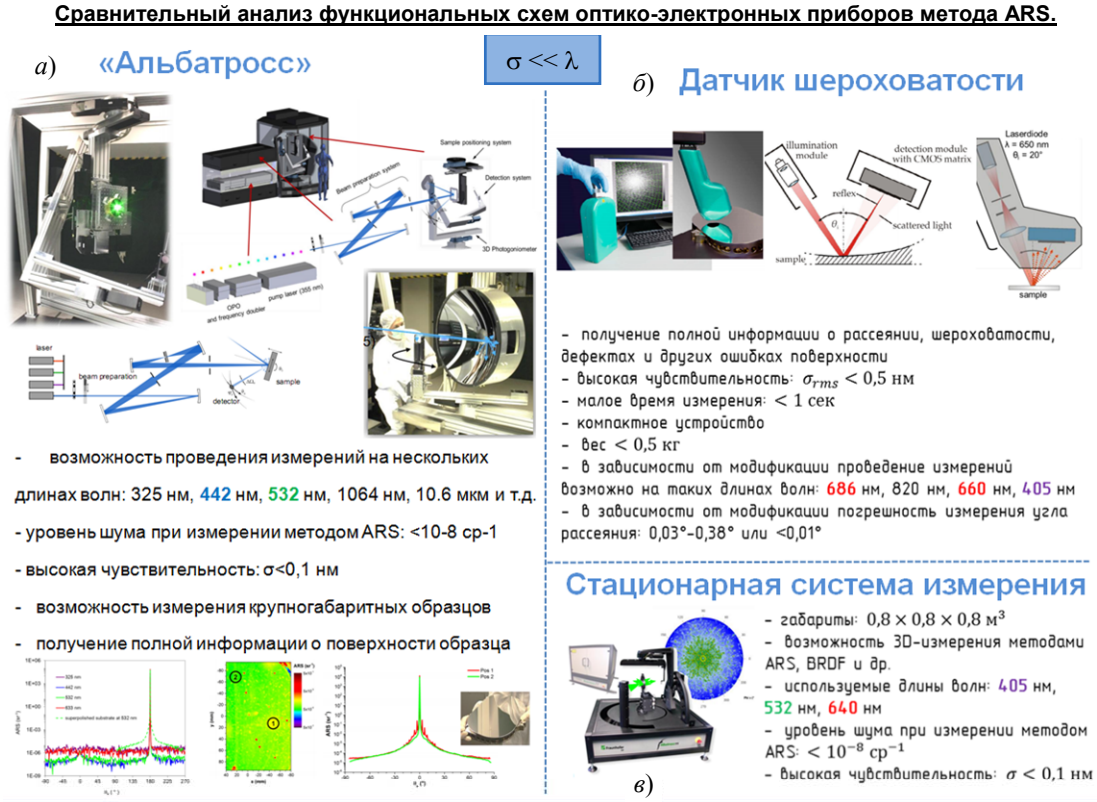

Рис. 2. Сравнительный анализ функциональных схем ОЭП, основанных на идеологии метода ARS: а) – ОЭП «Альбатросс»; б) – Оптико-электронный (ОЭ) датчик шероховатости; в) – ОЭ стационарная система измерения параметров шероховатости.

Суть метода дифференциального рассеяния, лежащий в основе представленных на рис. 2 схемотехнических решений состоит в измерении углового распределения поверхностного рассеяния электромагнитного излучения, связанного с шероховатостью и неоднородностью контролируемого профиля оптической поверхности. Чувствительность метода позволяет измерять интенсивности рассеяния, соответствующие величине эффективной среднеквадратической шероховатости на уровне сотых нанометров. Высокая чувствительность метода (по углу рассеяния менее 10^{-8} $ср^{-1}$, что для кварцевой подложки, имеющей френелевский коэффициент отражения порядка 4 % соответствует эффективному СКО – $\sigma_{эф} \approx 0{,}1$ ангстрема также относительная простота измерений, отсутствие контактного воздействия на исследуемую поверхность, большая информативность делают метод дифференциального рассеяния одним из наиболее перспективных методов метрологического контроля сверхпрецизионных оптических поверхностей.

Однако, наряду с приведёнными достоинствами, следует отметить, ряд особенностей метода, в частности, чувствительность функциональных схем ОЭП к шумам электронного тракта аппаратуры, рассеянию лазерного излучения на молекулах (рассеянию Рэлея), а так же к ограничению по углам подсвета и контроля (аппаратные ограничения). В частности, последний фактор, определяющий угловые ограничения, достаточно существенно урезает пространственные частоты при диагностике поверхностных неоднородностей субнанометрового уровня.

Для сверхгладких профилей оптических подложек на которые наносятся слои оптического покрытия справедливо условие $\sigma_{эф} << \lambda$ (где λ – длина электромагнитной волны), соответствующее приближениям метода МВ: $\sigma_{эф} << \lambda \cos\theta_0$, $\sigma_{эф} << l_к$ (где $l_к$ – длина корреляции исследуемого профиля оптической подложки). В этом случае геометрия задачи дифракции (рассеяния) сводится к рассеянию плоской электромагнитной монохроматической волны на оптической поверхности со статистическими высотными показателями профиля и флуктуациями диэлектрической проницаемости [1–4] (см. рис. 3).

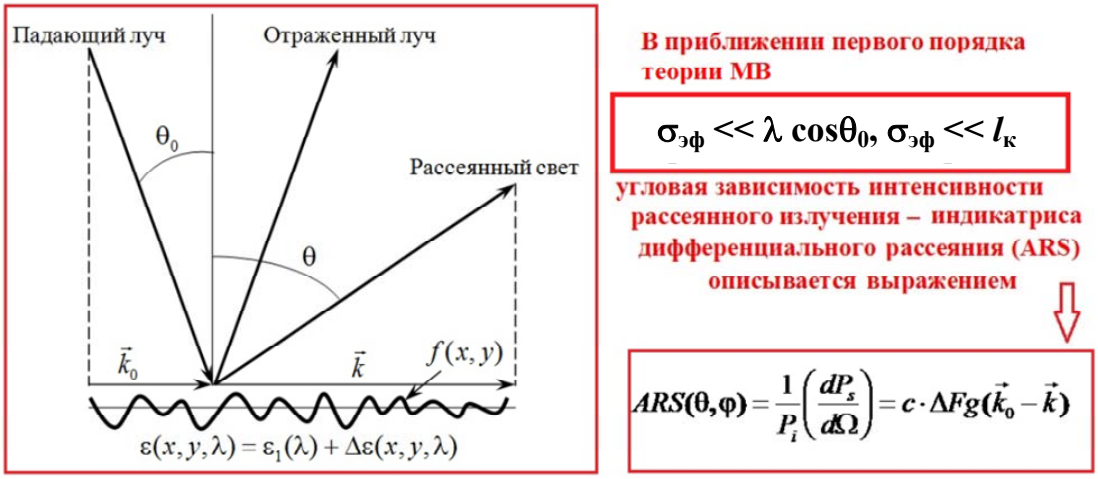

Рис. 3. Геометрия метода дифференциального рассеяния при регистрации выходного параметра ОЭП – индикатрисы рассеяния лазерного излучения профилем субнанометрового уровня ($\sigma_{эф} << \lambda$) исследуемой поверхности.

В соответствие с представленной геометрией (рис. 1) рассмотрим плоскую электромагнитную монохроматическую волну с частотой ω и волновым вектором $\vec{k}$:

$$\vec{E}(r) = \vec{E}_0 \exp\left(-i\omega t + i\vec{k}\vec{r}\right), \qquad (1)$$

падающую из вакуума под углом θ_0 на шероховатую поверхность с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_1(\lambda)$. Микропрофиль поверхности описывается случайной функцией $z = f(x,y)$, среднее значение которой равно нулю, т. е. в среднем поверхности является плоской $< f(x,y) >= 0$, а величина эффектив-

ного СКО высоты $\sigma_{эф}$ мало по сравнению с длиной волны оптического излучения λ и длиной корреляции $l_к$:

$$\begin{cases} \sigma_{эф} << \lambda \cos\theta_0 \\ \sigma_{эф} << l_к. \end{cases} \quad (2)$$

Стационарная задача рассеяния света шероховатой поверхностью состоит в решении волнового уравнения

$$\begin{cases} \Delta\vec{E}(r) + \varepsilon(r)\frac{\omega^2}{c^2}\vec{E}(r) = 0 \\ \varepsilon(r) = \begin{cases} 1, & z > f(x,y) \\ \varepsilon, & z < f(x,y) \end{cases} \end{cases}, \quad (3)$$

с граничными условиями на поверхности $z = f(x,y)$

$$\vec{E}_{n1} = \varepsilon\vec{E}_{n2}, \ \vec{E}_{t1} = \varepsilon\vec{E}_{t2}, \quad (4)$$

где индексы 1 и 2 относятся к вакууму и диэлектрику, а индексы n и t соответствуют нормальным и тангенциальным компонентам векторного поля.

При падении оптического излучения на поверхность, неровности профиля которой малы по сравнению с длиной волны (2), рассеянное поле может быть найдено из решения уравнения (3) методом теории МВ. Первый порядок возмущений, линейный по $f(x,y)$, соответствует рассеянию на микроструктурах без учета их наклона (для статистических высотных показателей субнанометрового уровня для длины волны электромагнитного излучения видимого спектрального диапазона). Вклад в рассеяние во втором порядке возмущений, который учитывает флуктуации наклона неровностей, пренебрежимо мал.

В приближении первого порядка теории МВ угловая зависимость интенсивности рассеянного излучения – индикатриса дифференциального рассеяния *ARS* описывается выражением:

$$ARS(\theta, \phi) = \frac{1}{P_i}\left(\frac{dP_s}{d\Omega}\right) = c \cdot \Delta F g\left(\vec{k}_0 - \vec{k}\right), \quad (5)$$

где P_i – мощность излучения, падающего на поверхность;

dP_s – мощность излучения, рассеянного в телесный угол $d\Omega$;

c – коэффициент пропорциональности (не зависит от рельефа поверхности);

ΔF – оптический фактор, зависящий от угловых позиций падающего (θ_0, ϕ_0) и рассеянного (θ, ϕ) излучений, диэлектрической проницаемости ε, поляризационных параметров падающего и рассеянного излучений;

$g(\ldots)$ – СПКФ (PSD – Power Spectral Density) – спектральная плотность корреляционной функции (функция спектральной плотности мощности шероховатой поверхности), нм^2×мм^2.

В рамках теории МВ устанавливается связь между спектральной плотностью мощности высот шероховатости PSD и индикатрисой рассеяния для шероховатой поверхности. PSD функция может быть получена из данных измерений ARS:

$$PSD(\nu) = \frac{1}{c \times \Delta F} \times ARS(\theta, \varphi), \quad (6)$$

где $n = \left(\sin(\Theta) - \sin(\Theta_0)\right)/\lambda$ – пространственная частота; λ – длина волны контроля, мкм; Θ – угол рассеяния электромагнитного излучения с поверхности подложки, град; Θ_0 – угол падения электромагнитного излучения на поверхность подложки, град.

В результате численное значение эффективного среднеквадратического отклонения профиля двумерной изотропной поверхности в заданном пространственно-частотном диапазоне определяется согласно:

$$\sigma_{эф} = \sqrt{2\pi \int_{\nu_{MIN}}^{\nu_{MAX}} PSD(\nu)\nu d\nu}, \quad (7)$$

где n_{MIN}, n_{MAX} – минимальная и максимальная пространственные частоты, определяющие границы заданного пространственно-частотного диапазона.

На практике предельные характеристики метода ARS оцениваются по тестовой поверхности с известными параметрами шероховатости.

С целью анализа влияния качества поверхностей оптических подложек на эксплуатационные характеристики наносимых тонкоплёночных покрытий, на основе представлен-

ного теоретического аппарата метода дифференциального рассеяния в работе проведены экспериментальные измерения светорассеивающей характеристики – двумерной функции ARS–BRDF от подложек с различным уровнем шероховатости их профилей.

Эксперимент и результат

Пусть имеется некоторая подложка. Как известно, любая поверхность, как бы она ни была хорошо отполирована, имеет неровности, характеризуемые шероховатостью поверхности. Излучение, падающее на поверхность подложки ($I_{пад}$), частично отражается ($I_{отр}$), а частично рассеивается в некоторый телесный угол $d\Omega$ (см. рис. 4, *а*, *б*). На поверхность подложки наносится однослойное покрытие, качество которого, как правило, в значительной степени определяется качеством поверхности подложки. Данная функциональная зависимость, а также влияние химического состава оптического покрытия и технологического способа его нанесения в значительной степени сказывается на характер распределения рассеянной в заданный телесный угол интенсивности оптического излучения (см. рис. 4, *а*, *б*).

Для проведения эксперимента, были отобраны 16 заготовок из стекла К8 с различным уровнем шероховатости (по 4 каждого типа):

- Ra = 0,54
- Ra = 1,41
- Ra = 2
- Ra = 3,07

На данные подложки наносились однослойные покрытия, изготовленные из следующих материалов:

- SiO_2
- Nb_2O_5

Помимо этого, данные покрытия наносились разными способами:

- с ионным ассистированием;
- без ионного ассистирования.

При выполнении эксперимента покрытия наносились в вакуумной установке электронно-лучевого типа ВАК-760. Фотография данной установки, показывающая ее устройство, приведена на рис. 5.

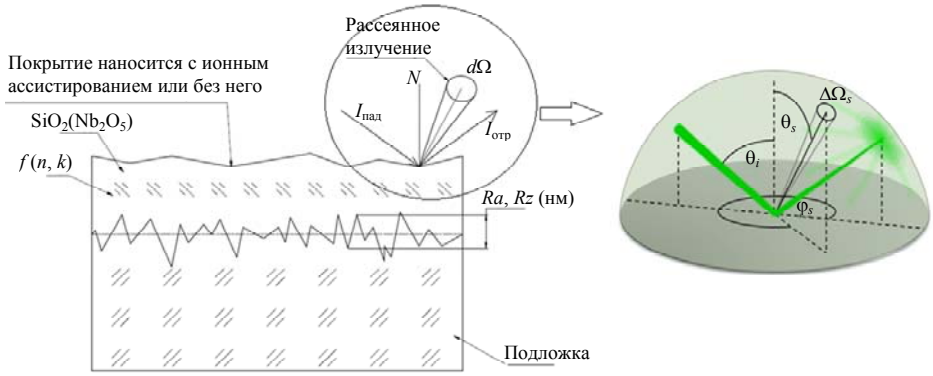

Рис. 4. Схема процесса рассеяния и регистрации интенсивности оптического излучения от оптической подложки с остаточным уровнем шероховатости: а) – структура подложки с нанесённым слоем оптического покрытия; б) – схема падения и регистрации интенсивности оптического излучения в заданный телесный угол.

Рис. 5. Внутрикамерное устройство используемой в эксперименте вакуумной камеры ВАК-760.

С целью оценки качества разработанной технологии нанесения и метода контроля тонкоплёночным оптических покрытий были проанализированы характеристики индикатрисы рассеяния лазерного излучения от образцов с различными оптическими покрытиями, нанесёнными на подложки с различной степенью шероховатости, используя полученную функциональную связь двунаправленной функцией рассеяния индикатрисы лазерного излучения с параметром шероховатости. Измерения были проведены на производственной площадке НПО им. Лавочкина на установке «Horos» (см. рис. 6, *а–в*).

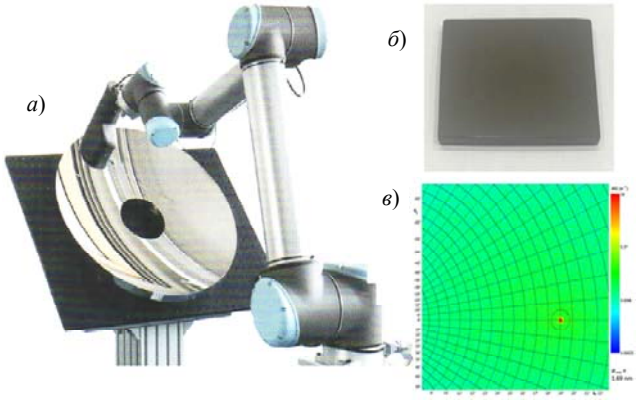

Рис. 6. Оборудование и результат экспериментальных исследований: а) – ОЭП для диагностики характеристик индикатрисы рассеянного лазерного излучения «Horos»; б) – внешний вид испытуемой подложки на основе оптического материала марки К8 с оптическим покрытием; в) – результат измерения функции BRDF.

Анализ экспериментальных результатов

В результате проведенных экспериментальных исследований были сделаны следующие практически значимые для дальнейшего внедрения современной технологической установки в оптическую промышленность выводы.

Индикатриса рассеянного излучения чистых подложек приведена на рис. 7.

Как можно видеть из рис. 7, самым большим светорассеянием обладают подложки с самой большой шероховатостью, соответственно подложки с самой маленькой шероховатостью – самым низким светорассеянием. При нанесении покрытия, изготовленного из материала SiO_2, светорассеяние уменьшается, то есть покрытие сглаживает неровности поверхности (см. рис. 8). Более того, разброс самих индикатрис также становится меньше, что позволяет сделать вывод о том, что даже при недостаточно качественной обработке поверхности подложки, после нанесения покрытия поверхностная шероховатость всей конструкции будет удовлетворительной.

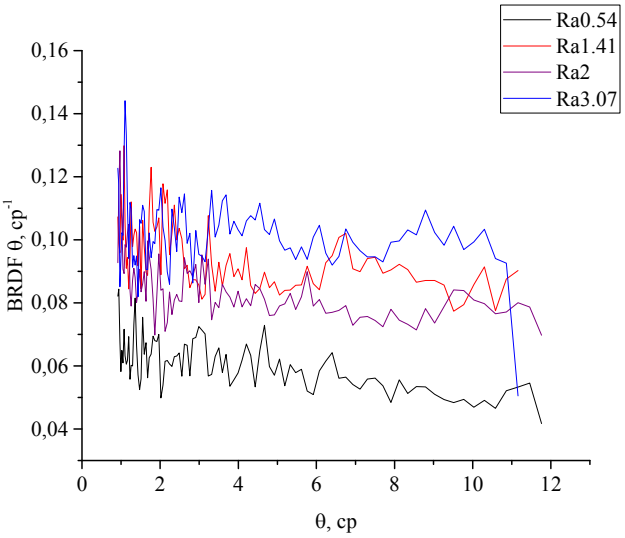

Рис. 7. Индикатрисы рассеянного излучения чистых подложек.

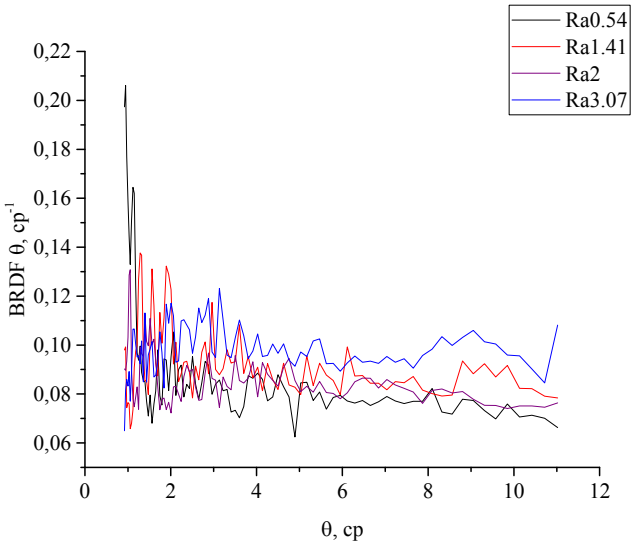

Рис. 8. Индикатрисы рассеянного излучения после нанесения покрытия из SiO_2 без применения технологии ионного ассистирования.

На рис. 9 приведены индикатрисы рассеяния после нанесения на подложки однослойного просветляющего покрытия из материала SiO_2 с применением технологии ионного ассистирования.

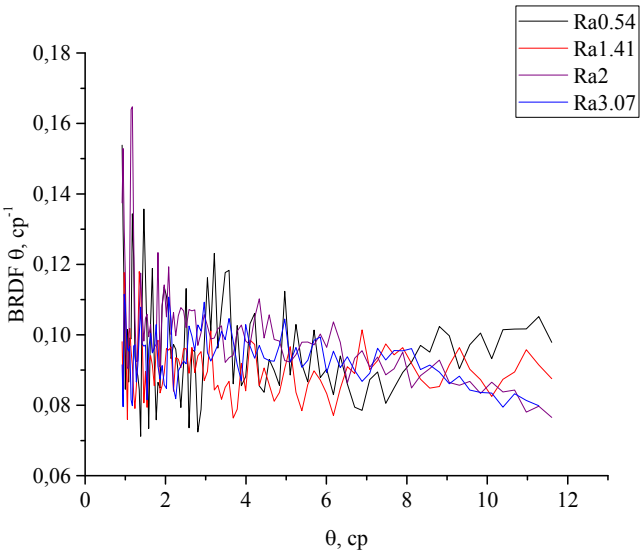

Рис. 9. Индикатрисы рассеянного излучения после нанесения покрытия из SiO_2 с применением технологии ионного ассистирования.

Как видно из рис. 9, светорассеяние в этом случае стало еще меньше, как и сам разброс значений для подложек с разной шероховатостью. Это вызвано тем, что при применении технологии ионного ассистирования атомы на поверхности покрытия как-бы «утрамбовываются», в результате чего лучше заполняются пустоты и неровности на поверхности подложки. Само же покрытие получается более плотным и однородным, что положительным образом сказывается на его функциональности.

Последним типом покрытия было покрытие, изготовленное из материала Nb_2O_5 (оксид ниобия) с применением технологии ионного ассистирования. Данная технологическая особенность обусловлена тем, что покрытие из оксида ниобия, изготовленное без применения технологии ионного ассистирования не имеет практической ценности, ввиду высокой неоднородности, а следовательно, невысокого качества. Индикатрисы рассеяния данного покрытия приведены на рис. 10.

На основании результатов экспериментальных исследований, представленных на рис. 10, можно утверждать что покрытие, изготовленное из оксида ниобия даже с применением технологии ионного ассистирования, не так эффективно сглаживает неровности поверхности подложки, следовательно, светорассеяние не только не уменьшилось, но для низких шероховатостей даже увеличилось. Это связано с тем, что металл, сам по себе обладает большим отражением, нежели диэлектрик.

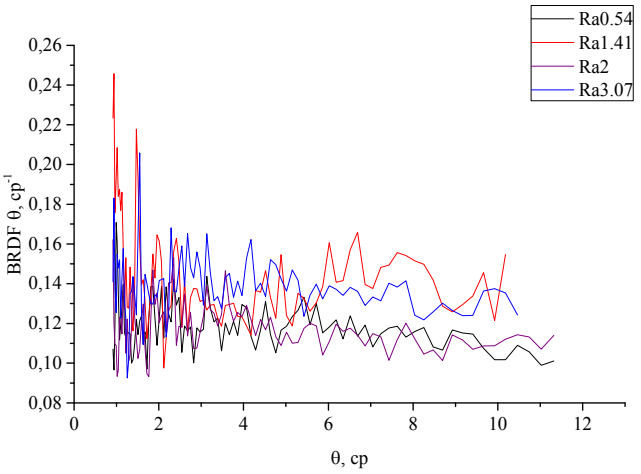

Рис. 10. Индикатрисы рассеянного излучения после нанесения покрытия из Nb_2O_5 с применением технологии ионного ассистирования.

Заключение

Обобщая проведенные исследования, составим зависимости функции BRDF от шероховатости поверхности. Данные зависимости приведены на рис. 11.

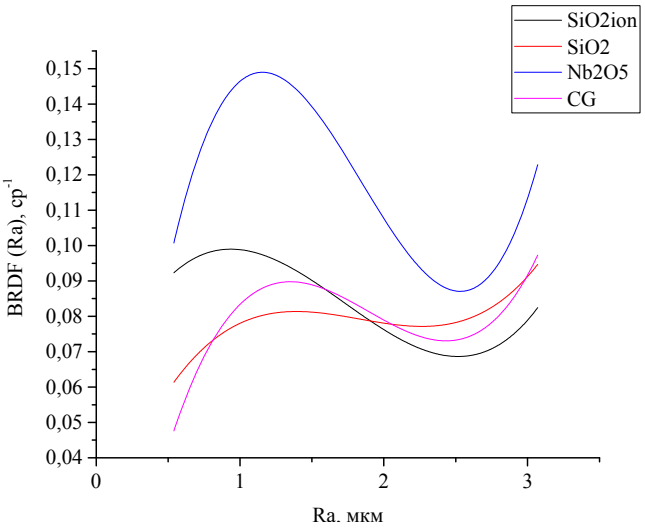

Рис. 11. Зависимости функции светорассеяния BRDF от шероховатости поверхности.

Как можно увидеть из рис. 11, наиболее оптимальным с точки зрения снижения светорассеяния и нивелирования неровностей поверхности подложки является покрытие, изготовленное из материала SiO_2 с применением технологии ионного ассистирования. В то же время, использование металлов необходимо

для создания отражающих покрытий, ввиду большей отражательной способности. Кроме этого, необходимо обратить внимание на необычный эффект, связанный с «провалом» функции BRDF в значении шероховатости Ra = 2. Причины и процессы, приводящие к такому необычному поведению функции светорассеяния, будут проанализированы в дальнейших исследованиях и представлены в научных работах широкому кругу специалистов в области современных технологий нанесения тонкоплёночных оптических покрытий.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Просовский О. Ф., Буднев А. Ю., Денисов Д. Г., Барышников Н. В., Просовский Ю. О.* Современная система прямого оптического широкополосного контроля толщины напыляемых оптических покрытий // Светотехника. 2020. № 4. С. 51.

2. *Lequime M., Nadji S., Stojcevski D., Koc C., Grézes-Besset C., Lumeau J.* Determination of the optical constants of a dielectric layer by processing in situ spectral transmittance measurements along the time dimension // Appl. Opt. 2017. Vol. 56. P. c181.

3. *Nadji S. L., Lequime M., Begou T., Koc C., Grézes-Besset C., Lumeau J.* Use of a broadband monitoring system for the determination of the optical constants of a dielectric bilayer // Appl. Opt. 2018. Vol. 57. P. 877.

4. *Басс Ф. Г., Фукс И. И.* Рассеяние волн на статистической неровной поверхности. – М.: Наука, 1972.

5. *Денисов Д. Г.* Измерение параметров шероховатостей шлифованных и полированных оптических поверхностей с помощью высокоточных методов лазерной интерферометрии // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 4. С. 393.

6. *Elson J. M.* Theory of light scattering from a rough surface with an inhomogeneous dielectric permittivity // The American Physical Society. 1984. Vol. 30. P. 5460.

7. *Барышников Н. В., Денисов Д. Г., Карасик В. Е., Краснова Е. В., Орлов В. М., Морозов А. Б.* Анализ возможностей метода дифференциального рассеяния в задачах высокоточного контроля поверхностных неоднородностей профилей субнанометрового уровня крупногабаритных оптических и лазерных деталей: сб. научных трудов: в сборнике «Лазеры в науке, технике, медицине». 2016. С. 113–119.

PACS: 81. 81.07.-b

Study of the influence of the surface quality of optical substrates on the performance characteristics of thin-film coatings

D. G. Denisov[1], O. F. Prosovsky[2], and Yu. O. Prosovsky[1,2]

[1] Bauman Moscow Technical University
5 2-nd Baumanskaya st., Moscow, 105005, Russia

[2] Obninsk Research and Production Enterprise Technologiya named after A. G. Romashin
15 Kievskoye Shosse, Obninsk, Kaluga Region, 249031, Russia

Received September 02, 2020

The main results of the operation of a modern technological system for the deposition and control of optical coatings on substrates with different degrees of roughness are analyzed according to the data of recording the characteristics of the scattered laser radiation indicatrix. The features of the approximations of the differential scattering method used to estimate the statistical parameters of the profiles of optical substrates are considered: the spectral density of the correlation function (PSD) and the effective standard deviation (RMS). The main characteristics of the scattered laser radiation from the surfaces of optical parts with different levels of roughness are presented. The results of experimental studies devoted to the influence of the quality of the surfaces of optical substrates on the performance characteristics of various film-forming materials of optical coatings applied with and without ion

assistance are discussed. On the basis of the experiment carried out, the possibilities of reducing light scattering and leveling the irregularities of the surfaces of substrates with different degrees of roughness are investigated.

Keywords: rough optical surface, statistical characteristics of the optical surface profile, spectral density of the correlation function, effective standard deviation, characteristics of the indicatrix of scattered laser radiation, differential scattering method, optical coatings.

REFERENCES

1. O. F. Prosovsky, A. Yu. Budnev, D. G. Denisov, N. V. Baryshnikov, and Yu. O. Prosovsky, *Modern system of direct optical broadband control of the thickness of deposited optical coatings*, Lighting engineering, № 4, 51 (2020).

2. M. Lequime, S. Nadji, D. Stojcevski, C. Koc, C. Grézes-Besset, and J. Lumeau, *Determination of the optical constants of a dielectric layer by processing in situ spectral transmittance measurements along the time dimension*, Appl. Opt. **56**, c181 (2017).

3. S. L. Nadji, M. Lequime, T. Begou, C. Koc, C. Grézes-Besset, and J. Lumeau, *Use of a broadband monitoring system for the determination of the optical constants of a dielectric bilayer*, Appl. Opt. **57**, 877 (2018).

4. F. G. Bass and I. I. Fuchs, *Scattering of waves on a statistical uneven surface* (Nauka, Moscow, 1972).

5. D. G. Denisov, *Measurement of the roughness parameters of ground and polished optical surfaces using high-precision methods of laser interferometry*, Advances in Applied Physics **5** (4), 393 (2017).

6. J. M. Elson, *Theory of light scattering from a rough surface with an inhomogeneous dielectric permittivity*, The American Physical Society, **30**, 5460 (1984).

7. N. V. Baryshnikov, D. G. Denisov, V. E. Karasik, E. V. Krasnova, V. M. Orlov, and A. B. Morozov, *Analysis of the capabilities of the differential scattering method in the problems of high-precision control of surface inhomogeneities of subnanometer level profiles of large optical and laser parts*. In the collection: lasers in science, technology, medicine. collection of scientific papers. 2016, pp. 113–119.