

ЧЕРНІВЕЦЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ім. Ю. ФЕДЬКОВИЧА

На правах рукопису

ЖИТАРК

Віктор Григорович

**ВИКОРИСТАННЯ СПЕКТРОФОТОПОЛЯРИМЕТРИЧНИХ МЕТОДІВ
ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХОНЬ
ТА ОПТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТОНКИХ ПЛІВОК**

01.04.05 - оптика

Автореферат

**дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук**

Чернівці - 1993

Робота виконана в Чернівецькому державному університеті
імені Юрія Федьковича

НАУКОВИЙ КЕРІВНИК - кандидат фізико-математичних наук, доцент
ГУМІНЕЦЬКИЙ Стефан Герасимович.

ОФІЦІЙНІ ОПОНЕНТИ:

доктор фізико-математичних наук,
професор Київського державного університету
ШАЙКЕВИЧ Ігор Андріянович.

кандидат фізико-математичних наук,
доцент Чернівецького державного університету
ПОЛЯНСЬКИЙ В'ячеслав Костянтинович.

ПРОВІДНА УСТАНОВА - Харківський державний університет.

Захист відбудеться " 8 " жовтня 1993р. о 14⁰⁰ год. на
засіданні спеціалізованої ради К 068.16.06 при Чернівецькому дер-
жавному університеті ім. Юрія Федьковича за адресою:
274012, м. Чернівці,
вул. Університетська, 1.

З дисертацією можна ознайомитись в науковій бібліотеці Чер-
нівецького державного університету ім. Ю. Федьковича.

Автореферат розісланий " 5 " листопада 1993р.

Вчений секретар спеціалізованої ради


МОКУНЬ І.І.

ЛНБ України ім.В.Стефаника



00810557 (Q)

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток оптико-фізичного приладобудування висуває перед дослідниками та конструкторами проблему розв'язку прямих та обернених задач взаємодії випромінювання з шорсткими поверхнями об'єктів та виробів, функціональні властивості яких визначаються станом їх мікрогеометрії. Цим зумовлюється необхідність прогнозування розсіюючих властивостей поверхонь по нормованим стандартам параметрах шорсткості, а з іншого боку - діагностики стану мікрогеометрії по параметрах відбитого поля випромінювання. При нанесенні плівок на недополіровані чи шорсткі поверхні виникає питання про вплив мікрогеометрії підложки на тонкоплівкові структури з точки зору трансформації їх оптичних властивостей. Актуальність таких досліджень визначається такими факторами.

1. Експериментальні дослідження характеристик відбитого світлового поля проводяться на атестованих по параметрах шорсткості поверхнях, виготовлених методом вільного абразиву. Це вимагає знання фізичних та технологічних умов формування мікрорельєфу, характеру взаємозв'язку між параметрами шорсткості, які використовуються при теоретичному описанні явищ відбивання.

2. Структура відбитого світлового поля відображає функції розподілу мікронерівностей як по висоті, так і по нахилу; це зумовлює важливість експериментального дослідження цих розподілів і їх теоретичну апроксимацію стандартними законами розподілу.

3. В зв'язку з активними пошуками безконтактних методів контролю стану мікрогеометрії поверхонь, зокрема оптичних, важливими є експериментальні дослідження параметрів світлового поля в функції нормованих параметрів шорсткості на предмет встановлення метрологічного узгодження існуючих оптичних та інших методів вимірювання, можливостей та ефективності нових розробок.

4. Зростання застосування покриттів поверхонь та тонкоплівкових систем вимагає виявлення ступеня відповідності мікрогеометрії поверхні шару і підстилаючої поверхні, встановлення факторів такої відповідності та фізичної картини формування поверхонь шарів. Тут додатково виникає експериментальна задача дослідження впливу мікрогеометрії підложки на точність визначення оптичних параметрів тонких шарів. При цьому, в свою чергу, необхідне знання похибок встановлення оптичних постійних шарів, викликаних наблизненнями методів оберненого розв'язку задач оптики тонких плівок та апарату-

турними похибками вимірювання параметрів світлових полів.

Мета роботи полягає у проведенні системних теоретичних та експериментальних досліджень меж застосування спектрофотометричних та поляризаційних методів при діагностиці нормованих параметрів шорсткості нерівних поверхонь, виявлення стану мікрогеометрії поверхонь шарів, що наносяться на підложку, встановлення точності визначення числових значень оптичних постійних тонких шарів. Вказана мета досягається розв'язком наступних задач.

1. Дослідження статистики і параметрів мікрогеометрії шліфованих вільних абразивом поверхонь в широкому діапазоні їх зміни ($0,01 \leq R_a \leq 8,5$ мкм).

2. Експериментальні та теоретичні дослідження вигляду функції розподілу мікронерівностей по висоті, їх апроксимація стандартним розподілом Грама-Шарльє.

3. Теоретичне дослідження коефіцієнта дзеркальності, отриманого методом дотичної площини, у випадку апроксимації функції розподілу вказаним вище чином. Теоретичне та експериментальне дослідження появи та виявлення дзеркального блиску на фоні дифузного розсіяння.

4. Експериментальні дослідження спектрофотометричних характеристик параметрів світлового поля: дзеркального, дифузного, повного відбивань випромінювання від шорстких поверхонь різної фізичної природи в функції параметрів шорсткості.

5. Розробка способу визначення шорсткості деталей по кутовим дослідженням дзеркального відбивання.

6. Поляризаційні дослідження відбитого випромінювання від вказаних поверхонь, включаючи матриці Мюллера для дзеркальної та дифузної складових, коефіцієнтів яскравості на предмет встановлення інваріантності окремих елементів до фізичних та геометричних параметрів шорстких поверхонь.

7. Виявлення кореляції величин світлорозсіяння підложки та нанесеної на неї плівки.

8. Виявлення впливу світлорозсіяння підложки на значення встановлених параметрів тонкої плівки, нанесеної на цю підложку.

9. Дослідження меж застосування спектроінтерференційних методів визначення оптичних параметрів тонких плівок.

Наукова новизна роботи:

1. Встановлено, що в області недоволіровок поверхонь функція розподілу мікронерівностей по висоті значно відрізняється від га-

усового типу і може бути апроксимована розподілом Грама-Шарльє; для його представлення необхідне знання таких статистичних параметрів як асиметрія E_s та ексцес S_s . Хід цих величин в функції середньоквадратичні висоти (СКВ) мікронерівностей має універсальний характер, незалежний від типу матеріалу поверхні та технологічних режимів полірування. Висловлено припущення, що така залежність характерна для будь-якого перехідного режиму формування нового виладкового процесу із наявного.

2. Дослідження статистики мікрорельєфу та зв'язаних з нею параметрів шорсткості для матеріалів з різною фізичною природою дозволила встановити експериментальний зв'язок між параметрами шорсткості, а також те, що величина зернистості абразивного порошку не є однозначним критерієм шорсткості, яка залежить також від фізико-механічних властивостей поверхні.

3. Виходячи із встановленого виразу для функції розподілу мікронерівностей по висоті для реальних поверхонь, одержано формулу для коефіцієнта дзеркального відбивання. Експериментально показано, що дзеркальне відбивання визначається параметром висоти та фізико-механічними властивостями матеріалу поверхні. Проведена апроксимація ефективного значення регулярного відбивання в функції параметра висоти R_d .

4. На основі викладеного в пункті 3, запропоновано спосіб визначення шорсткості деталі за результатами кутових досліджень дзеркального відбивання.

5. Сформульовано фазову інтерференційну умову дзеркальності. Встановлено зв'язок між інтерференційним параметром висоти мікронерівностей та стандартними параметрами шорсткості.

6. Систематизація оптичних досліджень по відбиванню в функції параметра R_d дозволяє оцінити межі застосування та можливості оптичних методів діагностики шорсткості поверхонь.

7. Експериментально показано, що компоненти матриць дзеркального та дифузного відбивання однозначно визначаються параметрами шорсткості поверхонь конкретного матеріалу. При цьому встановлено, що елементи дифузних матриць більш чутливі до змін мікрогеометрії та до типу досліджуваного матеріалу.

8. Дослідженнями кореляційних властивостей мікрогеометрія поверхонь шару та підложки встановлено, що діелектричним конденсатом властиве розсіяння на внутрішніх неоднорідностях та адитивна модель шорсткості. Висловлено припущення про наявність критичної

висоти мікронерівностей підложки, при досягненні якої відбувається зміна механізмів конденсації вакуумних покриттів. Співвідношення цієї висоти, розмірів зерен конденсату та товщини шару визначають характер моделі шорсткості поверхонь.

9. Експериментально досліджено вплив недополіровок підложки на метрологію оптичних параметрів тонких плівок, які визначаються спектроінтерферометрією. Встановлена лінійна залежність показника заломлення та експонентна для поглинання випромінювання плівки від шорсткості.

10. Дослідження похибок спектроінтерференційних методик дозволило встановити межі застосування останніх та вимоги до метрологічного забезпечення вимірювання коефіцієнтів відбивання та пропускання систем.

11. Запропоновано спектрофотометричний метод вимірювання показника поглинання тонкої плівки. На відміну від існуючих, дана методика слабо критична до експериментальних похибок вимірювання оптичних параметрів поля випромінювання.

Практичне значення роботи. На основі одержаних результатів по вимірюванню статистичних параметрів шорстких поверхонь, досліджень величин світлового поля, розсіяного шорсткою поверхнею та сформованого взаємодією із системою "плівка-підложка", розроблено ряд практичних рекомендацій та пропозицій:

1. Для поверхонь, отриманих методом вільного абразиву, встановлені кількісні зв'язки між висотними параметрами шорсткості в широкому діапазоні їх зміни.

2. Встановлено, що оптичні методи діагностики мікрогеометрії, в основу яких закладено теорію Ісаковича-Бекмана, можуть бути застосовані для високополірованих поверхонь з $R_q < 0,02$ мкм.

3. Врахування реальної функції розподілу мікронерівностей для шліфованих вільним абразивом поверхонь в рамках вказаної теорії розширює область її застосування включно до $R_q = 0,15$ мкм.

4. Запропонований спосіб визначення шорсткості деталей поширюється на поверхні з $R_q > 0,15$ мкм і забезпечує метрологічне узгодження оптичних та профілометричних методів вимірювань.

5. Знайдені закономірності змін величин компонент матриць дзеркального та дифузного відбивання в залежності від нормованих параметрів шорсткості можуть бути використані для реалізації безконтактних оптичних методів контролю цих параметрів.

6. Встановлена ефективність застосування розглянутих спектро-

інтерференційних методів визначення оптичних постійних тонких плівок, досліджено вплив недополіровок підложок.

Результати роботи сприяють осмисленню теоретичних положень у вивченні взаємодії електромагнітного випромінювання та нерівної поверхні. Сюди відносяться умови застосування методу дотичних площин, критеріїв дзеркальності, перевідбивання та затінення, поляризаційні ефекти і таке інше.

Одержані експериментальні результати сприяють прогнозуванню ефективності наукових розробок по створенню методів та методик оптичної діагностики стану мікрогеометрії поверхні, забезпеченню метрологічного узгодження даних методів та профілометрії.

Встановлення моделей відповідності мікрорельєфів поверхні плівки та підложки сприятиме оптимізації конструкція нашарованих діелектричних систем при їх розрахунках матричними методами.

Проведена робота по оцінці точності дозволяє виявити вплив залишкового розсіяння підложки та експериментальних похибок вимірювання параметрів поля на встановлення параметрів тонких плівок.

На захист виноситься:

1. Функція розподілу мікронерівностей по висоті для шорстких поверхонь, отриманих вільним абразивом, відрізняється від гаусової форми і може бути апроксимована розподілом Грама-Шарлье.

2. Ефективний коефіцієнт відбивання випромінювання визначається не тільки сукупними характеристиками мікрогеометрії поверхні, але і її фізико-механічними властивостями.

3. При діагностиці поляризаційними методами фізичних та геометричних параметрів шорсткої поверхні на предмет встановлення їх інваріантності до окремих елементів матриці перетворення інтенсивностей, найбільш інформативною є дифузна складова відбитого випромінювання.

4. Ступінь відповідності мікрогеометрія поверхні плівки та підложки визначається величиною мікрогеометрії останньої, розмірами структурних утворень шару, його товщиною.

5. Спосіб вимірювання шорсткості поверхні деталі по інтенсивності кутового ходу дзеркально відбитого випромінювання, який забезпечує метрологічне узгодження з профілометрією.

6. Точність встановлення спектроінтерферометрією показника поглинання плівки як її оптичного параметру, найбільш критична до похибок вимірювання світлових величин та залишкового після полірування рельєфу поверхні підложки.

7. Методика визначення показника поглинання тонкої плівки, слабочутлива до похибок вимірювання світлових параметрів систем.

Апробація роботи. Основні результати та положення роботи доповідались та обговорювались на: Республіканській конференції "Структура и физические свойства тонких пленок" (м. Ужгород, 1977р.), II, III, IV Всесоюзних нарадах по поширенню лазерного випромінювання в дисперсному середовищі (м. Обнінськ, 1982, 1985р.р., м. Барнаул, 1988 р.), V-ї Всесоюзній науково-технічній конференції "Фотометрия и ее метрологическое обеспечение" (м. Москва, 1984р.), V-ї Всесоюзній школі по оптичній обробці інформації (м. Київ, 1984р.), II-ї Всесоюзній конференції "Радиоволновые и оптические методы и средства неразрушающего контроля качества промышленных изделий" (м. Одеса, 1985р.), XI-ї Всесоюзній науково-технічній конференції "Неразрушающие физические методы и средства контроля" (м. Москва, 1987р.).

Публікації. По матеріалах дисертаційної роботи опубліковано 15 робіт в наукових журналах та інших виданнях.

Структура та об'єм роботи. Дисертація складається із вступу, п'яти лав, висновків; викладена на 223 сторінках машинопису, 34 малюнки та 15 таблиць, бібліографія - 207 найменування.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність теми, сформульовано мету роботи та склад задач досліджень, представлено новизну та практичну значимість, дана коротка анотація по главам, приводяться основні положення, які виносяться на захист.

Перша глава побудована на аналізі науково-технічної літератури по темі роботи. Розглядається теоретичний аспект взаємодії електромагнітного поля з нерівною поверхнею. Обґрунтовується необхідність системного дослідження функції розподілу мікронерівностей по висоті в широкому діапазоні зміни висот мікронерівностей для оптичних поверхонь, отриманих методом вільного абразиву. Показано, що у формуванні відбитого (пропущеного) нерівною поверхнею випромінювання приймає цілий комплекс явищ та процесів, а саме: рельєф поверхні, провідність матеріалу, явища перевідбивання та затінення, наявність викликаною обробкою тріщинуватого шару, дифракційні та плазмонні ефекти. В розгляді існуючих теорій акцентована увага на крайні умови висхідних положень.

Розглядаються практичні реалізації оптичних методів, в основу яких покладено аналіз скалярних та векторних компонент поля,

відбитих чи пропущених шорсткою поверхнею. Із аналізу літератури випливає, що наявні методики не поширюються на поверхні з $k \gg 1$, де k - хвильовий вектор, а σ - СКВ мікронерівностей, аналогом якої є параметр шорсткості R_q .

З вищезначеного випливає необхідність проведення системних експериментальних досліджень залежності вказаних компонент поля від регламентованих нормативними документами параметрів шорсткості нерівної поверхні. Для регулювання необхідного рівня величини поля, що зазнає взаємодії з поверхнею, на останню наносяться різноманітні покриття. Тут виникає питання про ступінь відповідності мікрогеометрії поверхонь плівки та підложки. Разом з цим, відсутні експериментальні дослідження впливу залишкової мікрогеометрії на точність визначення оптичних параметрів тонких плівок.

На основі проведеного аналізу сформульована мета роботи та склад розв'язуваних задач.

В другій главі обґрунтовується вибір об'єктів досліджень, проводяться дослідження статистичних характеристик та параметрів шорстких поверхонь, отриманих методом вільного абразиву.

Вибір матеріалів для об'єктів досліджень базується на високій непрозорості у досліджуваному спектральному інтервалі, однак з різною глибиною проникнення хвилі у приповерхневий шар. Це германій, кремній та діелектрик - скло ІЧСЗ. Відмінність у глибині проникнення дозволяє поруч із рельєфним шаром дослідити вклад у відбивання і порушеного обробкою приповерхневого тріщинуватого шару. Для розділу цих чинників поверхні металізувались у вакуумі Ag , Al , In . Дослідження тонкоплівкових покриттів проводилось як на металізованих, так і на діелектричних системах.

Дослідження мікрорельєфу в термінах параметрів шорсткості проводилось, окрім вказаного, на поверхнях оптичного скла К8, ЛК5, Ф8, ТФ1. В якості абразиву використовувались порошки $\#12$, $\#5$, $\#40$, $\#28$, $\#20$, $\#10$. Полірування велось алмазними пастанами та поліритом на замшевих та повстяних полірувальниках. Це дозволило розширити градацію рельєфу поверхонь включно до висот $R_z \approx 30$ мкм.

Вимірювання статистичних параметрів та характеристик проводились з допомогою профілометра-профілографа Talisurf-5 фірми "Тейлор-Гобсон", Великобританія. Обробка одержаних експериментальних результатів проводилась згідно вимог стандарту ГОСТ 8.207-76, враховуючи характер розподілу результатів спостережень. Результати досліджень зведені в таблиці і подані в дисерта-

ціянія роботи. На підставі цих даних встановлено кількісний зв'язок між висотними параметрами шорсткості, а саме:

- I-ділянка, $0 < R_a < 0,05$: $R_z \approx 10R_a$, $R_a \approx 0,55 R_q$;
 II-ділянка, $0,05 \leq R_a < 0,55$: $R_z \approx 5,7R_a$, $R_a \approx \sqrt{27\pi} R_q$;
 III-ділянка, $0,55 \leq R_a$: $R_z \approx 5,0R_a$, $R_a \approx \sqrt{27\pi} R_q$.

Примітка. Межі ділянок встановлені в мікрометрах.

Звідси випливає, що рекомендації ГОСТ 2789-73 відносно кількісного зв'язку між вказаними величинами, на поверхні, отримані методом вільного абразиву, не поширюються.

Додаткові дослідження статичних властивостей шорстких поверхонь проводилися по результатах обробки профілограм, які включали в себе розрахунки параметрів шорсткості, асиметрії S_k та ексцесу E_k , побудову гістограм як експериментального аналогу функції розподілу мікронерівностей по висоті, а також апроксимацію реального розподілу стандартними: Гауса та Грама-Шарльє. З допомогою критеріїв Пірсона та Мізеса-Смірнова проведено оцінку належності реального розподілу до нормального. Наявний матеріал дозволив дослідити функціональний хід $(S_k, E_k) = f(R_q)$. З нього випливає, що поверхні, отримані методом вільного абразиву, не можуть в загальному випадку описуватись нормальним законом розподілу. Універсальною формою його описання може бути стандартний розподіл Грама-Шарльє з параметрами оцінки R_q, S_k, E_k .

Дослідження функціонального ходу $R_z = f(R_q)$ виявляє особливу точку в області $R_q \approx 0,05$ мкм, тобто в області екстремальних значень S_k, E_k . Вказане є також наслідком дослідження математичного очікування параметра R_z реального ζ і нормального ζ процесів, які зв'язані між собою залежністю $E_\zeta(R_q) = E_\zeta(R_q)R_q$. Це означає, що в разі зміни функції розподілу випадкової величини фізичного процесу, дослідження будь-якого з параметрів цього процесу в функції R_q , як першого моменту розподілу, можуть виявлятися особливі точки, зв'язані не тільки з фізикою процесу, але і з його статистикою. Ці точки не проявляються в представленні параметра R_q -другого моменту розподілу. Отже, при розробці оптичних методів контролю необхідне використання параметра R_q - середньоквадратичного відхилення мікронерівностей від середньої лінії, який існуючим стандартом на шорсткість ГОСТ 2789-73 не регламентується.

В третій главі досліджуються межі застосування скалярних параметрів поля для визначення параметрів шорсткості поверхонь. Пе-

реважна більшість обернених розв'язків ґрунтуються на теоретичних розробках Ісаковича-Бекмана, результатом яких, наприклад, для дзеркального ефективного відбивання $R_{дз}^*$ є співвідношення:

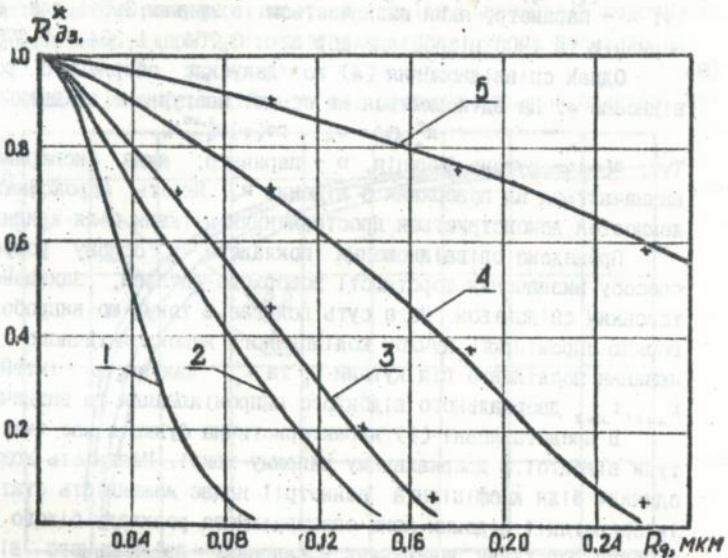
$$R_{дз}^* = |x(q_z)|^2. \quad (1)$$

Тут $R_{дз}^* = R_{дз} / R_0$, де $R_{дз}$, R_0 - коефіцієнти регулярного відбивання шорсткої та абсолютно гладкої поверхонь того ж матеріалу; $x(q_z)$ - характеристична функція нормованої густини розподілу мікронерівностей по висоті; q_z - проекція падаючого та відбитого хвильового вектора на нормаль до середнього рівня поверхні.

В існуючих теоріях приведення співвідношення (1) до розрахункового вигляду здійснюється шляхом прийняття гаусової форми функції розподілу. Вище показано, що для оптичних поверхонь найбільш сприятливою формою розподілу є розподіл Грама-Шарльє.

З прийняттям цього характеристична функція матиме вигляд:

$$x(q_z) = \left[C + \frac{E_x}{4I} q_z^4 \sigma^4 \right] + i \frac{S_k}{3I} q_z^3 \sigma^3 \exp(-q_z^2 \sigma^2 / 2). \quad (2)$$



Мал.1. Хід дзеркального відбивання від шорстких поверхонь при нормальному опроміненні в функції параметра R_q .

Криві 1, 2 - розрахунки згідно співвідношень Ісаковича та (3);

3+5 - експеримент для G_0 , S_1 та ІЧС-3.

В термінах коефіцієнта відбивання можна записати:

$$R_{\text{дв}} = R_0 \left(1 + \frac{E_x}{4I} q_2^4 \sigma^4 \right)^2 + \left\{ \frac{S_k}{3I} \right\}^2 q_2^6 \sigma^6 \exp(-q_2^2 \sigma^2). \quad (3)$$

Вирази (2), (3) відрізняються від відповідних в теорії Ісаковича-Бекмана наявністю члена в дужках біля експоненти і при нормальному процесі ($E_x, S_k=0$) приймають загальновідомий вигляд.

З мал.1 випливає, що використання реальної функції розподілу дає краще наближення до експерименту, однак задовільного описання не спостерігається внаслідок обмеженості висхідних положень теорії Ісаковича. Отже, оптимальним є пошук апроксимація, які б задовільно описували параметри відбитого світлового поля.

Вручи співвідношення (3) за базове, апроксимацію експериментальних залежностей 3-5 для довільних кутів опромінення можна представити у вигляді:

$$R_{\text{дв}}^* = \left\{ \left(1 + \frac{E_x}{4I} q_2^4 \sigma^4 \right)^2 + \left\{ \frac{S_k}{3I} \right\}^2 q_2^6 \sigma^6 \right\} \exp(-q_2^2 \sigma^2) \exp(\lambda \sigma / 0.76 - \sigma^2). \quad (4)$$

Тут λ - параметр, який визначається із кривих 3-5 і для кремнію, германію та ІЧСЗ відповідно дорівнює 0,754; 1,364; 1,676.

Однак співвідношення (4) не допускає оберненого розв'язку відносно σ . Це здійснюється на основі наступного співвідношення:

$$R_{\text{дв}}^*(\psi) = c(1 - D^2(\psi) R_0^{1-2D}). \quad (5)$$

Тут: $*(\psi)$ - кутова функція, D - параметр, який експериментально визначається на поверхнях з відомим R_0 . Якість апроксимації залежностей демонструється проставленими мітками біля кривих 3-5.

Приведене співвідношення покладено в основу розробленого способу визначення шорсткості поверхонь деталей, захищеного авторським свідоцтвом. Його суть полягає в тому, що випробовану поверхню опроміняють пучком колімованого монохроматичного випромінювання послідовно під кутами i_1 та i_2 , вимірюють інтенсивності $I_{\text{дв}1}, I_{\text{дв}2}$ дзеркального відбитого випромінювання та визначають R_0 .

В представлений (1) характеристична функція має зміст амплітуди відбитої в дзеркальному напрямку хвилі. Наявність комплексної одиниці біля коефіцієнта асиметрії надає можливість статистичної інтерпретації відомих явищ спектрального розкладу білого випромінювання шорсткими поверхнями в напрямку дзеркального відбивання при близьких до дотичних кутах, та відхилення дзеркального блиску від геометричного напрямку при монохроматичному опроміненні. Це випливає з співвідношення (3), так як його комплексна форма свідчить про наявність у відбиванні зсуву фаз λ , виниканого асимет-

рією функції розподілу. Величина цього зсуву визначається:

$$tq\Delta z = \frac{S_k}{3I} q_2^3 \sigma^3 / \left(I + \frac{E_k}{4I} q_2^4 \sigma^4 \right). \quad (6)$$

Тут $q_2 = -2\pi(\cos\varphi + \sin\psi)/\lambda$, де φ - кут падіння, ψ - кут відбивання в напрямку дзеркального блиску.

Розглянуто кутові умови появи та візуального спостереження дзеркального блиску на предметі їх використання в діагностиці шорсткості. Узагальнюючий аналіз наукової літератури та проведена теоретична робота дозволили сформулювати три незалежних умови дзеркального відбивання: статистичну, хвильову та фазово-інтерференційну. Згідно статистичної умови принцип візуального виявлення дзеркального блиску на фоні дифузного розсіяння запишеться:

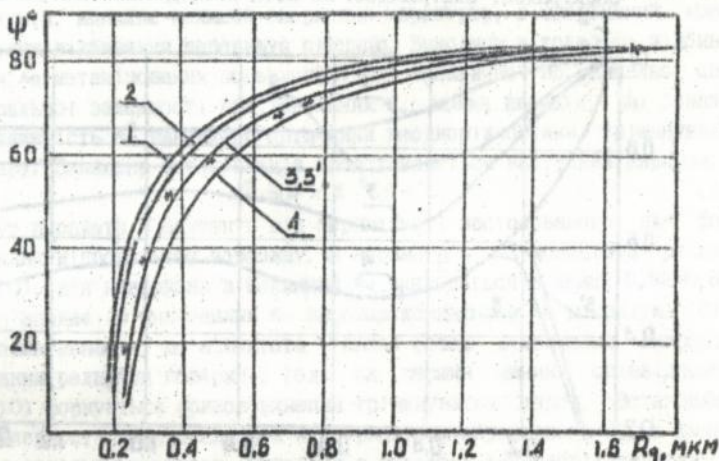
$$\frac{(\lambda(q_2) \lambda(q_2)^*) / D(\lambda(q_2))}{\lambda(q_2)} \geq 1, \quad (7)$$

де в чисельнику інтенсивність дзеркального блиску, а в знаменнику - дифузного фону в межах дифракційного конусу розсіяння.

На наш погляд, в відомій умові Фелікса Енча невиясненим є поняття інтерференційної висоти в термінах параметрів шорсткості. З проведенням відповідного розгляду вказана умова запишеться:

$$R_q = (n^2 \lambda) / (32 \cos \psi). \quad (8)$$

фазова інтерференційна умова, сформульована на підставі от-



Мал. 2. Умови появи дзеркального блиску.

Криві 1+3 - розрахункові згідно виразів (7+8), 3', 4 - експериментальні, для чистих та Λ_4 -металізованих поверхонь ПЧС.

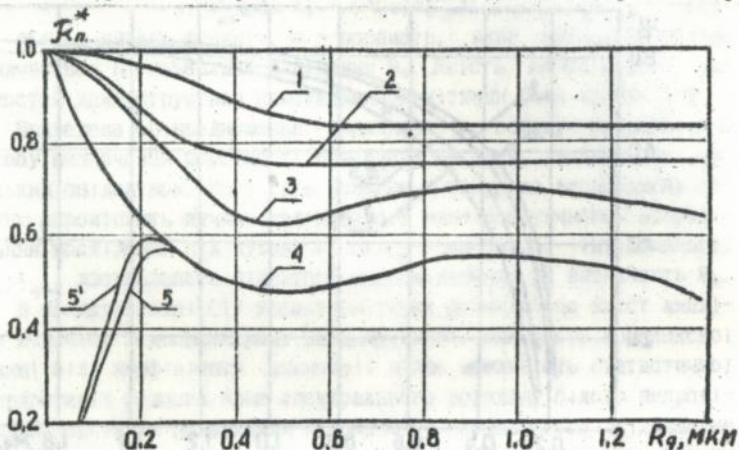
риманого нами співвідношення (3), де під знаком експоненти фігурує квадрат фази для відбитої поверхнею хвилі, запишеться:

$$-\frac{16\pi^2 R_q^2 \cos^2 \psi}{\lambda^2} + \frac{CR_q \cos \psi}{0,76 - (R_q \cos \psi)^{0,2}} \leq \frac{\pi^2}{4}. \quad (9)$$

На мал.2 крива 3 отримана підстановкою в (9) значення параметра c , яке відповідає поверхням із ІЧЗ. Криві 3'+4 - експериментальні, відповідно для поверхонь ІЧЗ та для тих же поверхонь, але металізованих сріблом. Криві 3 та 3' практично співпадають, тоді як хід 4 дещо відрізняється від ходу 3. Вважаємо, що таке співпадання було б можливим, якби в умову (9) підставити б значення c , яке відповідає поверхням срібла. Отже, найкраще відповідає експериментальним даним фазова інтерференційна умова, яка може бути покладена в основу методики визначення параметра R_q при встановленому для конкретної поверхні параметрі c .

Вимірювання повного відбивань від поверхонь об'єктів проводились на інтегральному фотометрі з центральним розміщенням зразків в інтервалі 0,4+1,0 мкм. При реєстрації дифузної складової регулярний пучок виводився через отвір, а отримане значення дифузного коефіцієнта скоректовано відповідно втрат на ньому.

Спектральні вимірювання на всіх досліджених поверхнях з гра-



Мал.3. Повне та дифузне ефективні відбивання в функції R_q .

Криві 1+4 - повне відбивання для Ag , Al , Ge та Si ; 5 та 5' - дифузне відбивання поверхонь Si ; 5 - прямі експериментальні дані, а 5' - скоректовані на втрати через отвір.

дацією R_q в межах $0,025+1,7$ мкм, окрім ІЧСЗ, виявили незначну селективність у вказаному інтервалі λ . Отже, дифракційні ефекти не справляють помітного впливу на скалярні параметри відбитого випромінювання, а їх величина може прогнозуватись теоріями, в яких закладено метод дотичної площини.

Мал. 3 демонструє хід повного (R_n^*) та дифузного (R_d^*) відбивання. Зменшення його із зростанням R_q на початковій ділянці залежностей зв'язується зі збільшенням кратності актів перевідбивання випромінювання між вершинами мікронерівностей. Починаючи з $R_q=0,5$ мкм, відбивання від металізованих поверхонь, приймає постійну величину, тобто збільшення кількості вказаних актів призупиняється із зростанням R_q . Відмінність ходу R_n для поверхонь S_1 та S_0 пояснюється різною глибиною проникнення випромінювання в приповерхневий шар матеріалу. Із зростання залучає у взаємодію нові горизонти тріщинуватого шару, збільшуючи тим самим кількість об'ємних неоднорідностей, які і зумовлюють зростання відбивання.

Цей факт особливо актуальний для ІЧСЗ, для якого глибина проникнення становить 125 мкм при $\lambda=0,63$ мкм, що значно перевищує глибину залягання тріщинуватого шару. Спектральна залежність повного відбивання поверхонь ІЧСЗ з різними R_q , на відміну від попередніх, виявляє яскравий обернений характер, а ефективний коефіцієнт відбивання перевищує одиницю. Виходячи з того, що відбивання A_q -металізованих поверхонь ІЧСЗ практично не виявляє спектральної залежності при довільних R_q , можна вважати, що вказана залежність R_n^* викликана оптичними неоднорідностями тріщинуватого шару. Знайдена апроксимація представляється наступним виразом:

$$R_n^* = (M / \lambda^{-5}) + L. \quad (10)$$

Тут параметр M залежить від зернистості застосованого для формування мікрорельєфу абразиву, а параметр L , як асимптота рівняння (10), для поверхонь з великими R_q знаходиться в межах $0,62+0,63$ і співпадає із значеннями R_n високовідбиваючого A_q -покриття. Отже, можна вважати, що асимптота L являє собою відбивання випромінювання рельєфом поверхні, тоді як перший чинник співвідношення (10) формується приповерхневим тріщинуватим шаром. Встановлення залежності між параметром M та розміром абразивного зерна виявило її лінійний характер. Виходячи з положень технології обробки оптичних поверхонь, показується, що параметр M пропорційний глибині залягання тріщинуватого шару.

Аналіз попереднього показує, що повне відбивання не може бу-

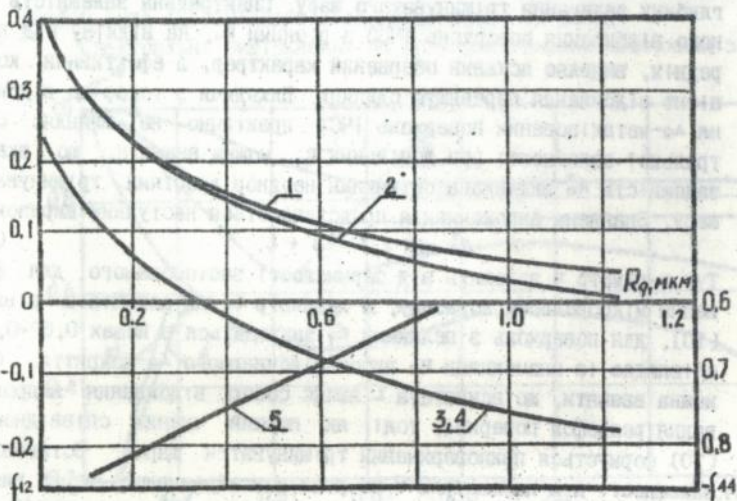
ти використаним для встановлення мікрогеометрії шорстких поверхонь, а спектральний хід цього відбивання для матеріалів з великою глибиною проникнення випромінювання дає інформацію про параметри тріщинуватого шару як наслідку дії інструменту на поверхню.

Аналіз залежності дифузного відбивання на монотонність в функції R_q виявляє добрі перспективи для використання цього параметру поля в задачах діагностики стану мікрогеометрії поверхонь, на яких спостерігається дзеркальний блиск (мал.3, криві 5, 5').

В четвертій главі представлені результати досліджень поляризаційної структури відбитого шорсткою поверхнею випромінювання у вигляді елементів матриць перетворення вектор-параметра Стокса та поляризаційних дифузійних компонент σ_{11} , σ_{11} коефіцієнта яскравості.

Як в дзеркальній, так і в дифузійній матрицях, для довільних кутів опромінення та спостереження експериментально підтверджено наявність діагональних f_{ii} та елементів f_{12} , f_{21} , f_{34} , f_{43} .

Аналіз результатів вимірювання матриць дзеркального відбивання для всіх досліджуваних об'єктів виявляє слабку чутливість окремих компонент до змін параметрів шорсткості, зокрема R_q .



Мал. 4. Хід елементів матриць дифузного відбивання.

Опромінення нормальне, спостереження при $\psi=70^\circ$. Криві 1+4 -елемент f_{12} поверхонь Al, In, Ge, Si, крива 5 -елемент f_{44} 1ЧС-3.

Так, значення r_{22} для Ge знаходиться в межах $0,95+0,97$ при зміні R_q від $0,07$ до $1,3$ мкм в області кутів спостереження $\psi=0+60^\circ$. При $\psi>60^\circ$ r_{22} дещо зростає, досягаючи значень, близьких до одиниці. Інші матеріали виявляють слідуєщу картину: для ІЧС-3 $r_{22}=0,98+0,995$ ($\psi=55+60^\circ$); для Al та In розкид значень r_{22} при зміні R_q у вказаному для Ge інтервалі знаходиться в межах $0,93+0,97$ ($\psi>60^\circ$). Для Si максимальний діапазон зміни компонент r_{23} , r_{44} знаходиться в межах $0,75+0,9$ ($\psi=50+55^\circ$). Для Ge, In та Al вказаний діапазон дещо менший від Si, однак більший, ніж для ІЧС-3. Таким чином, дослідження діагональних компонент показує відсутність чіткої відповідності між їх чисельними значеннями та зміною параметра R_q . Для компонент $r_{12,21}$, $r_{34,43}$ картина дещо інша. Найбільша зміна спостерігається для Al на Si і складає $-(0,5+0,22)$ в області $\psi=70^\circ$, а найменша - для ІЧС-3 $-(0,94+1,00)$ в області $\psi=57^\circ$ при $0<R_q<1,67$ мкм.

Отже, використання елементів дзеркальної матриці перетворення вектор-параметрів Стокса з метою діагностики шорсткості поверхонь малоперспективне з причини низької їх чутливості до змін R_q .

Елементи матриць дифузного відбивання істотно відрізняються від попередніх по інформативності та інваріантних властивостях до фізико-геометричних параметрів поверхонь. Спостерігається достатня для практичного використання чутливість та монотонність залежностей приведених елементів, особливо при невеликих R_q (мал. 4).

Отже, поданий графічний матеріал демонструє можливість використання цього методу для реалізації безконтактних оптичних способів вимірювання параметрів мікрогеометрії шорстких поверхонь.

Поляризаційні дослідження коефіцієнтів яскравості, як регламентованих фотометричних величин, на поверхнях з градацією мікрогеометрії виявляють селективність яскравості в функції параметра висоти. Встановлення чисельного критерія цієї висоти дозволяє прогнозувати дифузні властивості шорстких поверхонь. Показана висока чутливість методу до змін параметра R_q , абсолютне значення якого не перевищує $0,2$ мкм. Однак його використання можливе при наявності еталонних поверхонь.

В п'ятій главі розглянуто питання ступеня відповідності мікрорельєфів поверхонь плівки та підложки, експериментально досліджено вплив залишкового мікрорельєфу поверхні підложки на точність визначення оптичних параметрів плівки, нанесеної на цю підложку. Тут же досліджено гомілки вимірювання оптичних параметрів

плівки, зумовлених, з одного боку, наближеннями розв'язку обернених задач оптики тонких плівок, а з іншого - похибками вимірювання параметрів світлових полів тонкоплівкових систем.

Дослідження ступеня відповідності здійснюється встановленням залежності між інтегральним світлорозсіянням діелектричної системи "плівка-підложка" та світлорозсіянням чистої підложки, а також по вимірюванням індикатрис відбитого випромінювання поверхнями α_1 -, Γ_n -плівок, нанесених на шорсткі підложки. Діелектричні системи отримувались у вакуумі термічним нанесенням MgF_2 на кюліноподібні скляні підложки з градацією мікрогеометрії робочих поверхонь від високополірованих до шорстких з $r_z = 0,1$ мкм. Аналіз результатів по розсіянню на діелектричних системах проводився з використанням відомих теоретичних моделей (Ісман, Карнілья) кореляції поверхонь: адитивної, повної кореляції або її відсутності, неоднорідності показника заломлення самого шару.

Залежність повного розсіяння системи "плівка-підложка" R_{CT} від повного розсіяння цієї ж підложки $R_{нд}$ має дві різні функціональні ділянки. Для поверхонь з $r_z < 0,015$ мкм $R_{CT} = (6+8)R_{нд}$, а при більших r_z $R_{CT} = 0,9R_{нд}$. З теоретичних положень випливає, що жодна з перелічених моделей не пояснює такого збільшення світлорозсіяння системи в межах першої ділянки. Показано, що поверхням діелектричних конденсатів, нанесених на підложки з $r_z < 0,015$ мкм, властиві дві моделі: внутрішньої неоднорідності та адитивної шорсткості з переважачим впливом першої. При $r_z > 0,015$ вибір моделі також неоднозначний: проглядаються ознаки кореляційної моделі з коефіцієнтом кореляції, близьким до одиниці, та адитивної. Пропонується назвати такий стан кореляційно-адитивною моделлю.

Зміна моделей кореляції поверхонь в околі $r_z = 0,015$ мкм свідчить про зміну механізму конденсації структур: збільшення шорсткості підложки рівнозначно збільшенню центрів конденсації, що приводить до згасання міграційних процесів на поверхні і формування дрібнодисперсної структури плівки. Висловлено гіпотезу наявності критичних висот мікронерівностей поверхні підложки, при яких відбувається зміна механізмів конденсації структур.

Дослідження механізмів кореляції при $r_z \geq 0,1$ мкм проводилось по індикатрисам відбитого випромінювання від металізованих α_1 та Γ_n поверхонь s_1 . Обговорення експериментальних результатів ґрунтується на відомому тезисі: при ідентичних індикатрисах мікрорельєфи поверхонь тотожні. Порівняння індикатрис чистих та

$\Delta 1$ -поверхонь практично не виявляють відмінностей при невеликих кутах розсіяння ($w < 40^\circ$) та значеннях мікрогеометрії вихідної поверхні $R_q = 0,03 \mu\text{м}$, однак при більших кутах розсіююча здатність $\Delta 1$ -поверхонь дещо зменшується. Причиною цього є нейтралізація металеву плівкою приповерхневого тріщинуватого шару, який відповідає за розсіювання у великокутову зону. Збільшення шорсткості підложок призводить до незначного розширення індикатриси для $\Delta 1$ -поверхонь, а для I_n -покрить — значного у всьому кутовому діапазоні, викликане флуктуаціями товщини шару, тобто виходом на поверхню додаткових мікронерівностей. Розвиток цих процесів спричиняється збільшенням мікрогеометрії підложки з одного боку, а з іншого — великими розмірами кристалітів, характерними для Індію. Таким чином, при відносно гладких підложках та невеликих розмірах кристалітів вакуумного конденсату можна сприймати кореляційно-адитивну модель шорсткості, а при розвитку процесів виходу зерен шару на поверхню вказана модель перероджується в некореляційну.

Дослідження впливу залишкової мікрогеометрії підложки на точність визначення оптичних параметрів тонких плівок проводилось на діелектричних системах " MgF_2 — скляна клиноподібна підложка". Спектрограма пропускання системи записувалась з використанням інтегрального кульового фотометра, спряженого з оптичним виходом спектрофотометра СФ-4А. Точність вимірювання — на рівні 0,2%. Визначення оптичних постійних шарів проводилось по методиці Ляшенко-Милославського. Хід показника заломлення n та поглинання k MgF_2 при зростанні параметра R_z підложки виявляє лінійний спад n та експоненціальне зростання k . Збільшення R_z означає зменшення фактору заповнення приповерхневої зони, тобто зменшення n . Зростання k пов'язується зі збільшенням розсіювання на поверхні при зростанні R_z . Розрахована товщина шарів не виявляє залежності від R_z .

Використання вказаної методики вимагає попереднього визначення порядку інтерференції. Для цього використовується вираз:

$$m = \lambda_{m,p}(p-1) / (\lambda_m - \lambda_{m,p}), \quad (11)$$

де p — кількість екстремумів на спектрограмі пропускання, а λ_m та $\lambda_{m,p}$ — відповідні довжини хвиль крайніх екстремумів.

Однак, реалізація обернених розв'язків задач оптики тонких плівок вносить долу сумнівів в зв'язку з припущеннями та наближеннями, що приймаються в їх ході, а також наявністю апаратних похибок вимірювання коефіцієнтів пропускання та відбивання. Розрахунковому аналізу підлягали чотири спектроінтерференційних ме-

тодіски розв'язку обернених задач: 1-метод послідовних наближень Ляшенко-Милославського, 2-номограми Валеева, 3-ітерації Гісіна-Конжова-Несмелова, 4-модель Черемухіна-Кирисенко-Гурдіна. Висхідні розрахунки відбиття та пропускання границь розділу R_k , T_k та системи повітря-плівка-підложка-повітря τ , як розв'язок прямої задачі, сформували базу висхідних даних для машинного розв'язку згідно вказаних методик. Відносна різниця між заданими параметрами плівки та отриманими в ході обернених розв'язків складає теоретичну похибку методів. Апаратурні похибки враховувались шляхом зміни висхідних даних точного розв'язку прямої задачі на величину $\pm 0,5\%$; причому вважалось, що в максимумі прилад завищує покази, а в мінімумі занижує. Показується, що вже друге наближення для методів 1, 2 забезпечує точність не гірше 1% . Використання значень точного розв'язку R , T для методик 1+3 (кількість наближень для 1,2- чотири) виявляє практичне співпадання з висхідними даними при $\epsilon < 0,01$. Врахування апаратурних похибок показує, що для n та товщини плівки t при $\epsilon < 0,1$ похибка не перевищує 1% . Особливо значний вплив апаратурні похибки справляють на показник поглинання при низькому його рівні. Наприклад, при $\epsilon = 1 \cdot 10^{-4}$ методики 1,2 виявляють похибку порядку 400% , 3 - 180% , 4 - 3000% . Зменшення ϵ на порядок збільшує вказані похибки також на порядок. Таким чином, найбільша критична увага при визначенні n , ϵ , t плівок повинна виявлятися до показника поглинання ϵ .

Запропонована нами методика вимірювання ϵ , суть якої полягає в моделюванні границь розділу системи повітря-плівка-підложка-повітря однією ефективною границею розділу, на якій відбувається розщеплення падаючого потоку на відбитий та пропущений. Фізично це відповідає явищу двопроменевої інтерференції, а висхідне співвідношення для Бугерівського поглинання k має вигляд:

$$k = t^{-1} \ln \left\{ \frac{T}{\epsilon_1 - R_0} \right\} / \left\{ \frac{T_0}{\epsilon_1 - R_0} \right\}. \quad (12)$$

Тут T , R - пропускання та відбиття системи плівка-підложка, а T_0 , R_0 - чистої підложки. Розрахункова похибка визначення ϵ виявляє залежність від різниці показника заломлення плівки та підложки Δn та абсолютного значення n . Так, при $\epsilon = 0,001$; $\Delta n = 1$, $\Delta \epsilon / \epsilon \approx 12\%$. При менших значеннях ϵ , Δn , ця похибка значно менша; в цьому полягає позитивна перевага запропонованої методики.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. На даному етапі відсутня теорія, яка враховувала б весь комплекс явищ та процесів, що приймають участь в формуванні від-

битого шорсткою поверхнею випромінювання і прогнозувала б зв'язок його параметрів з мікроструктурними характеристиками рельєфу в широкому діапазоні зміни останніх.

2. Для поверхонь, отриманих методом вільного абразиву, функція розподілу мікронерівностей по висоті відрізняється від Гаусового типу, особливо в області надоліровок: апроксимація розподілом Грама-Шарлье, з параметрами асиметрії E_n , ексцесу S_n , відповідає експериментальним ситуаціям в широкому діапазоні змін висот мікронерівностей R_q . Встановлено, що хід E_n , S_n в функції R_q має універсальний характер, незалежний від матеріалу та технологічних режимів полірування. Висловлено припущення, що даний хід характерний для довільного перехідного режиму формування нового випадкового процесу із наявного.

3. Для розв'язку обернених задач оптики шорстких поверхонь вважається раціональним апроксимація експерименту математичними співвідношеннями, які допускають зворотній розв'язок. Проведення цього дозволило розробити спосіб вимірювання шорсткості та створити передумови розробки нового, по куту появи дзеркального блиску: дати статистичну інтерпретацію відомих явищ, що спостерігаються при відбиванні випромінювання від шорстких поверхонь.

4. Врахування реальної функції розподілу по висоті в межах теорії Ісаковича забезпечує відповідність експерименту фази регулярного відбивання. Розподіл відбитих інтенсивностей між регулярною та дифузною складовими не забезпечується.

5. Дослідження окремих параметрів світлового поля в функції параметрів шорсткості на монотонність та чутливість виявляють можливість їх використання для реалізації оптичних безконтактних способів вимірювання шорсткості.

6. Ступінь відповідності мікрогеометрія поверхонь плівки та підложки визначається співвідношеннями розмірів кристалітів конденсату та шорсткості підложки, а також товщиною плівки.

7. Визначені спектроінтерферометрією показник заломлення плівки зменшується лінійно із збільшенням шорсткості підложки, а показник поглинання – експонентно зростає.

8. Дослідженнями точності спектроінтерференційних методів визначення оптичних постійних тонких шарів встановлено, що найбільші похибки характерні для поглинання шару, які особливо зростають із збільшенням похибок вимірювання параметрів поля.

Список літератури по темі дисертаційної роботи

1. Гуминицкий С.Г., Житаржк В.Г. Определение температуры рекристаллизации тонких слоев по спектрам поглощения // Тез. докл. республик. конф. "Структура и физические свойства тонких пленок", 1977. - Ужгород, 1977. - С. 124-125.
2. Житаржк В.Г., Гуминицкий С.Г. Упрощенный метод определения показателя поглощения тонких интерференционных слоев // Журн. прикл. спектр., 1979. - Т. 28, В. 6. - С. 1067-1070.
3. Житаржк В.Г., Гуминицкий С.Г. О точности интерференционных методов определения оптических постоянных тонких слоев // Опт. и спектр., 1982. - Т. 52, В. 1. - С. 126-130.
4. Гуминицкий С.Г., Житаржк В.Г. Исследование интегрального рассеяния лазерного излучения шероховатой поверхностью // Тез. докл. 11 Всесоюз. совещания по распространению лазерного излучения в дисперсной среде. - Обнинск, 1982. - Ч. 1. - 1982. - С. 279-282.
5. Житаржк В.Г., Гуминицкий С.Г., Бабич В.В. Влияние величины шероховатости поверхности на относительную интенсивность отраженного ею потока // Тез. докл. V Всесоюз. научно-технич. конф. "Фотометрия и ее метрологическое обеспечение". - Москва, 1984. - ВНИИОФИ, 1984. - С. III.
6. Гуминицкий С.Г., Житаржк В.Г., Марчук Я.П. Исследование чувствительности компонент матриц диффузного отражения к параметрам шероховатости поверхности // Тез. докл. V Всесоюз. научно-технич. конф. "Фотометрия и ее метрологическое обеспечение". - Москва, 1984. - ВНИИОФИ, 1984. - С. 341.
7. Житаржк В.Г., Гуминицкий С.Г. Информативность поля рассеянного излучения и функция распределения высот микронеровностей шероховатых поверхностей // Тез. докл. V Всесоюз. школы по оптической обработке информации. - Киев, 1984. - С. 120-121.
8. Гуминицкий С.Г., Житаржк В.Г. Диагностика состояния шероховатых поверхностей с помощью лазерного излучения // Тез. докл. 111 Всесоюз. совещания по распространению лазерного излучения в дисперсной среде. - Обнинск, 1985. Ч. 111. - 1985. - С. 65-66.
9. Гуминицкий С.Г., Житаржк В.Г. Матрицы отражения шероховатых поверхностей / Черновицкий ун-т. им. Ю.Фельдковича. - Черновцы, 1985. - 27С. - Деп. в УкрНИИТИ 21.11.85, № 2597-Ук.
10. Ангельский О.В., Житаржк В.Г., Максимяк П.П. О возможности корреляционно-оптического исследования фазово-неоднородных стати-

стических поверхностей // Опт. и спектр. -1986. -Т.60. В.5. -С. 1013-1017.

11. Житарук В.Г., Гуминецкий С.Г. О роли функции распределения микронеровностей по высоте в определении параметров шероховатости оптическими методами // Тез. докл. XI Всесоюзн. науч.-технич. конф. "Неразрушающие физические методы и средства контроля". - М., 1987. -С. 108.

12. Ангельский О.В., Житарук В.Г., Магун И.И., Максимьяк П.П. // Корреляционно-оптические исследования шероховатых поверхностей / Ред. журн. "Дефектоскопия". Свердловск. 1988. -12с. -Деп. в УкрНИИТИ 12.01.88, № 197-Уж88. Корреляционно-оптические исследования шероховатых поверхностей // Дефектоскопия. реф. статьи -1988. -Т.5. -С. 96.

13. Гуминецкий С.Г., Житарук В.Г. Об отражении излучения шероховатых поверхностями // Журн. прикл. спектр. -1988. -Т.48. В.2. -С. 302-308.

14. Гуминецкий С.Г., Житарук В.Г. Статистическая интерпретация дифракционных явлений в дисперсных средах на примере шероховатых поверхностей // Тез. докл. IV Всесоюзн. сов. по распротр. лазер. излуч. в дисперсн. среде. -Обнинск-Барнаул. -1988. -Т.1. -С.232-233.

15. А.С. 1657950 (СССР). Способ измерения шероховатости поверхности детали. Житарук В.Г., Гуминецкий С.Г., Бучковский И.А. Оpubл. в В.И., 1991, №23.

Подписано к печати 31.08.83. Формат 1/16. физ. печ. л. 1,0
Усл. печ. л. 0,93. Уч. изд. л. 1,6. Зак. 688. Тир. 100

Черновицкий госуниверситет

ОУС 274018, Черновы, Ленин 249-а

AB28.532

AB 28.532