

УДК 535

## СПЕКТРАЛЬНІ ЗМІНИ БІЛОГО СВІТЛА, ЗУМОВЛЕНІ РОЗСІЯННЯМ НА ШОРСТКІЙ ПОВЕРХНІ

<sup>1)</sup>Чернишов О.О., <sup>1)</sup>Фельде Х.В., <sup>2)</sup>Богатирьова Г.В., <sup>2)</sup>Полянський П.В.; <sup>1)</sup>Кафедра кореляційної оптики, Чернівецький національний університет, м. Чернівці, Україна;  
<sup>2)</sup>Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", м. Київ, Україна

*Для пояснення забарвлення регулярної компоненти білого світла, розсіяного вперед безбарвною діелектричною шорсткою поверхнею, запропоновано модель шорсткої поверхні з помірними параметрами шорсткості як специфічного антивідбиваючого шару. Показано, що така модель дозволяє пояснити спостережувану на практиці послідовність кольорів розсіяної вперед компоненти білого світла по мірі збільшення шорсткості поверхні. Представлено експериментальні підтвердження на користь цього підходу*

### **Вступ**

Ця стаття присвячена явищу забарвлення розсіяної вперед (регулярної) компоненти білого світла, що пройшло крізь безбарвну діелектричну платівку із шорсткою поверхнею, поверхневі неоднорідності якої є співрозмірними з деякою довжиною хвилі зондуючого випромінювання. Вперше це явище було спостережено й пояснено на початку 70-х років ХХ століття [1, 2].

Спостерігаючи джерело білого світла крізь шорстку поверхню, отриману одностороннім шліфуванням скляної платівки електрокорундом із середнім розміром зерна від 7 мкм до 10 мкм, можна помітити несподівано інтенсивне забарвлення зображення джерела, яке змінюється від бірюзового до пурпурового. Даний ефект не може бути поясненим як результат селективного поглинання. Спостережувані перетворення нормованого спектру розсіяної вперед (регулярної) компоненти поліхроматичного пучка і, як наслідок, забарвлення зображення джерела мають, безумовно, інтерференційне походження. Наявність регулярної компоненти у розсіяному випромінюванні означає, що висоти поверхневих неоднорідностей,  $h$ , або, більш точно, середньоквадратичне відхилення рельєфу від базової лінії поверхні,  $\sigma_h$ , є співрозмірними із деякою довжиною хвилі поліхроматичного зондуючого пучка. Залежно від висот поверхневих неоднорідностей, спостерігається блакитне або червоне забарвлення, відповідно для менших та більших значень  $\sigma_h$  [3].

При поясненні цього ефекту виникають дві головні проблеми. Перша проблема полягає у поясненні забарвлення розсіяної вперед компоненти. Даючи якісне пояснення спектральному ефекту Вольфа (ефект кореляційно-індукованих спектральних зсувів [4, 5]), В. Татарський [6] порівнює кутовий розподіл поліхроматичного випромінювання від теплового джерела і від просторово частково когерентного джерела (див. Рис. 2). В першому випадку полярні діаграми для червоної та синьої компонент є однаковими, й початковий спектр джерела відтворюється у будь-якому напрямку спостереження. Однак,

коли поліхроматичне випромінювання (наприклад, від квазару) опромінює віддалену хмару космічного пилу, тоді, згідно теореми Ван-Циттерта – Церніке, така хмара діє як частково просторово когерентний вторинний випромінювач із різними полярними діаграмами для червоної та синьої компонент. Тому у різних напрямках спостерігається червоний або синій спектральні зсуви відносно початкового спектру, виключаючи напрямок вперед, де початковий спектр зберігається. Зрозуміло, що спектральні зміни найвиразніші, коли у певному напрямку спостереження зникає деяка спектральна компонента; тоді домінує доповнювальна компонента. Як можна бачити, головна особливість спектральних змін, зумовлених розсіянням на шорсткій поверхні, полягає у забарвленні саме розсіяної вперед компоненти пучка білого світла.

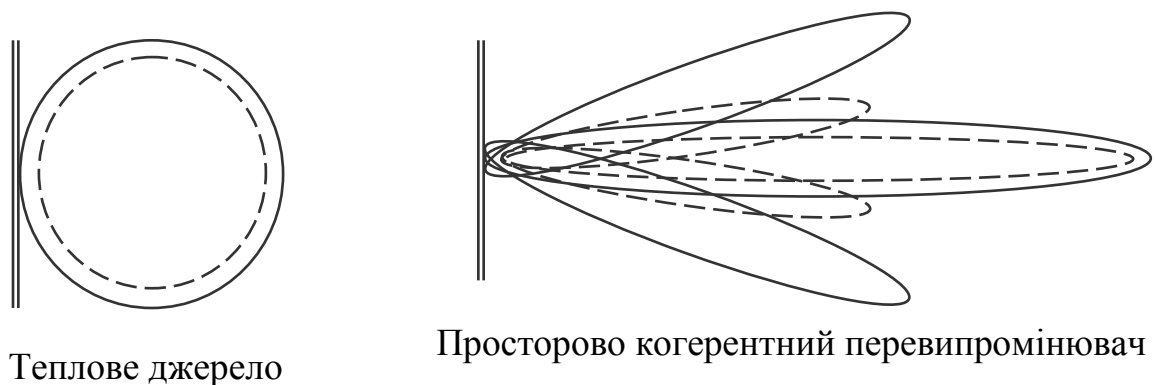


Рис. 2. Пояснення Татарського спектрального ефекту Вольфа. Суцільна і пунктирна лінії відповідають червоній та блакитній компонентам поліхроматичного випромінювання.

Друга проблема полягає у поясненні порядку чергування кольорів по мірі збільшення величини поверхневих неоднорідностей. Найближчим детермінованим аналогом спостережуваного ефекту є кільця Ньютона у проходячому поліхроматичному світлі. Можна було б очікувати такої ж послідовності кольорів, відповідно до зростання глибини рельєфу, як і для кілець Ньютона зі збільшенням радіусу, тобто, білий - коричнево-білий – коричневий – темно-фіолетовий – блакитний – сіро-блакитний – блакитно-зелений – жовто-зелений (для першого порядку) [7]. Проте на практиці послідовність кольорів відрізняється у цих двох випадках. А саме, при розсіянні на шорсткій поверхні послідовність кольорів виявляється близькою до випадку кілець Ньютона, спостережуваних на відбивання – від блакитного до червоного. Причиною є те, що у кільцях Ньютона реалізується чистий ефект інтерференції без будь-якого матеріального посередника. На відміну від цього, у досліджуваному нами випадку інтерференція – лише одна з компонент набагато складнішого явища, такого як світлорозсіяння на неоднорідностях шорсткої поверхні.

Ця стаття продовжує дослідження [8, 9], які стосуються явища спектральних змін регулярної складової поліхроматичного випромінювання, зумовлених розсіянням на шорсткій поверхні.

### **Підхід**

Для пояснення спостережуваної послідовності кольорів по мірі збільшення шорсткості ми застосовуємо модель шорсткої поверхні як перехідного шару з «проміжним» показником заломлення, чим узагальнюємо добре відому аналогію між світлорозсіюючою частинкою та шаром [10, 11].

Реальна функція розподілу неоднорідностей по висотах, що характеризує дану шорстку поверхню, в загальному випадку невідома. Однак, задаючись конкретною формою такої функції розподілу, можна розглядати шорстку поверхню як нерегулярний перехідний шар з «перехідним» показником заломлення, значення якого дорівнює середньому геометричному показників заломлення скла і повітря,  $n_2 = \sqrt{n_1 n_3}$ , див. Рис. 3. Якщо оптична товщина перехідного шару,  $n_2 H$ , дорівнює  $\lambda/4$  для деякої спектральної компоненти поліхроматичного зонduючого пучка, цей шар діє подібно до антивідбиваючого (просвітлюючого) покриття для даної компоненти. Хвилі, відбиті від двох «границь» перехідного шару, є протифазними, будучи практично рівноінтенсивними, й інтерферують деструктивно. Це неодмінно має місце для тієї чи іншої довжини хвилі через те, що  $\lambda < H$  для усіх спектральних компонент зонduючого пучка. В результаті, ця спектральна компонента та її спектральний окіл домінуватимуть у розсіяному вперед світлі. Цей підхід легко формалізується із використанням відомих формул для антивідбиваючих покриттів.

Така інтерпретація забарвлення регулярної компоненти поліхроматичного пучка, розсіяного вперед на шорсткій поверхні, узгоджується з розглядом детермінованого аналогу, представленим у роботах [12, 13]. Автори цих робіт досліджують випадок проходження пучка білого світла крізь рельєфно-фазову ґратку із прямокутним профілем з глибиною  $H$  та з однаковими ширинами верхньої та нижньої частин періоду. Спостерігаючи нульовий дифракційний порядок, вони приходять до висновку, що кожного разу, коли оптична різниця ходу між вершинами і впадинами рельєфу дорівнює  $m\lambda$  ( $m = 1, 2, 3, \dots$ ) для довжини хвилі, зв'язаної з певною спектральною компонентою, ця компонента переважає у розсіяному вперед випромінюванні. Дійсно, у цьому випадку відповідна різниця фаз,  $2\pi(n-1)H/\lambda$ , де  $n$  - показник заломлення скла, дорівнює  $m2\pi$ , і парціальні дифраговані вперед хвилі інтерферують з підсиленням. Переходячи від глибини рельєфу,  $H$ , до середнього квадратичного відхилення рельєфу від базової лінії, яка знаходиться на рівні  $H/2$ , можна визначити дисперсію висот  $\sigma_h^2 = \lambda^2/16$ , і  $\sigma_h = \lambda/4$ ; така ґратка діє для дифрагованої вперед компоненти пучка даної довжини хвилі подібно до чвертьхвильового шару. Зазначимо, що наведений розгляд передбачає таку ж послідовність кольорів для нульового дифракційного порядку при зростанні глибини рельєфу (від блакитного до черво-

ного), яка спостерігається для шорсткої поверхні із помірними параметрами шорсткості. Беручи до уваги те, що шорстка поверхня може розглядатись як набір розупорядкованих фазових ґраток, можна бачити, що цей результат цілком узгоджується із запропонованою моделлю шорсткої поверхні. Відмінність між двома підходами полягає у тому, що для регулярних ґраток спостерігаються вищі порядки послідовності кольорів, тоді як збільшення середнього квадратичного відхилення рельєфу випадкової шорсткої поверхні від базової лінії до  $\sigma_h \gg \lambda$  призводить до руйнування розсіяної вперед компоненти для усіх спектральних компонент зонduючого пучка білого світла.

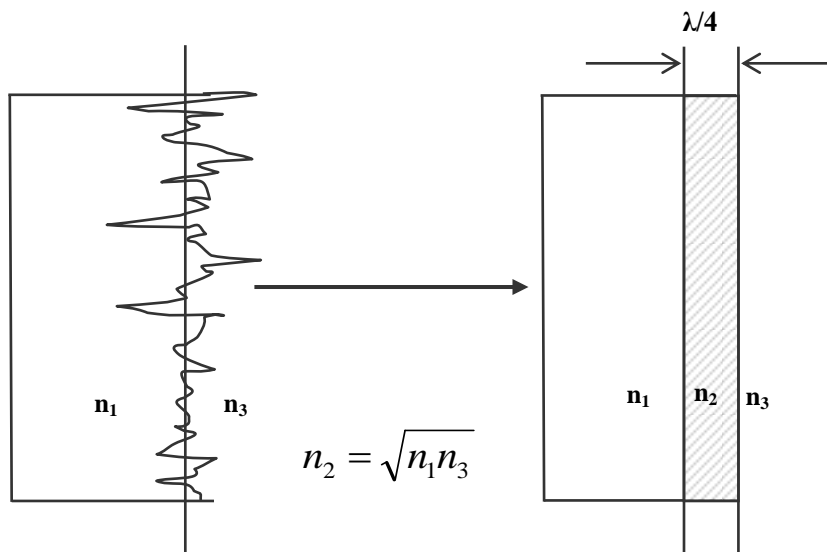


Рис. 3. Аналогія між шорсткою поверхнею та перехідним шаром з «проміжним» показником заломлення.

Згідно цієї моделі, для визначення кольору розсіяної вперед компоненти білого світла, найперше потрібно визначити відношення інтенсивностей розсіяного назад світла у функції довжини хвилі [14]:

$$\frac{I_r}{I_i} = 4 \left[ \frac{1 - \sqrt{n_1}}{1 + \sqrt{n_1}} \right]^2 \sin^2 \left[ \frac{\pi}{2} \left( \frac{\lambda_i}{\lambda_0} - 1 \right) \right], \quad (1)$$

де  $I_r$  та  $I_i$  – інтенсивності падаючого і відбитого пучків, відповідно,  $\lambda_i$  – поточна довжина хвилі зонduючого пучка,  $\lambda_0$  – довжина хвилі, амплітуда якої зануляється у відбитому випромінюванні, й потім знайти відносну інтенсивність розсіяної вперед компоненти для  $\lambda_i$  як різницю:

$$\frac{I_f}{I_i} = 1 - \frac{I_r}{I_i}. \quad (2)$$

В рівнянні (2) ми нехтуємо розсіянням світла в усіх інших напрямках. Зауважимо, що таке наближення є прийнятним лише для відносно малих висот

неоднорідностей (див. зокрема оцінки ефективної товщини перехідного шару, наведені нижче).

Для ілюстрації послідовності кольорів, яка впливає з моделі перехідного рівня, ми залучили метод хромаскопічної обробки забарвлених оптичних полів, впроваджений М. Беррі [15] для спостереження хроматичних ефектів поблизу ізольованих вихорів білого світла. Особливість досліджуваного нами випадку полягає у тому, що дана модель застосовується нами для регулярної компоненти розсіяного поля, яка є аналогом нульової інтерференційної смуги. Для визначення кольорів, RGB-величини тестованого поля масштабуються до постійної інтенсивності перетворенням:

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}_{CR} \Rightarrow \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} / \max\{R, G, B\}. \quad (3)$$

Ця процедура зберігає співвідношення між трьома RGB-величинами шляхом нормування їх значень до одиниці. Ми застосовували хромаскопічну обробку для розсіяної вперед компоненти зондуючого пучка білого світла. Найголовніша відмінність нашого підходу від підходу, реалізованого в [15] полягає в тому, що хромаскопічна обробка застосовується для однорідного за кольором зображення, а не для неоднорідного “ізолюваного” нуля спектральної комплексної амплітуди, що лінійно змінюється зі зміною позиції точки спостереження та з номером хвилі видимого діапазону [15]. Ми застосовували хромаскопічну обробку виходячи з рівняння (3) для дзеркально відбитої та вперед-розсіяної компонент пробного пучка білого світла.

Рис. 4 ілюструє нормовані спектральні розподіли вперед-розсіяної компоненти (фрагменти *a*, *b*, *c*) та розсіяної назад (дзеркально відбитої) компоненти (фрагменти *d*, *e*, *f*) для випадків занулення блакитної  $\lambda_b = 435,8 \text{ нм}$  (Рис. 4, фрагменти *a* і *d*), або зеленої  $\lambda_g = 546,1 \text{ нм}$  (Рис. 4, фрагменти *b* і *e*), або червоної  $\lambda_r = 700 \text{ нм}$  (Рис. 4, фрагменти *c* і *f*) компоненти [8]. Пари фрагментів *a* і *d*, *b* і *e*, та *c* і *f* відповідають ефективним глибинам перехідного рівня 88,36 нм, 110,73 нм і 141,93 нм, відповідно, що є близьким до 0.1 середнього діаметру корунду, використаного для отримання ефектів забарвлення (~10 мкм). Як видно з Рис. 4, насичений зелений колір не спостерігається у розсіяній вперед компоненті поліхроматичного випромінювання навіть у випадку, коли умови антивідбиваючого шару задовольняються саме для зеленого і зелений домінує у напрямку вперед. Кольори змінюються від синього до червоного, оминаючи зелений, у відповідності з теорією хромаскопу [15]. Для отримання насиченого зеленого кольору необхідно забезпечити нульове відбивання одночасно для синього і червоного й виділити вузький спектральний інтервал в околі зеленого (приблизно 555 нм). Але такій умові практично неможливо задовольнити. Спектральний інтервал, що пропускається перехідним шаром у випадку, коли зелений зникає у відбитій і переважає у розсіяній вперед компоненті, виявляється

надто широким, так що спостерігається практично те саме, що і за відсутності неоднорідностей, див. Рис. 4 **b**. Ситуація, подібна до цієї, реалізується у випадку, коли звичайне антивідбиваюче покриття для зеленого використовується у лінзах для забезпечення правильної передачі кольорів.

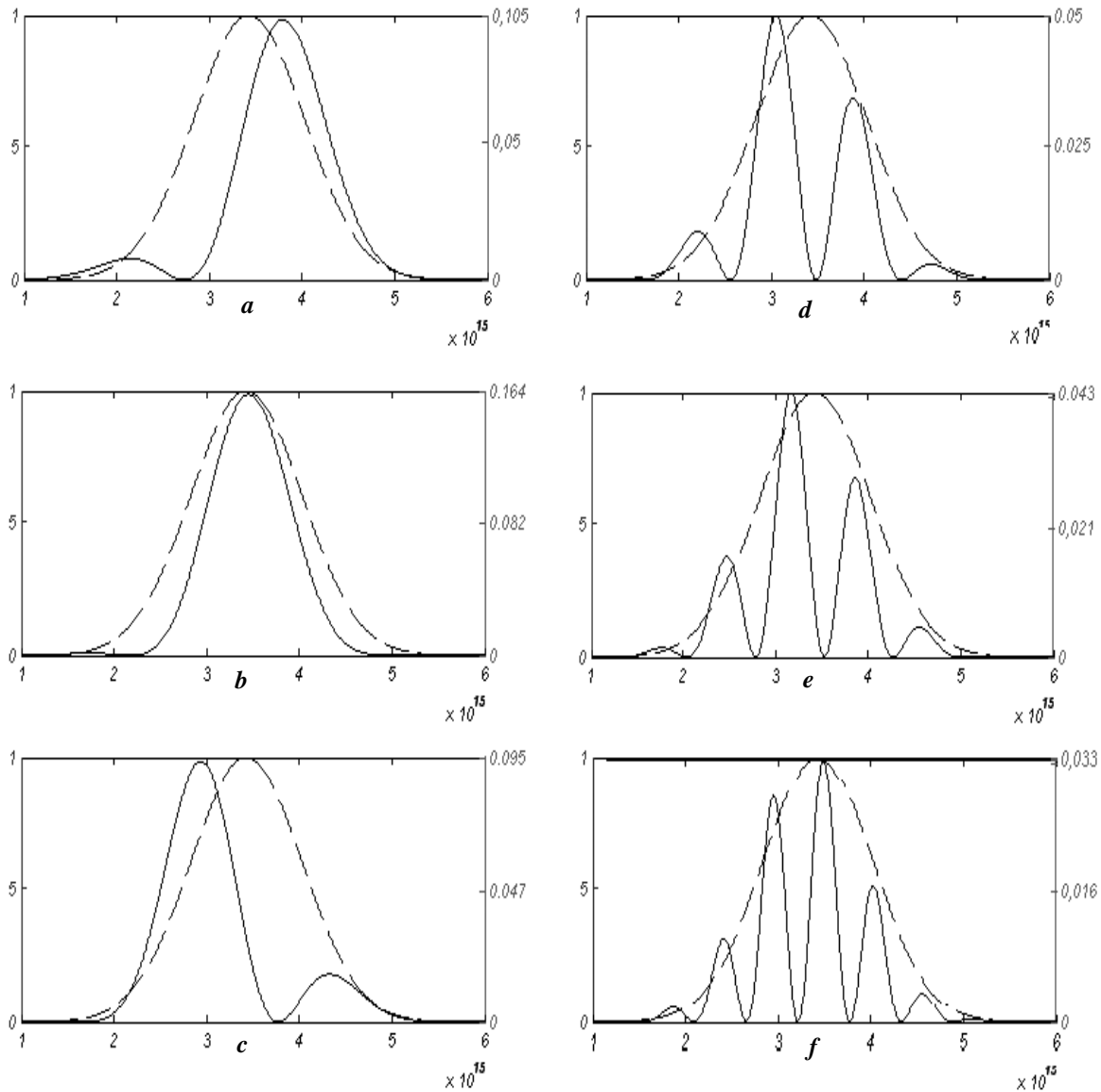


Рис. 4. Нормовані спектральні розподіли інтенсивності вперед-розсіяної компоненти (**a**, **b**, **c**) та дзеркально відбитої компоненти (**d**, **e**, **f**) для випадків занулення компонент  $\lambda_b = 435,8 \text{ нм}$  (**a**, **d**),  $\lambda_g = 546,1 \text{ нм}$  (**b**, **e**) та  $\lambda_r = 700 \text{ нм}$  (**c**, **f**), відповідно.

### Експеримент

Як відомо, звичайне мікроскопічне спостереження шорсткої поверхні не дає вичерпної інформації щодо топографії поверхні. Попри те, мікроскопічне дослідження шорстких поверхонь з різним ступенем механічної обробки надає можливість аргументувати зазначену послідовність кольорів вперед розсіяної компоненти пучка білого світла. Ідею експерименту ілюструє Рис. 5. Обираєть-

ся зразок скла з сильно хвилястою поверхнею (якість віконного скла). Використовуючи такий зразок скла зі значними відхиленнями макроповерхні від базової лінії, можна спостерігати у динаміці зміни кольору, індуковані розсіянням на шорсткій поверхні. А саме, джерело білого світла спостерігається крізь різні частини шорсткої поверхні й фіксуються ділянки, що забезпечують блакитне або червоне забарвлення. При цьому отримуються мікроскопічні зображення відповідних ділянок шорсткої поверхні для визначення їх топографії.

На початковому етапі механічної обробки поверхні шорсткості найперше виникають на «пагорбах», де утворюється найбільша кількість розсіюючих центрів. На «схилах» отримується усе менше і менше таких центрів. І зрештою, «впадини» є практично не обробленими, і розсіюючі центри тут майже відсутні. На Рис. 5 показано мікрофотографії (з помірним збільшенням  $\times 40$ ) відповідних ділянок на зразку шліфованого скла, виготовленого шліфуванням електрокорундом з середнім діаметром зерна 10 мкм. Середній поперечний розмір ізольованої неоднорідності складає приблизно 15-20 мкм.

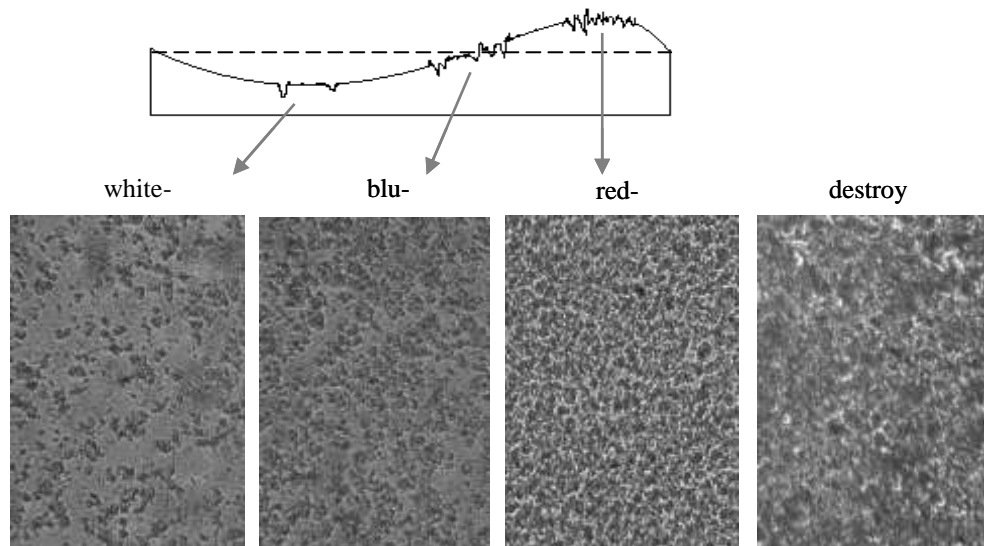


Рис. 5. Топографія перехідної шорсткої поверхні, яка зумовлює забарвлення розсіяної вперед компоненти пучка білого світла; правий фрагмент показує глибоко шорстку поверхню, на якій розсіяна вперед компонента повністю руйнується

Крізь ділянку шліфованого скла, що відповідає лівому рисунку, спостерігається незабарвлене джерело білого світла. Крізь другу ділянку з помірною кількістю неоднорідностей спостерігається джерело блакитного кольору. Крізь третю ділянку, де необроблені площі дуже малі, спостерігається джерело світла червоного кольору. Остання ділянка відповідає глибоким неоднорідностям, які руйнують розсіану вперед компоненту. Природа індукованого розсіянням забарвлення регулярної компоненти є найбільш очевидною з другого фрагменту Рис. 5. Зрозуміло, що забарвлення є результатом інтерференції світла, що пройшло крізь необроблені ділянки скла, з світлом, розсіяним вперед на окре-

мих неоднорідностях. Кількість неоднорідностей має бути достатньо великою, щоб оброблені й необроблені ділянки були приблизно однаковими.

Внаслідок даного спостереження (проходження світла крізь фрагменти шорсткої поверхні від першого фрагменту Рис. 5 до третього) стає зрозумілою винятковість, з якою спостерігається блакитний зсув для розсіяної вперед компоненти пучка білого світла у порівнянні із червоним зсувом (процитуємо з цього приводу загальновідомий вислів: “Одного разу під блакитним Місяцем” [16]). Синій зсув спостерігається лише у дуже вузькому інтервалі величин дисперсії фаз граничного поля, тобто, в інтервалі між екстремально малими висотами поверхневих неоднорідностей, за яких забарвлення ще відсутнє, та дещо більшими висотами неоднорідностей, що є необхідними для забезпечення блакитного зсуву. Потім синій зсув замінюється червоним, який і спостерігається аж до повного руйнування регулярної компоненти. За нашою оцінкою, середнє квадратичне відхилення профілю шорсткої поверхні від базової лінії для спостереження блакитного зсуву становить від 0,05  $\lambda$  до 0,1  $\lambda$ . Відповідна дисперсія фази у граничному полі об’єкта становить приблизно 0,6. Як відомо, блакитний Місяць спостерігався за подібних умов: блакитний зсув передбачає розсіяння на хмарі дуже малих монодисперсійних частинок [16].

Послідовне чергування кольорів, а саме, виникнення синього знову після червоного, мало б місце лише для певних специфічних функцій розподілу висот поверхневих неоднорідностей, наприклад, для рівномірної функції розподілу висот. Для такого розподілу спектральний модифікатор [4] описується як квадрат *sinc* – функції з послідовними максимумами [1]. Реалізація такого розподілу на практиці є проблематичною. У той самий час, послідовні спектральні зміни зображення джерела білого світла можуть спостерігатись в нульовому порядку дифракції чисто фазової (відбіленої) голографічної ґратки, для якої спектральним модифікатором є квадрат функції Бесселя першого роду нульового порядку [17].

### **Висновки**

Представлені у даній роботі результати підтверджують адекватність запропонованої моделі спектральних перетворень, зумовлених розсіянням світла на шорсткій поверхні, а саме, модель перехідного шару, що відповідає чвертьхвильовому антивідбиваючому покриттю і забезпечує переважне пропускання випромінювання у напрямку вперед для деякого спектрального інтервалу. Особливість дослідженого явища полягає у незвичному порядку кольорів, що супроводжує зростання глибини поверхневого рельєфу. Цей порядок є протилежним порядку чергування кольорів у кільцях Ньютонів в поліхроматичному («білому») світлі, що спостерігаються на пропускання. На відміну від попередніх моделей, що пояснюють спектральні зміни, зумовлені розсіянням, нами запропоновано визначення спектральної складової, для якої переважає розсіяна вперед компонента, а не складової, для якої ця компонента зникає. Ми також продемонстрували топографію неоднорідностей, яка відповідає блакитному і червоному забарвленню для розсіяної вперед компоненти пучка білого світла.



Представлені результати підтверджують аналогію між світлорозсіюючою частинкою, шаром та шорсткою поверхнею із «перехідним» показником заломлення та можуть бути використані у подальшому для розробки приладів експрес-контролю шорсткості поверхні.

### Література

1. В.К. Полянский, Спектральные характеристики бесцветного стекла с шероховатой поверхностью // Журн. Прикл. Спектр. – 1970. – Т. 13. – С. 1039-1042.
2. В.К. Полянский, И.Б. Котлярова, Кооперативные эффекты на шероховатой поверхности в проходящем излучении // Опт. Спектр. – 1971. – Т. 30, № 6. – С. 1142-1145.
3. A.A. Chernyshov, Ch.V. Felde, H.V. Bogatyryova, P.V. Polyanskii. Scattering-induced spectral changes // Proc. SPIE. – 2008. – V. 7008 OE. – P. 1-6.
4. E. Wolf. Non-cosmological redshifts of spectral lines // Nature. – 1987. – V. 326. – P. 363-365.
5. E. Wolf and D.F.V. James. Correlation-induced spectral changes // Rep. Prog. Phys. – 1996. – V. 59. – P. 771-818.
6. V.I. Tatarskii. An intuitive introduction to the Wolf effect. // Pure and Applied Optics. – 1998. – V. 7. – P. 953-957.
7. Г.С. Ландсберг. Оптика. -М.: Наука, 1976. – 928 с.
8. O.V. Angelsky, P.V. Polyanskii, S.G. Hanson. Singular-optical coloring of regularly scattered white light // Optics Express. – 2006. – V. 14, No. 17. – P. 7579-7586.
9. P.V. Polyanskii. *Optical Correlation Applications and Techniques*, Chapter 2 (O. Angelsky, Ed.) // SPIE Press, Bellingham. – A168 - 2007.
10. Г.Ван де Хюлст. Рассеяние света малыми частицами: Пер. с англ. -М.: ИИЛ, 1961. – 536 с.
11. К. Борен, Д. Хафмен. Поглощение и рассеяние света малыми частицами: Пер. с англ. -М.: Мир, 1986. – 664 с.
12. К. Кноп. Color pictures using the zew diffraction order of phase grating structures // Opt. Commun. – 1976. – V. 18. – P. 3-10.
13. H.J. Caulfield. Handbook of Optical Holography (Section 10.2) // Academic Press, New York. - 1979.
14. F.S. Grawford, Jr. Waves. Berkley Physics Course Vol. 3. McGraw-Hill, New York. – 1968.
15. V. Berry. Exploring the colours of dark light // New J. Phys. – 2002. – V. 4, № 74.1.
16. S.R. Wilk. Once in a blue Moon // Opt. Phot. News. – 2006. – V. 17, №3. – P. 20-21.
17. Дж. Гудмен. Статистическая оптика: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 528 с.

Чернышов А.А., Фельде К.В., Богатырева Г.В., Полянский П.В. **Спектральные изменения белого света, обусловленные рассеянием на шероховатой поверхности**  
Для объяснения окрашивания регулярной составляющей белого света, рассеянного вперед бесцветной диэлектрической шероховатой поверхностью, предложена модель шероховатой поверхности с умеренными параметрами шероховатости как специфического просветляющего слоя. Показано, что такая модель позволяет объяснить наблюдаемую на практике последовательность цветов рассеянной вперед компоненты белого света по мере увеличения шероховатости поверхности. Представлено экспериментальное подтверждение в пользу такого подхода.

Chernyshov A.A., Felde H.F., Bogatyryova, H.V. Polyanskii P.V. **Spectral changes white light scattered by rough surface**  
To explain coloring of the regular component of a white light scattered by a colorless dielectric slab with a rough surface, we apply the model of rough surface with rough's moderate parameters associated with absorption surface. It is shown that such model permits to explain component's sequence of colors of a scattered white light according to roughness surface grow. Experimental confirmation of this model is presented.

*Надійшла до редакції  
25 лютого 2009 року*