

О.В.Дуболазов, Ю.О.Ушенко, М.П.Горський, В.О.Ушенко
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

ДІАГНОСТИКА ПОВЕРХНЕВОЇ СТРУКТУРИ ПОЛІГРАФІЧНОГО ПАПЕРУ НА ОСНОВІ МЕТОДІВ СТАТИСТИЧНОГО ПОЛЯРИЗАЦІЙНОГО АНАЛІЗУ ЛАЗЕРНИХ МІКРОСКОПІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Дана стаття присвячена вивченню питання діагностики поверхневої структури різних типів поліграфічного паперу шляхом використання поляризаційних методів аналізу лазерних мікроскопічних зображень. Розглянуто можливості використання статистичного аналізу дослідження поверхневої структури паперу, на прикладі офсетного паперу Maestro Print та крейдованого паперу Galerie Art Gloss & Silk.

Ключові слова: папір, поляризація, лазерне зображення, статистичний аналіз.

This article is devoted to studying issues of surface structures diagnosis of various types of printing paper by use of polarization methods of laser microscopic images analysis. Were found the possibilities of using statistical analysis of paper surface structure, which based on using offset paper Maestro Print and coated paper Galerie Art Gloss & Silk.

Keywords: paper, polarization, laser image, statistical analysis.

Вступ

На даний час до основних оптичних властивостей поліграфічного паперу відносять такі характеристики як білизна та яскравість, непрозорість, глянець і гладкість, кольорові параметри. Оптична діагностика властивостей таких складних фазово-неоднорідних об'єктів переважно включає спектрофотометричні методи [1 - 7].

За останні 10 років на базі застосування лазерів сформувався новий підхід в оптичні діагностиці – лазерна поляриметрія [8], яка використовує вектор – параметричний підхід і базується на аналізі оптичних властивостей з використанням статистичного аналізу координатних розподілів (поляризаційних map) азимутів і еліптичності поляризації точок лазерних зображень [9 - 12]. На основі даного підходу установлені взіємозв'язки між структурою поверхневої складової фазово-неоднорідних шарів та статистичними моментами 1-го – 4-го порядків, які характеризують поляризаційні мапи. З іншого боку, у завданнях контролю гладкості поліграфічного паперу, що обумовлений мікрорельєфом його поверхні і визначає відповідну “роздільну здатність”, такий підхід може дати нову додаткову діагностично актуальну інформацію.

Наша робота спрямована на експериментальне дослідження поляризаційних властивостей поліграфічного паперу різних типів методами поляризаційного картографування з метою визначення сукупності статистичних критеріїв для характеристики і диференціації його гладкості.

Механізми формування поляризаційно-неоднорідних зображень шорсткої поверхні паперу

Оптичні властивості кожної мікроплощинки шорсткої поверхні паперу вичерпно повно характеризує оператор Джонса $\{R\}$ наступного вигляду [9, 12]

$$\{R\} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & p_y/p_x \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Можна показати, що у межах розмірів $(\Delta x, \Delta y)$ однієї мікроплощинки має місце зміна азимуту α поляризації, заломленого плоскополяризованої з азимутом α_0 лазерної хвилі

$$\alpha(\Delta x, \Delta y) = \arctg \frac{p_y U_{0y}}{p_x U_{0x}} = \arctg \left[(\Delta p_{xy}) / g \alpha_0 \right], \quad (2)$$

де $U_{0x}; U_{0y}$ - ортогональні складові амплітуди U_0 , p_x, p_y - френелівські амплітудні коефіцієнти пропускання [6].

Таким чином, у наближенні однократного розсіяння, поляризаційне зображення шорсткої поверхні паперу являє собою координатно розподілені ділянки $(\Delta x, \Delta y)$ з різними азимутами поляризації.

Експериментальна схема і методика поляриметричних досліджень

На рис. 1 показано оптичну схему для вимірювання сукупності координатних розподілів азимутів поляризації зображень шарів поліграфічного паперу.

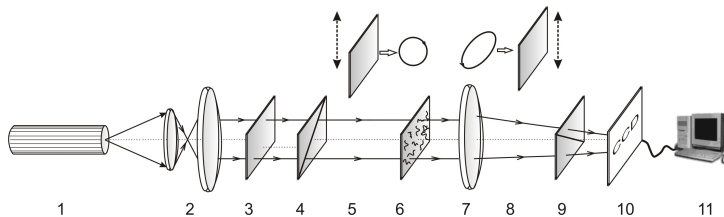


Рис. 1. Оптична схема поляриметра, де 1 – напівпровідниковий лазер; 2 – коліматор; 4, 8 – чвертьхвильові пластівки; 3, 9 – поляризатор та аналізатор відповідно; 5 – світло подільник; 6 – об’єкт дослідження; 7 – мікрооб’єктив; 10 – CCD камера; 11 – персональний комп’ютер

Освітлення проводилося паралельним ($\varnothing = 10^4 \mu\text{м}$) пучком напівпровідникового лазера ($\lambda = 0.64 \mu\text{м}$, $W = 5.0 \text{ мВт}$). Поляризаційний освітлювач складається з; 5 поляризатора 3 і чвертьхвильової пластинки 3, що забезпечує формування лазерного пучка з довільним азимутом (α_0) або еліптичністю (β_0) поляризації.

Поляризаційні зображення шару поліграфічного паперу 6 за допомогою мікрооб’єктиву 7 проектувалися в площину світлочутливої площини (800x600 пікселів) CCD-камери 10, яка забезпечувала діапазон вимірювання структурних елементів зображення для наступних розмірів 2 $\mu\text{м}$ – 2000 $\mu\text{м}$.

Аналіз зображень шарів поліграфічного паперу 6 здійснювався за допомогою поляризатора 8 та чвертьхвильової пластинки 9.

За допомогою обертання осі пропускання аналізатора 9 на кут Θ в межах $= 0^0$ – 180^0 визначаються масиви мінімальних і максимальних рівнів інтенсивності $I_{\min}(m \times n); I_{\max}(m \times n)$ зображення паперу для кожного окремого пікселя (mn) CCD-камери і, відповідні їм кути повороту $\Theta(m \times n)(I(m \times n) \equiv \min)$. Далі розраховуються координатні розподіли (поляризаційні мапи) азимутів поляризації з використанням співвідношення

$$\alpha(m \times n) = \Theta(I(m \times n) \equiv \min) - \frac{\pi}{2}. \quad (1)$$

Найбільш об'єктивно статистичну структуру координатних розподілів азимутів поляризації точок лазерного зображення характеризує сукупність моментів $Z_{k=1;2;3;4}$ обчислена за співвідношеннями (2) [11]

$$\begin{aligned} Z_1 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |(\alpha)_i|; \\ Z_2 &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\alpha)_i^2}; \\ Z_3 &= \frac{1}{Z_2^3} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\alpha)_i^3; \\ Z_4 &= \frac{1}{Z_2^4} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\alpha)_i^4, \end{aligned} \quad (2)$$

де $N = 800 \times 600$ - повна кількість пікселів CCD-камери 10 (рис. 1), яка реєструє поляризаційно-неоднорідне об'єктне поле шарів біологічних об'єктів людини.

Експериментальні результати та їх обговорення

В якості об'єктів дослідження нами використовувалася два типи паперу

- Багатофункціональний офсетний папір Maestro Print високої якості зі ступенем білизни 96% та рівномірною структурою – зразок А.
- Крейдований папір Galerie Art Gloss & Silk з невеликим вмістом деревмаси та двохсторонім трьохшаровим крейдованим покриттям (система сертифікації згідно норм UNI EN ISO 9002) – зразок Б.

На рис. 2 приведені поляризаційно візуалізовані (у перехрещених $\Theta = 90^0$ площинах пропускання поляризатора 4 і аналізатора 9) зображення поверхні паперу обох типів.

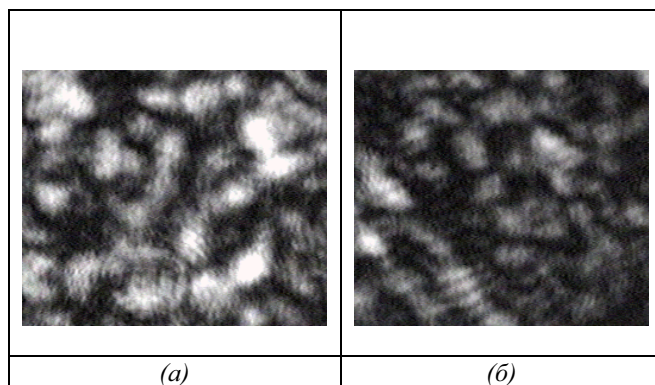


Рис. 2. Поляризаційно візуалізовані лазерні зображення поверхні паперу типу А (а) і Б (б).
Пояснення у тексті роботи

Видно, що кожне лазерне зображення (рис. 2) являє собою сукупність ділянок темних і світлих плям різної інтенсивності. Згідно закону Малюса [8] темні ділянки зображення відповідають структурі де азимут поляризації максимально відрізняється від від стану поляризації (0^0) зондуєчого пучка і, навпаки.

Порівняльний аналіз лазерних зображень зразків обох типів виявив, що зображення зразку офсетного паперу характеризується більшою площею світлих ділянок (рис. 2а). Даний факт вказує на більшу поляризаційну структурність відповідного зображення за рахунок впливу більшої шорсткості офсетного паперу у порівнянні з крейдованим.

Рис. 3 і рис. 4 ілюструють поляризаційні мапи зразків типу А і Б (ліві частини) та гістограми розподілу випадкових значень азимутів поляризації (праві частини).

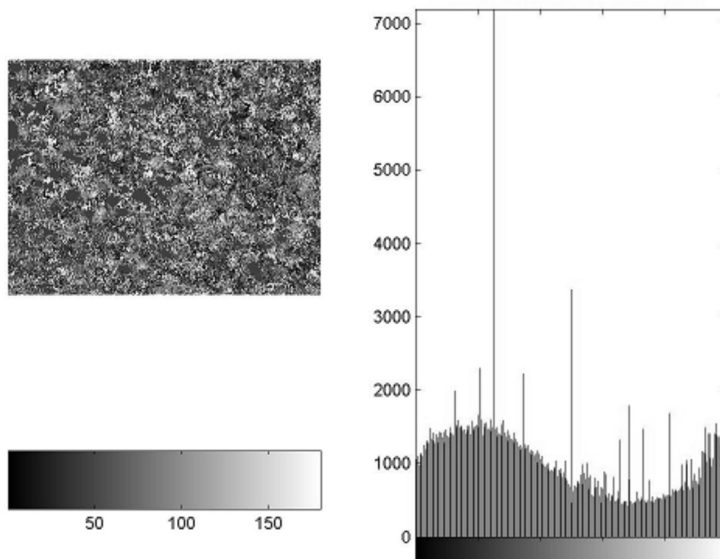


Рис. 3. Поляризаційна структура лазерного зображення офсетного паперу.
Пояснення у тексті

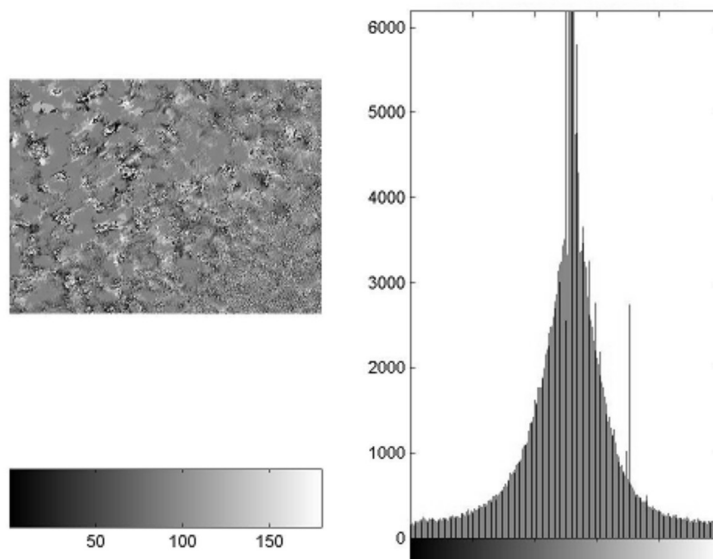


Рис. 4. Поляризаційна структура лазерного зображення офсетного паперу.
Пояснення у тексті

Установлено, що різним типам поліграфічного паперу з різною мікрогеометрією поверхні відповідають суттєві різні координатні розподіли азимутів поляризації. Чим більша мікрогеометрія тим більш широкий діапазон зміни азимутів (співвідношення (2)) поляризації (рис. 3) і, навпаки (рис. 4).

У таблиці 1 представлені порівняльні дані про величини статистичних моментів, які характеризують поляризаційні мапи поверхні поліграфічного паперу різних марок.

Таблиця 1.

Середнє, дисперсія, асиметрія та ексцес розподілів $\alpha(m \times n)$

$Z_{k=1;2;3;4}^{\alpha}$	Тип А	Тип Б
Z_1^{α}	$0,62 \pm 0,071$	$0,16 \pm 0,021$
Z_2^{α}	$0,12 \pm 0,016$	$0,25 \pm 0,031$
Z_3^{α}	$0,41 \pm 0,053$	$1,09 \pm 0,13$
Z_4^{α}	$0,34 \pm 0,045$	$2,31 \pm 0,35$

З одержаних даних експериментальних досліджень статистичної структури розподілів поворотів поляризації зразків обох типів впливає об'єктивна можливість достовірної лазерної поляриметричної діагностики і диференціації гладкості поліграфічного паперу. Найбільш інформативними виявилися статистичні моменти 3-го – 4-го порядків розподілу значень азимутів поляризації лазерного об'єктного поля.

Установлені наступні діапазони відмінностей між статистичними моментами $Z_{k=1;2;3;4}^{\alpha}$ поляризаційних лазерних зображень зразків обох типів, - середнє

(зменшення у 1,2 – 1,45 рази); дисперсія (збільшення у 1,25 – 1,79 рази); асиметрія (збільшення у 3,7 – 6,4 раз) і ексцес (збільшення у 2,45 – 4,2 рази).

1. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Ч.2. Многократное рассеяние, турбулентность, шероховатые поверхности и дистанционное зондирование: Пер. с англ. – М.: Мир, 1981. – 318с.
2. H. C. van de Hulst. *Light scattering by small particles*. – New York: Dover, 1957.
3. Wang X. *Polarized light propagation through the scattering media: time-resolved Monte Carlo and experiments* / X. Wang, L. - H. Wang, C. - W. Sun, C. C. Yang // *J. Biomed. Opt.* – 2003. – Vol. 8. – P. 608-617.
4. Gang Yao. *Two-dimensional depth-resolved Mueller matrix characterization of biological tissue by optical coherence tomography* / Gang Yao, Lihong V. Wang // *Opt. Lett.* – 1999. – Vol. 24. – P. 537-539.
5. Wang X. *Propagation of polarized light in birefringent turbid media: a Monte Carlo study* / X. Wang, L. - H. Wang // *J. Biomed. Opt.* – 2002. – Vol. 7. – P. 279-290.
6. Shuliang Jiao. *Depth-resolved two-dimensional Stokes vectors of backscattered light and Mueller matrices of biological tissue measured with optical coherence tomography* / Shuliang Jiao, Gang Yao, Lihong V. Wang // *Appl. Opt.* – 2000. – Vol. 39. – P. 6318-6324.
7. Shuliang Jiao. *Two-dimensional depth-resolved Mueller matrix of biological tissue measured with double-beam polarization-sensitive optical coherence tomography* / Shuliang Jiao, Lihong V. Wang // *Opt. Lett.* – 2002. – Vol. 27. – P. 101-103.
8. Alexander G. Ushenko, "Polarization structure of laser scattering fields," *Optical Engineering*, vol. 34(4), pp. 1088-1093, 1995.
9. A.G. Ushenko, I. Z.Misevich, V. Istratiy, I. Bachyns'ka, A. P. Peresunko, Omar Kamal Numan, and T. G. Moiyusuk, "Evolution of Statistic Moments of 2D-Distributions of Biological Liquid Crystal Net Mueller Matrix Elements in the Process of Their Birefringent Structure Changes," *Advances in Optical Technologies*, vol. 2010, Article ID 423145, 2010.
10. O. V. Dubolazov, A. G. Ushenko, V. T. Bachynsky, A. P. Peresunko, and O. Ya. Vanchulyak, "On the Feasibilities of Using the Wavelet Analysis of Mueller Matrix Images of Biological Crystals," *Advances in Optical Technologies*, vol. 2010, Article ID 162832, 2010.
11. A.G. Ushenko, "Laser diagnostics of biofractals," *Quantum Electronics*, vol. 29(12), pp. 1078–1084, 1999.
12. O.V. Angel'skii, A.G. Ushenko, A.D. Arkhelyuk, S.B. Ermolenko, D.N. Burkovets, "Structure of matrices for the transformation of laser radiation by biofractals," *Quantum Electronics*, vol. 29(12), pp. 1074-1077, 1999.