

УДК 535.361; 535.555

О.Ю. НОВАКОВСЬКА, О.В. ДУБОЛАЗОВ, О.В. ОЛАР, Ю.О. УШЕНКО, Л.Й. ПІДКАМІНЬ,
Ю.Я. ТОМКА

ТОПОГРАФІЧНА СТРУКТУРИ МЮЛЛЕР-МАТРИЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ПОЛІКРИСТАЛІТНИХ МЕРЕЖ БІОЛОГІЧНИХ ШАРІВ

*Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича
Вул. Коцюбинського, 2, м. Чернівці, Україна*

Анотація. У даній статті розглядається можливість виявлення основних механізмів формування мюллер-матричних зображень мережі криволінійних двоприменезаломлюючих кристалітів і визначення основних сценаріїв формування топографічної структури контурів характеристичних значень координатних розподілів матричних елементів.

Аннотация. В данной статье рассматривается возможность выявления основных механизмов формирования Мюллер-матричных изображений сети криволинейных двоприменезаломлюющих кристаллитов и определения основных сценариев формирования топографической структуры контуров характеристических значений координатных распределений матричных элементов.

Abstract This article discusses the possibility of identifying the basic mechanisms for the formation of Muller-matrix images of a network of curvilinear two-crystalline crystallites and identifying the main scenarios for the formation of the topographic structure of the contours of the characteristic values of the coordinate distributions of matrix elements.

Ключові слова: топографія, матриця Мюллера, біологічні об'єкти, полікристаліти.
DOI: 10.31649/1681-7893-2018-36-2-35-42

ВСТУП

До сих пір у численних дослідженнях у галузі сингулярної оптики [1 - 3] об'єктом слугували різноманітні розподіли та топографічні структури, які сформовані двома основними типами поляризаційно-сингулярних станів [4 - 7]. До них відносяться L -стани, або лінійно-поляризовані стани, при яких невизначеним (сингулярним) є напрямок можливого обертання площини коливань вектора електричної напруженості лазерного випромінювання. Іншим поляризаційно-сингулярним станом є так звані С-стани, або циркулярно-поляризовані стани. При цьому поза увагою дослідників залишалися так звані «об'єктні механізми», які визначаються як конфігурацією елементів об'єкта, так і їхніми оптично-анізотропними властивостями. Перші пошукові результати у даному напрямку були одержані у роботах [8, 9] та систематизовані у [10].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

1. З'ясування взаємозв'язку між умовами формування поляризаційно-сингулярних станів у граничному полі (зображення) та особливими (характеристичними значеннями) параметрів, які характеризують об'єкт.
2. Визначення особливостей формування мереж характеристичних значень вектор-параметричних і мюллер-матричних зображень.
3. Виявлення діагностичних можливостей визначення змін орієнтаційно-фазової побудови полікристалітних мереж шляхом дослідження топографічних структур мереж характеристичних значень.

1. КОРОТКА ТЕОРІЯ МЕТОДУ

У рамках сингулярно-параметричного підходу поляризаційно-сингулярному стану лазерної хвилі відповідають такі характеристичні значення четвертого параметра вектора Стокса [3]

$$\begin{aligned} L: \beta = 0 &\rightarrow S_4 = 0; \\ C: \beta = \pm \frac{\pi}{4} &\rightarrow S_4 = \pm 1. \end{aligned} \quad (1)$$

1. На основі співвідношень (1) визначають відповідні (експериментально вимірювальні) характеристичні значення сукупності елементів матриці Мюллера. Предметом такого аналізу у нашій роботі обрано два типи Мюллер-матричних зображень біологічного шару:

2. Координатні розподіли діагональних елементів матриці Мюллера m_{22} і m_{23} , які характеризують ступінь перетворення азимута поляризації лазерної хвилі біологічними кристалітами, оптичні осі яких зорієнтовані у двох напрямках $0^\circ - 90^\circ (m_{22})$ і $+45^\circ - (-45^\circ) (m_{32})$. У цьому сенсі такі Мюллер-матричні зображення будемо називати орієнтаційними.

3. Координатні розподіли діагонального матричного елемента m_{44} , величина якого визначається фазовими зсувами між ортогональними компонентами амплітуди лазерної хвилі, що формуються двоприменезаломленням мережі біологічних кристалітів. У цьому сенсі такі Мюллер-матричні зображення будемо називати фазовими.

2. КООРДИНАТНА ПОБУДОВА МЮЛЛЕР-МАТРИЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ МЕРЕЖІ КОЛОПОДІБНИХ ДВОПРОМЕНЕЗАЛОМЛЮЮЧИХ ЦИЛІНДРІВ

Результати відповідних обчислень наведені на серії рис. 1.

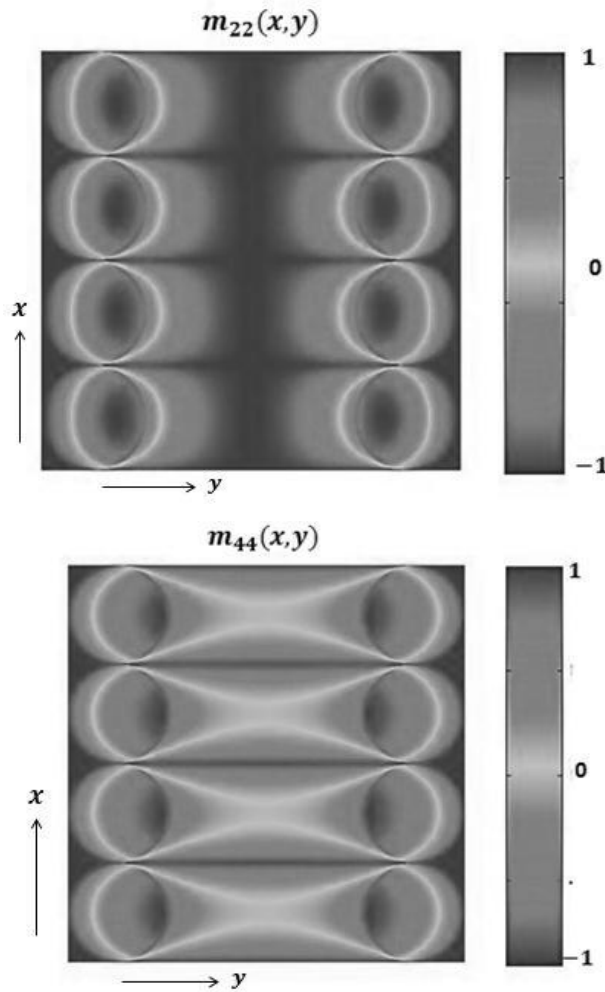


Рис. 1. Координатний розподіл значень орієнтаційного m_{22} і фазового m_{44} елемента матриці Мюллера полікристалітної мережі колоподібних циліндрів

З одержаних даних про координатну структуру розподілів усіх типів Мюллер-матричних зображень

модельної полікристалітної мережі видно, що:

1. Усі двовимірні розподіли $m_{22}(x,y)$ і $m_{44}(x,y)$ координатно-неоднорідні з індивідуальною структурою.
2. Координатний розподіл мюллер-матричного зображення орієнтаційного елемента характеризується максимально широким діапазоном зміни ($-1 \leq m_{22} \leq 1$) власних значень.
3. Мюллер-матричне зображення фазового елемента $m_{44}(x,y)$ також характеризується максимальним діапазоном зміни власних значень ($-1 \leq m_{44} \leq 1$). Проте його двовимірна структура координатно-неоднорідна та суттєво відмітна від попередньо проаналізованих мюллер-матричних зображень.

3. ТОПОГРАФІЧНА ПОБУДОВА МЮЛЛЕР-МАТРИЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ МЕРЕЖІ КОЛОПОДІБНИХ ДВОПРОМЕНЕЗАЛОМЛЮЮЧИХ ЦИЛІНДРІВ

Ідея такого (в подальшому – топографічного) підходу базується на виділенні з усієї сукупності всіх можливих значень $m_{ik}(x,y)$ лише характеристичних значень $m_{44} = 0; \pm 1$, які визначають основні механізми формування поляризаційно-сингулярних L- і C-станів відповідних зображень полікристалітних мереж - рис. 2 – рис. 3.

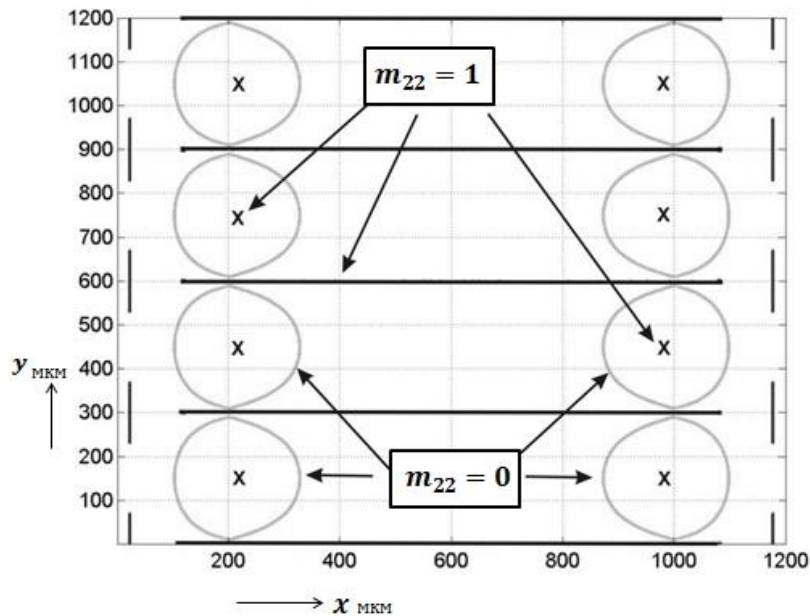


Рис. 2. Топографічна структура характеристичних значень мюллер-матричного зображення орієнтаційного елемента модельної полікристалітної мережі колоподібних циліндрів.

Проаналізуємо одержану структуру топографічних розподілів Мюллер-матричних зображень мережі колоподібних циліндрів з фізичного погляду:

1. Топографічна структура орієнтаційного матричного елемента m_{22}

Наявність складної топографічної побудови мюллер-матричного зображення можна пояснити одночасним впливом двох фізичних факторів. По-перше, – це координатна модуляція напрямів оптичної осі колоподібних циліндрів. По-друге, – координатна модуляція величин фазових зсувів між ортогональними компонентами амплітуди лазерної хвилі, що пройшла крізь двоприменезаломлюючі колоподібні циліндри.

Таблиця 1 Характеристичні значення m_{22}

m_{ik}		“L”-стани ($\gamma = 0; \gamma = \pi$)	“ $\pm C$ ”-стани $\varphi = \pm \frac{\pi}{2}$
			$\gamma = \pm \frac{\pi}{4}$
m_{22}	0	-	-
	1	$\varphi = 0$	-
	-1	$\varphi = \pi$	-

Положення L – станів $\varphi = 0, \varphi = \pi$ зображення мережі колоподібних двоприменезаломлюючих

циліндрів визначається характеристичними значеннями $m_{22} = \pm 1$ у відповідному координатному розподілі орієнтаційного мюллер-матричного зображення, а положення С-станів ($\varphi = \pm\pi$) визначається характеристичними значеннями $m_{22} = 0$, за умов орієнтації оптичної осі $\gamma = \pm\pi / 4$.

2. Топографічна структура фазового мюллер-матричного елемента m_{44}

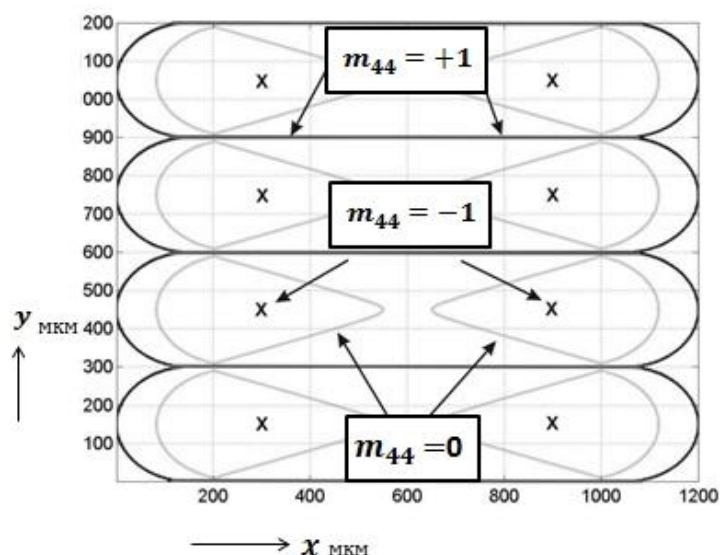


Рис. 3. Топографічна структура характеристичних значень мюллер-матричного зображення фазового елемента модельної полікристалітної мережі колоподібних циліндрів

З одержаних даних видно, що топографічна структура мюллер-матричного зображення даного типу індивідуальна.

Аналітично взаємозв'язок характеристичних значень фазового матричного елемента ($m_{44} = 0$; $m_{44} = \pm 1$) і умов формування L- і С-станів поляризації лазерного випромінювання ілюструє таблиця 2.

Таблиця 2 Характеристичні значення m_{44}

m_{ik}		L-стани ($\gamma = 0$; $\gamma = \pi$)	\pm С-стани $\varphi = \pm \frac{\pi}{2}$
m_{44}	0	-	$\gamma = 0 \div \pi$
	1	$\varphi = 0$	-
	-1	$\varphi = \pi$	-

Із наведених даних видно, що топографічний розподіл сукупності характеристичних значень мюллер-матричного зображення фазового елемента визначається винятково фазовими зсувами φ і не залежить від розподілу напрямків оптичної осі двопронезаломлюючих кристалітів.

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ПРИКЛАДИ ТОПОГРАФІЧНОЇ ПОБУДОВИ МЮЛЛЕР-МАТРИЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ РЕАЛЬНИХ МЕРЕЖ БІОЛОГІЧНИХ КРИСТАЛІТІВ

Конкретним прикладом тканини даного типу нами обрано дерму шкіри. Такий біологічний шар являє собою двокомпонентну аморфно-кристалічну морфологічну структуру. Аморфна компонента, до складу якої входять оптично неактивні жири, ліпіди, – не змінює стану поляризації лазерної хвилі, а лише ослаблює інтенсивність. Оптично-анізотропну компоненту формує мережа двопронезаломлюючих колагенових фібрил.

Якісно структуру реальної полікристалітної мережі колагенових фібрил ілюструє серія зображень гістологічних зрізів дерми шкіри пацюка двох типів: - здорова (рис. 4) онкологічно-змінена (меланома рис. 5).

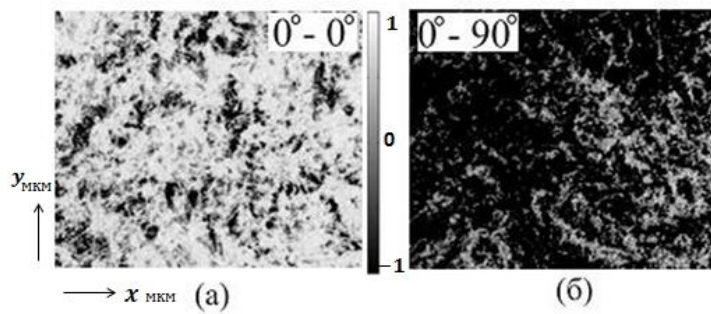


Рис. 4. Поляризаційно-відфільтровані зображення гістологічного зрізу здорової дерми шкіри у співвісних (а) та перехрещених (б) площинах пропускання поляризатора й аналізатора

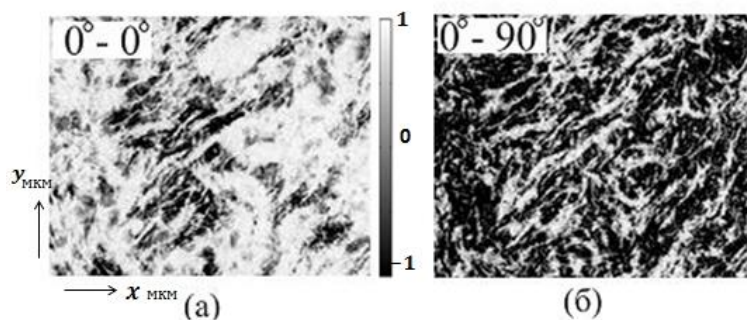


Рис. 5. Поляризаційно відфільтровані зображення гістологічного зрізу онкологічно зміненої дерми шкіри у співвісних (а) та перехрещених (б) площинах пропускання поляризатора й аналізатора

З аналізу одержаних даних видно :

Експериментальним зразкам обох типів (а) притаманна складна геометрична побудова, як за розмірами, так і за напрямками колагенових фібрил позаклітинної матриці. При цьому (рис 5, (а)) для зразку патологічно зміненої тканини спостерігається більш упорядкована за геометричними напрямками укладання колагенових фібрил полікристалітна мережа у площині гістологічного зрізу. Виявлена особливість морфологічної побудови двопрорезаломлюючої позаклітинної матриці може бути пов'язана зі сформованими у товщі дерми шкіри колагеновими паростками онкологічної пухлини. Наявність оптичної анізотропії позаклітинної матриці яскраво ілюструють зображення зразків обох типів, одержані у перехрещених площинах пропускання поляризатора і аналізатора (рис. 5,(б)). Як видно, мережа колагенових фібрил володіє значним рівнем оптичної анізотропії.

5. ТОПОГРАФІЧНА СТРУКТУРА ХАРАКТЕРИСТИЧНИХ ЗНАЧЕНЬ МЮЛЛЕР-МАТРИЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ КОЛАГЕНОВОЇ КРИСТАЛІТНОЇ МЕРЕЖІ

На рис. 6 – рис. 9 наведені приклади топографічної структури координатних розподілів характеристичних значень орієнтаційних і фазових елементів матриці Мюллера гістологічних зрізів тканини з розупорядкованою полікристалітною сіткою та розподілів четвертого параметра вектора Стокса.

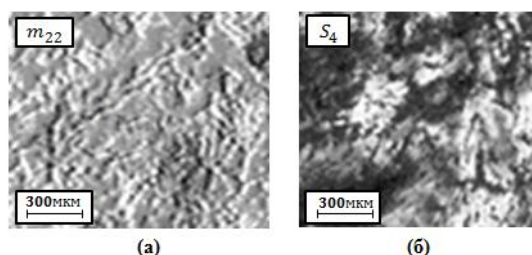


Рис. 6. “Орієнтаційне” мюллер-матричне зображення гістологічного зрізу здорової дерми шкіри (а) та відповідний координатний розподіл четвертого параметра вектора Стокса зображення експериментального зразка (б)

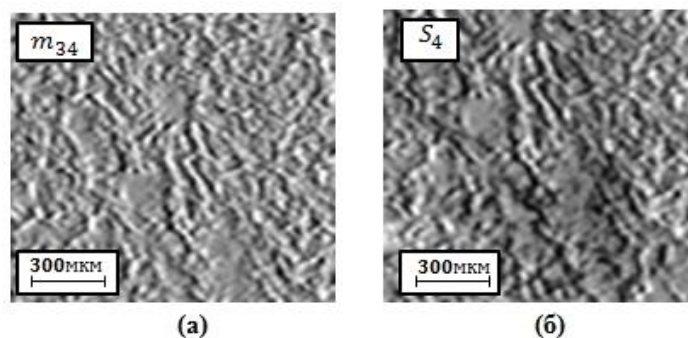


Рис. 7. “Орієнтаційне” мюллер-матричне зображення гістологічного зрізу здорової дерми шкіри (а) та відповідний координатний розподіл четвертого параметра вектора Стокса зображення експериментального зразка (б)

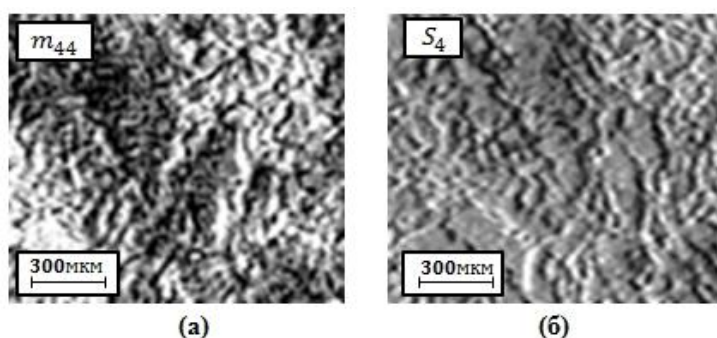


Рис. 8. “Фазове” мюллер-матричне зображення гістологічного зрізу здорової дерми шкіри (а) та відповідний координатний розподіл четвертого параметра вектора Стокса зображення експериментального зразка (б)

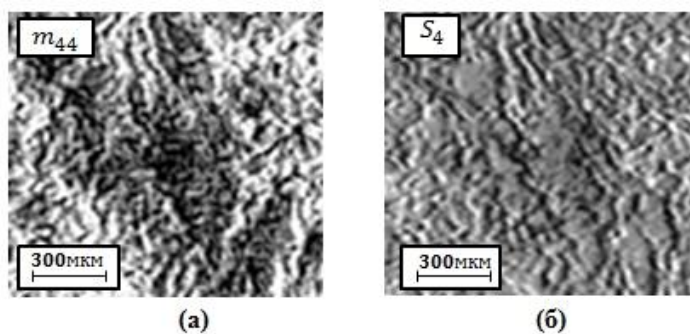


Рис. 9. “Фазове” мюллер-матричне зображення гістологічного зрізу здорової дерми шкіри (а) та відповідний координатний розподіл четвертого параметра вектора Стокса зображення експериментального зразка (б)

Порівняльний аналіз з одержаних даних виявив у всіх випадках наявність складної топографічної побудови орієнтаційних і фазових елементів матриці Мюллера, які характеризують прояви оптичної анізотропії двопронезаломлюючої колагенової мережі дерми шкіри. Така топографічна побудова виявляється у складній геометричній структурі ліній однакових значень елементів матриці Мюллера $m_{ik}(x,y) = \text{const}$ у експериментально виміряних Мюллер-матричних зображень гістологічних зрізів.

Одержані дані задовільно корелюють із результатами комп'ютерного моделювання топографічної побудови мюллер-матричних зображень віртуальної мережі колоподібних двопронезаломлюючих циліндрів. В обох випадках формуються складні замкнені контури однакових значень елементів матриці Мюллера. Головною різницею між теоретичними й експериментальними даними є більш складна геометрія топографічних контурів Мюллер-матричних зображень реальних полікристалічних колагенових мереж дерми шкіри. Виявлена закономірність пов'язана із більш

складною геометричною та фазовою побудовою таких мереж. Так, орієнтація оптичних осей колагенових волокон суттєво відрізняється від детермінованого закону розподілу. Проте зберігається неперервність орієнтаційної зміни напрямів оптичної осі від точки до точки парціальної колагенової фібрили. Окрім цього, ускладнюється і фазова модуляція за рахунок збільшення діапазону зміни поперечних геометричних розмірів колагенових фібрил.

Зміни фізіологічного стану дерми шкіри, з оптичного погляду, виявляються у зміні параметрів анізотропії двоприменезаломлюючої колагенової мережі. А саме: за рахунок формування напрямків зростання онкологічної пухлини впорядковується орієнтація оптичних осей колагенових фібрил з одночасним підвищенням їхнього двоприменезаломлення. За рахунок цього суттєво змінюється побудова відповідних топографічних контурів характеристичних значень орієнтаційних і фазових елементів матриці Мюллера гістологічних зрізів дерми шкіри пацієнта з онкологічними змінами.

ВИСНОВКИ

1. Виявлено основні механізми формування мюллер-матричних зображень мережі криволінійних двоприменезаломлюючих кристалітів і визначено основні сценарії формування топографічної структури контурів характеристичних значень координатних розподілів матричних елементів.
2. Установлено взаємозв'язки між топографічною побудовою мюллер-матричних зображень і сітками характеристичних станів у стокс-параметричному зображенні полікристалітної мережі.
3. Експериментально визначено наявність топографічних контурів у мюллер-матричних зображеннях усіх типів елементів, які характеризують поляризаційні властивості двоприменезаломлюючої колагенової фібрилярної мережі гістологічного зрізу дерми шкіри.
4. Установлена кореляція між топографічною побудовою мюллер-матричних зображень модельних полікристалітних мереж і координатними розподілами характеристичних значень елементів матриці Мюллера реальних двоприменезаломлюючих мереж протеїнових фібрил гістологічних зрізів біологічних тканин різної морфологічної побудови та фізіологічного стану.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. X. Wang, L. - H. Wang, (2002). Propagation of polarized light in birefringent turbid media: a Monte Carlo study. *J. Biomed. Opt.*, 7, 279-290.
2. Тучин В. В. (1998) Лазеры и волоконная техника в биомедицинских исследованиях. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та.
3. O. V. Angelsky, A. G. Ushenko, D. N. Burcovets, Yu. A. Ushenko, (2005). Polarization visualization and selection of biotissue image two-layer scattering medium. *J. Biomed. Opt.*, 10, 1.
4. J. F. Nye, M. Berry, (1974). Dislocations in wave trains. *Proc. R. Soc. Lond.*, A 336, 165-190.
5. M. V. Berry, J. H. Hannay (1977) Umbilic points on Gaussian random surfaces. *J. Phys. A: Math. Gen.*, 10, 1809-1821.
6. M. Soskin, V. Denisenko, R. Egorov, (2004). Topological networks of paraxial ellipse speckle-fields. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 6, S281-S287.
7. F. Gori, M. Santarsiero, S. Vicalvi, R. Borghi, G. Guattari, (1998). Beam coherence-polarization matrix. *Pure Appl. Opt.*, 7, 941-951.
8. J. Tervo, T. Setälä, A. Friberg, (2003). Degree of coherence for electromagnetic fields. *Opt. Express*, 11, 1137-1143.
9. J. Ellis and A. Dogariu, (2004). Complex degree of mutual polarization. *Opt. Lett.*, 29, 536-538.
10. Yu. A. Ushenko, Yu. Ya. Tomka and A. V. Dubolazov, (2011). Complex degree of mutual anisotropy of extracellular matrix of biological tissues. *Optics and Spectroscopy*, 110, 5, 814-819.

Надійшла до редакції 12.11.2018р.

ОЛЬГА ЮРІЙВНА НОВАКОВСЬКА - к. ф.-м. н., асистент кафедри оптики і видавничо-поліграфічної справи, Чернівецький національний університет, Чернівці, Україна.

ОЛЕКСАНДР ВОЛОДИМИРОВИЧ ДУБОЛАЗОВ - к. ф.-м. н., доцент кафедри оптики і видавничо-поліграфічної справи, Чернівецький національний університет, Чернівці, Україна.

ОЛЕКСАНДР ВАЛЕРІУВИЧ ОЛАР - аспірант кафедри оптики і видавничо-поліграфічної справи, Чернівецький національний університет, Чернівці, Україна.

ЮРІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ УШЕНКО - д. ф.-м. н., професор кафедри комп'ютерних наук, Чернівецький національний університет, Чернівці, Україна.

ЛЕОНІД ЙОСИПОВИЧ ПІДКАМІНЬ - к. ф.-м. н., доцент кафедри оптики і видавничо-поліграфічної справи, Чернівецький національний університет, Чернівці, Україна.

ЮРІЙ ЯРОСЛАВОВИЧ ТОМКА - к. ф.-м. н., доцент кафедри комп'ютерних наук, Чернівецький національний університет, Чернівці, Україна.