

ПРИЛАДОБУДУВАННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

DOI: 10.20535/kpi-sn.2019.5-6.178323

УДК 681.758

Колобродов М.С.*

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

*corresponding author: kolobrodov_n@ukr.net

ОПТИЧНИЙ МЕТОД КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПРОЗОРИХ ТКАНИН

Проблематика. Основним елементом оптичних систем обробки інформації є когерентний оптичний спектроаналізатор (КОС). У текстильній промисловості при виготовленні й використанні тонких прозорих тканин (марлі, бинтів тощо) виникає проблема контролю форми і геометричних розмірів прозорих комірок. Для цього застосовують мікроскопи, за допомогою яких вимірюються геометричні параметри багатьох прозорих комірок. Такий процес є трудомістким, потребує значних затрат часу на вимірювання. Використання КОС дає змогу безпосередньо вимірювати середні значення розмірів комірок.

Мета дослідження. Розробка оптичної моделі прозорої тканини, на основі якої запропоновано лазерний метод та експериментальний стенд для вимірювання середніх геометричних розмірів прозорих комірок тканини.

Методика реалізації. Запропонований метод контролю якості прозорих тканин ґрунтується на використанні КОС. Якщо в передній фокальній площині Фур'є-об'єктива розмістити прозору тканину, то в задній фокальній площині формуються дифракційні максимуми, положення яких залежить від розмірів прозорих комірок тканини.

Результати дослідження. Запропоновано геометричну модель структури прозорої тканини, яка описує амплітудний коефіцієнт пропускання тканини залежно від періоду і розмірів прозорих комірок тканини. Отримано аналітичну формулу для розрахунку просторового спектра коефіцієнта пропускання такої моделі. Розроблено лабораторний стенд КОС, який дає можливість вимірювати геометричні розміри прозорих комірок тканини.

Висновки. Дослідження моделі пропускання прозорої тканини показали, що структуру тканини можна розглядати як двовимірну дифракційну ґратку, період якої визначається товщиною нитки та прозорою частиною комірки тканини. Для вимірювання середніх розмірів комірок прозорої тканини запропоновано використовувати КОС, який дає можливість безпосередньо вимірювати просторові частоти дифракційних максимумів і розраховувати середні значення розмірів комірок тканини. Для підтвердження достовірності запропонованого методу розроблено експериментальний стенд цифрового КОС.

Ключові слова: модель пропускання прозорої тканини; когерентний оптичний спектроаналізатор; просторовий спектр.

Вступ

Когерентні оптичні системи для спектрального аналізу просторових сигналів давно вже відомі в класичній оптиці, а широке їх застосування стало можливим у зв'язку з бурхливим розвитком лазерної техніки, матричних модуляторів світла і приймачів випромінювання [1–9]. Основним елементом оптичних систем обробки інформації є когерентний оптичний спектроаналізатор (КОС). Теоретичні основи роботи спектроаналізаторів базуються на скалярній теорії дифракції Френеля, яка наближено описує поширення світла в параксіальній області [1, 2, 4]. Низка монографій і статей розглядають фізичні основи роботи когерентних (лазерних) спектроаналізаторів [2, 8, 10]. У той же час практично відсутня науково-технічна література, що присвячена практичним методам застосування таких спектроаналізаторів [11–13].

У текстильній промисловості при виготовленні та застосуванні тонких прозорих тканин (марлі, бинтів, штор, фільтрів-сепараторів тощо) завжди виникає проблема контролю форми і геометричних розмірів прозорих комірок. Для цього застосовують мікроскопи, за допомогою яких вимірюються геометричні параметри багатьох прозорих комірок із подальшою статистичною обробкою для розрахунку середніх значень. Такий процес трудомісткий, потребує значних затрат часу на вимірювання і не може застосовуватись у системах автоматичного курування процесом виготовлення тканини. Використання оптичних методів дає можливість безпосередньо вимірювати середні значення розмірів комірок на певній площі тканини. Таким чином, розробка оптичного методу вимірювання геометричних розмірів прозорих комірок тканин є актуальною науково-практичною задачею.

Постановка задачі

Стаття присвячена розробці оптичної моделі прозорої тканини, на основі якої запропоновано лазерний метод та експериментальний стенд для вимірювання середніх геометричних розмірів прозорих комірок тканини.

Фізичні основи роботи когерентного спектроаналізатора

Запропонований метод контролю якості прозорих тканин ґрунтується на використанні КОС [1, 8]. Узагальнена схема КОС складається з послідовно розміщених елементів: джерела когерентного випромінювання (лазера), освітлювальної оптичної системи, просторово-часового модулятора світла (ПЧМС), Фур'є-об'єктива та матричного приймача випромінювання (МПВ) (рис. 1).

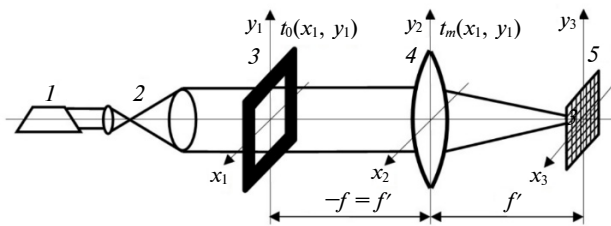


Рис. 1. Схема когерентного оптичного спектроаналізатора: 1 – лазер; 2 – оптична система, що формує паралельний пучок променів; 3 – просторово-часовий модулятор світла; 4 – Фур'є-об'єктив; 5 – матричний приймач випромінювання

Плоска когерентна світлова хвиля від лазера освітлює ПЧМС, де відбувається дифракція світла. Якщо ПЧМС, що має амплітудний коефіцієнт пропускання $t_m(x_1, y_1)$, який відповідає досліджуваному оптичному сигналу (зображенню), розміщений у передній фокальній площині $x_1 y_1$ Фур'є-об'єктива, то розподіл амплітуди поля в його задній фокальній площині $x_3 y_3$, де розміщений МПВ, описується виразом [1, 3]

$$V(x_3, y_3) = \frac{V_p}{j\lambda f} \iint_{-\infty}^{\infty} t_m(x_1, y_1) \exp\left[-\frac{2\pi}{\lambda f}(x_3 x_1 + y_3 y_1)\right] dx_1 dy_1, \quad (1)$$

де f – фокусна відстань об'єктива; V_p – амплітуда світлової хвилі, яка нормально падає на модулятор.

Аналіз виразу (1) показує, що комплексна амплітуда світлового поля в задній фокальній

площині Фур'є-об'єктива з точністю до постійного множника $V_p / j\lambda f$ є просторовим спектром $\tilde{t}_m(v_x, v_y)$ від амплітудного коефіцієнта пропускання модулятора $t_m(x_1, y_1)$ з просторовими частотами

$$v_x = \frac{x_3}{\lambda f}, \quad v_y = \frac{y_3}{\lambda f}. \quad (2)$$

Далі МПВ перетворює розподіл освітленості (інтенсивності) $E(x_3, y_3)$ на електричний сигнал, який може оброблятися за допомогою мікропроцесора з метою визначення параметрів спектра вхідного сигналу.

Геометрична модель прозорої тканини

Розмістимо прозору тканину, яка має амплітудний коефіцієнт пропускання $t_m(x_1, y_1)$, у передній фокальній площині Фур'є-об'єктива. Розглянемо фізико-математичну модель такого модулятора світла, геометрична модель якого зображена на рис. 2. Модулятор має матричну структуру розміром $X_m \times Y_m$ і періодом $V_m \times W_m$. Кожен піксель має прозору частину розміром $v_m \times w_m$. Амплітудний коефіцієнт пропускання такого модулятора визначається функцією [13, 14]

$$t_m(x_1, y_1) = \left\{ \left[\text{rect}\left(\frac{x_1 - x_{1m0}}{v_m}\right) \times \frac{1}{v_m} \text{comb}\left(\frac{x_1 - x_{1m0}}{v_m}\right) \right] \left[\text{rect}\left(\frac{x_1 - x_{1m0}}{X_m}\right) \right] \right\} \times \left\{ \left[\text{rect}\left(\frac{y_1 - y_{1m0}}{w_m}\right) \times \frac{1}{w_m} \text{comb}\left(\frac{y_1 - y_{1m0}}{w_m}\right) \right] \times \left[\text{rect}\left(\frac{y_1 - y_{1m0}}{Y_m}\right) \right] \right\} = t_{mx}(x_1) t_{my}(y_1), \quad (3)$$

де x_{1m0}, y_{1m0} – координати центра нульового (центрального) пікселя відносно початку системи координат $x_1 y_1$, які визначають зміщення центра матриці модулятора відносно оптичної вісі КОС;

$\text{rect}(z)$ – rect -функція:

$$\text{rect}(z) = \begin{cases} 1, & \text{при } |z| \leq 1/2, \\ 0, & \text{при } |z| > 1/2. \end{cases}$$

$\text{comb}(z)$ – comb -функція:

$$\text{comb}(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(z - n).$$

У формулі (3) вирази в квадратних дужках визначають періодичну структуру матриці розміром $X_m \times Y_m$.

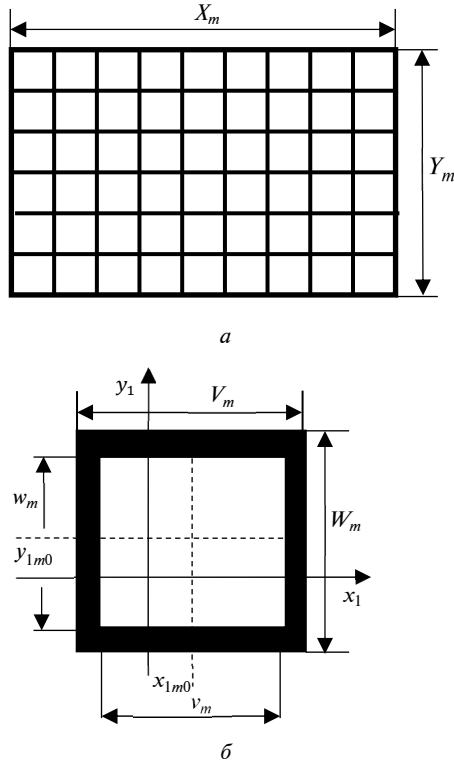


Рис. 2. Геометрична модель прозорої тканини: а – матриця; б – центральний піксель

Знайдемо просторовий спектр амплітудного коефіцієнта пропускання тканини (3) за умови, що $x_{1m0} = y_{1m0} = 0$:

$$\begin{aligned} \tilde{t}_m(v_x, v_y) &= F\{t_m(x_1, y_1)\} = \\ &= F\left\{\left[\text{rect}\left(\frac{x_1}{v_m}\right) \times \frac{1}{v_m} \text{comb}\left(\frac{x_1}{v_m}\right)\right] \left[\text{rect}\left(\frac{x_1}{X_m}\right)\right]\right\} \times \\ &\times F\left\{\left[\text{rect}\left(\frac{y_1}{w_m}\right) \times \frac{1}{w_m} \text{comb}\left(\frac{y_1}{w_m}\right)\right] \left[\text{rect}\left(\frac{y_1}{Y_m}\right)\right]\right\} = \\ &= \tilde{t}_{mx}(v_x) \tilde{t}_{my}(v_y), \end{aligned} \quad (4)$$

де $\tilde{t}_{mx}(v_x)$ і $\tilde{t}_{my}(v_y)$ – одновимірні просторові спектри пропускання тканини уздовж відповідних осей.

Просторовий спектр $\tilde{t}_{mx}(v_x)$ можна розглядати як розподіл амплітуди світлового поля,

який формує дифракційна ґратка з періодом V_m і розміром X_m , що має амплітудний коефіцієнт пропускання [13, 15]

$$t_m(x_1) = \left[\text{rect}\left(\frac{x_1}{v_m}\right) \times \frac{1}{v_m} \text{comb}\left(\frac{x_1}{v_m}\right) \right] \left[\text{rect}\left(\frac{x_1}{X_m}\right) \right]. \quad (5)$$

Підставимо функцію (5) у перетворення Фур'є (4):

$$\begin{aligned} \tilde{t}_{mx}(v_x) &= F\left\{\left[\text{rect}\left(\frac{x_1}{v_m}\right) \times \frac{1}{v_m} \text{comb}\left(\frac{x_1}{v_m}\right)\right] \times \right. \\ &\times \left. \left[\text{rect}\left(\frac{x_1}{X_m}\right)\right]\right\} = F\left\{\left[\text{rect}\left(\frac{x_1}{v_m}\right) \times \right. \right. \\ &\times \left. \left. \frac{1}{v_m} \text{comb}\left(\frac{x_1}{v_m}\right)\right] \times F\left\{\left[\text{rect}\left(\frac{x_1}{X_m}\right)\right]\right\}\right\} = \\ &= \left[F\left\{\text{rect}\left(\frac{x_1}{v_m}\right)\right\} F\left\{\frac{1}{v_m} \text{comb}\left(\frac{x_1}{v_m}\right)\right\}\right] \times \\ &\times F\left\{\text{rect}\left(\frac{x_1}{X_m}\right)\right\}. \end{aligned} \quad (6)$$

У формулі (6) перетворення Фур'є мають вигляд [16]:

$$F\left\{\text{rect}\left(\frac{x_1}{v_m}\right)\right\} = v_m \text{sinc}(v_m v_x); \quad (7)$$

$$\begin{aligned} F\left\{\frac{1}{v_m} \text{comb}\left(\frac{x_1}{v_m}\right)\right\} &= \text{comb}(V_m v_x) = \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(V_m v_x - n) = \frac{1}{V_m} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta\left(v_x - \frac{n}{V_m}\right); \end{aligned} \quad (8)$$

$$F\left\{\text{rect}\left(\frac{x_1}{X_m}\right)\right\} = X_m \text{sinc}(X_m v_x), \quad (9)$$

де $\text{sinc}(z)$ – sinc-функція: $\text{sinc}(z) = \frac{\sin(\pi z)}{\pi z}$.

Після підстановки (7)–(9) у (6) отримаємо

$$\begin{aligned} \tilde{t}_{mx}(v_x) &= \left[v_m \text{sinc}(v_m v_x) \frac{1}{V_m} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta\left(v_x - \frac{n}{V_m}\right) \right] \times \\ &\times [X_m \text{sinc}(X_m v_x)] = \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \tilde{t}_{mx,n}\left(v_x - \frac{n}{V_m}\right). \end{aligned} \quad (10)$$

Розподіл амплітуди поля в задній фокальній площині Фур'є-об'єктива

Подамо інтеграл (1) з урахуванням (2) і (10) у вигляді

$$\begin{aligned} V(x_3, y_3) &= \frac{V_p}{j\lambda f} F\{t_m(x_1, y_1)\} = \frac{V_p}{j\lambda f} \tilde{t}_{mx}(v_x) \tilde{t}_{my}(v_y) = \\ &= \frac{V_p}{j\lambda f} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \tilde{t}_{mx,n} \left(\frac{x_3}{\lambda f} - \frac{n}{V_m} \right) \sum_{k=-\infty}^{\infty} \tilde{t}_{my,n} \left(\frac{y_3}{\lambda f} - \frac{k}{W_m} \right) = \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} V_{x,n}(x_3) \sum_{k=-\infty}^{\infty} V_{y,k}(y_3). \end{aligned} \quad (11)$$

Для спрощення математичних перетворень будемо розглядати розподіл амплітуди поля уздовж осі x_3 , який являє собою нескінченну кількість дифракційних максимумів, що мають амплітуди

$$\begin{aligned} V_{x,n}(x_3) &= \frac{V_p}{j\lambda f} \tilde{t}_{mx,n} \left(\frac{x_3}{\lambda f} - \frac{n}{V_m} \right) = \\ &= \left[\frac{V_p}{j\lambda f} \frac{v_m}{V_m} \operatorname{sinc} \left(\frac{x_3}{\lambda f} V_m \right) \delta \left(\frac{x_3}{\lambda f} - \frac{n}{V_m} \right) \right] \times \\ &\quad \times \left[X_m \operatorname{sinc} \left(X_m \frac{x_3}{\lambda f} \right) \right] = \\ &= \frac{V_p}{j} \frac{v_m}{V_m} \left[\operatorname{sinc} \left(\frac{x_3}{\lambda f} V_m \right) \delta \left(x_3 - \frac{\lambda f n}{V_m} \right) \right] \times \\ &\quad \times \left[X_m \operatorname{sinc} \left(X_m \frac{x_3}{\lambda f} \right) \right]. \end{aligned} \quad (12)$$

Аналіз функцій (11) і (12) показує, що

1) центр n -го дифракційного максимуму визначається періодом матричної структури V_m , фокусною відстанню Фур'є-об'єктива f , довжиною хвилі λ випромінювання лазера і має координати $x_{3,n} = \frac{\lambda f n}{V_m}$, $y_3 = 0$;

2) амплітуда n -го максимуму $V_{x,n}(x_3)$ модулюється функцією $\frac{v_m}{V_m} \operatorname{sinc} \left(\frac{x_3}{\lambda f} V_m \right)$;

3) ширина дифракційного максимуму визначається розмірами вхідної апертури спектроаналізатора (модулятора) X_m і дорівнює

$$\Delta x_3 = \frac{2\lambda f}{X_m}.$$

Таким чином, вимірюючи координати дифракційних максимумів $x_{3,n} = \frac{\lambda f n}{V_m}$, $y_3 = 0$, можна розрахувати розмір комірки V_m уздовж осі x_3 . Аналогічні вимірювання можна виконати уздовж осі y_3 і розрахувати розмір комірки W_m .

Модель деформованої тканини

При виготовленні тканини або її експлуатації за рахунок різного розтягування в напрямках осей x_1 і y_1 форма прозорої комірки змінюється. На рис. 3 зображена можлива модель деформації прозорих комірок тканини. Розглянемо математичну модель геометричної форми такої тканини. Періодична структура буде спостерігатись уздовж осей x'_1 і y'_1 . У такої моделі прозорості тканини вісь x'_1 утворює кут θ з віссю x_1 , осі y'_1 і y_1 збігаються. Тому просторовий спектр такої деформованої картини аналогічно (11) має максимуми уздовж осей x'_3 і y'_3 , координати центрів яких визначаються рівняннями

$$x'_{3,n} = \frac{\lambda f n}{V_m}, y'_{3,n} = 0 \text{ і } x'_{3,k} = 0, y'_{3,k} = \frac{\lambda f k}{W_m}. \quad (13)$$

У системі координат $x_3 y_3$ центри дифракційних максимумів визначаються рівняннями

$$\begin{aligned} x_{3,n} &= \frac{\lambda f n}{V_m} \sin(\theta), y_{3,n} = \frac{\lambda f n}{V_m} \cos(\theta) \\ \text{і } x_{3,k} &= 0, y_{3,k} = \frac{\lambda f k}{W_m}. \end{aligned} \quad (14)$$

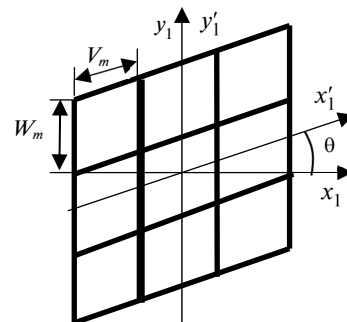


Рис. 3. Геометрична модель деформованої тканини

Стенд для вимірювання геометричних параметрів тканини

Для проведення таких досліджень було розроблено і створено лабораторний макет КОС, схема якого зображена на рис. 4. Принцип роботи макета такий. Когерентне випромінювання від лазера 1 проходить через ослаблювач випромінювання 3, розширювач лазерного пучка 4 і освітлює вхідний транспарант 5. Транспарант, який має амплітудний коефіцієнт пропускання у вигляді прозорої тканини, розміщений у передній фокальній площині Фур'є-об'єктива 6. Об'єктив, що має фокусну відстань $f = 135$ мм, формує розподіл амплітуди світлового поля в задній фокальній площині, яка відповідає просторовому спектру коефіцієнта пропускання тканини (5). Розподіл цього світлового поля утворює на молочній пластинці 7 дифракційну картину, інтенсивність якої реєструється USB-мікроскопом 9 і відображається на екрані комп'ютера 10.

Як когерентне джерело випромінювання використовувався напівпровідниковий лазер фірми "Transverse Industries" (Taiwan), який має такі параметри: довжина хвилі випромінювання $\lambda = 0,532$ мкм; потужність випромінювання $\Phi = 5$ мВт; кут розбіжності лазерного пучка $\theta_l = 2$ мрад. Ослаблювачем інтенсивності лазерного пучка слугує світлофільтр із коефіцієнтом пропускання τ_f . Для збільшення діаметра лазерного пучка, що необхідно для освітлення всієї апертури вхідного транспаранта, використовується стандартний розширювач лазерного пучка, який входить до складу голографічної установки. Розширювач забезпечує збільшення діаметра лазерного пучка в 5 разів, тобто транспарант освітлюється лазерним пучком діаметром 10,2 мм.

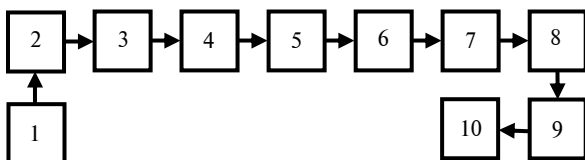


Рис. 4. Схема лабораторного макета когерентного оптичного спектроаналізатора: 1 – лазер; 2 – блок живлення лазера; 3 – ослаблювач лазерного пучка; 4 – розширювач лазерного пучка; 5 – вхідний транспарант (прозора тканина); 6 – Фур'є-об'єктив; 7 – молочна пластинка; 8 – світлофільтр; 9 – USB-мікроскоп; 10 – комп'ютер

Аналіз результатів вимірювань

На початку вимірювань було проведено тестування стенда через вимірювання розподілу інтенсивності світла в дифракційній картині, яка сформована тест-об'єктом у вигляді щілини. На рис. 5 наведені зображення дифракційних картин щілини шириною $a = 30$ мкм і $a = 38$ мкм, отриманих із використанням напівпровідникового лазера.

За допомогою розробленої комп'ютерної програми вимірювався розподіл сигналу уздовж осі x_3 для дифракційних картин, що наведені на рис. 5. На рис. 6 показано нормований розподіл цього сигналу. З використанням цих розподілів інтенсивності світла в дифракційній картині були виміряні відстані між першими нульовими мінімумами:

- для ширини щілини $a = 30$ мкм:
 $\Delta x_{3,\pm 1,\min} = x_{3,\min,+1} - x_{3,\min,-1} = 5,2$ мм;
- для ширини щілини $a = 38$ мкм:
 $\Delta x_{3,\pm 2,\min} = x_{3,\min,+2} - x_{3,\min,-2} = 4,0$ мм.

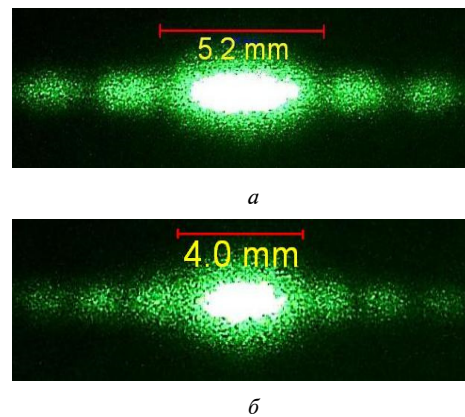


Рис. 5. Дифракційні картини щілини шириною 30 мкм (а) і 38 мкм (б), отримані з використанням напівпровідникового лазера ($\lambda = 0,532$ мкм)

Для підвищення точності вимірювання розподілу інтенсивності в інтенсивному нульовому максимумі в експериментальній установці використовувався світлофільтр із коефіцієнтом пропускання $\tau_f = 0,2$ на довжині хвилі, яку випромінює лазер. Це дало змогу лінійно перетворити інтенсивність світла на електричний сигнал на виході матричного приймача випромінювання USB-мікроскопа, а значить, і підвищити достовірність вимірювань.

Теоретично положення мінімумів (рис. 7) можна розрахувати, використовуючи рівняння [3]

$$I_n(x_3) = \frac{I_n(x_3)}{I_n(0)} = \left[\frac{\sin\left(\frac{\pi a}{\lambda f} x_3\right)}{\frac{\pi a}{\lambda f} x_3} \right]^2, \quad (15)$$

$$I_n(x_{3,\min,m}) = 0 \Rightarrow \sin\left(\frac{\pi a}{\lambda f} x_{3,\min,m}\right) = 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{\pi a}{\lambda f} x_{3,\min,m} = \pi m \Rightarrow x_{3,\min,m} = \frac{\lambda f}{a} m. \quad (16)$$

Згідно з формулою (16) для довжини хвилі випромінювання лазера $\lambda = 0,532$ мкм, фокусної відстані Фур'є-об'єктива $f = 135$ мм було розраховано положення перших бокових мінімумів:

- для ширини щілини $a = 30$ мкм:
 $\Delta x_{3,\pm 1,\min} = x_{3,\min,+1} - x_{3,\min,-1} = 4,8$ мм;
- для ширини щілини $a = 38$ мкм:
 $\Delta x_{3,\pm 1,\min} = x_{3,\min,+1} - x_{3,\min,-1} = 3,8$ мм.

Відносна похибка різниці між теоретичним і експериментальним розподілами інтенсивності в межах перших бокових мінімумів становила 8 і 5% відповідно, що свідчить про достовірність теоретичної моделі КОС.

На рис. 8, *a* наведено зображення прозорої структури тканини, комірки якої мають розміри $d_x = 24,5$ мкм і $d_y = 27,5$ мкм, а на рис. 8, *б* і *в* – двовимірний просторовий спектр цієї структури. При вимірюванні періодів структури був використаний USB-мікроскоп.

На рис. 9, *a* наведено зображення прозорої деформованої структури тканини, комірки якої мають форму паралелограма. При цьому зберігається періодичність із такими ж періодами $d_x = 24,5$ мкм, $d_y = 27,5$ мкм уздовж осей x'_1 і y'_1 , які утворюють певний кут θ . Просторовий спектр пропускання такої тканини показаний на рис. 9, *б* і *в*.

Періодичну структуру пропускання тканини будемо розглядати як двовимірну дифракційну ґратку з періодами d_x і d_y . Для визначення цих періодів використаємо основне рівняння одновимірної дифракційної ґратки, яке для перших дифракційних максимумів має вигляд [3, 15]

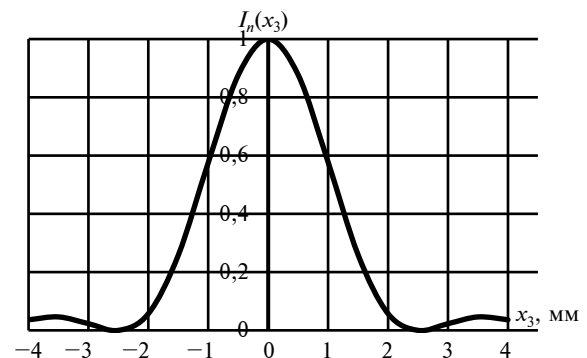


Рис. 6. Нормована амплітуда сигналу в зображенні дифракційної картини від щілини шириною $a = 30$ мкм (див. рис. 5, *a*)

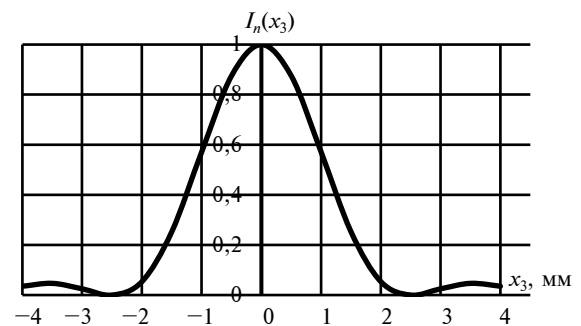
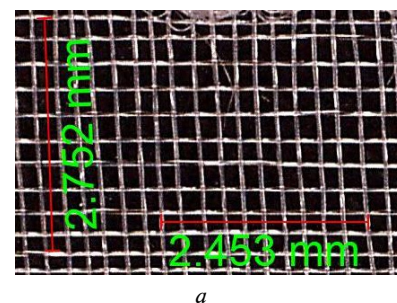
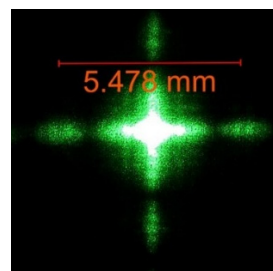


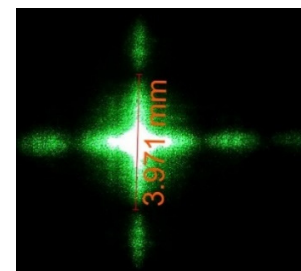
Рис. 7. Теоретично розрахована нормована інтенсивність світла в зображенні дифракційної картини від щілини шириною $a = 30$ мкм



a



б



в

Рис. 8. Зображення (*a*) і просторові спектри (*б*, *в*) пропускання прозорої тканини, комірки якої мають форму прямокутника

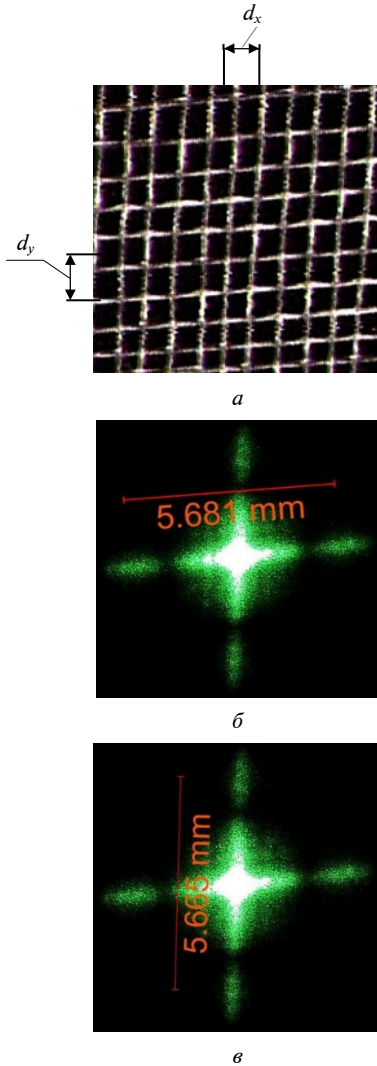


Рис. 9. Зображення (а) і просторові спектри (б, в) пропускання прозорої тканини, деформовані комірки якої мають форму паралелограма

$$d_x \sin(\varphi_{d,\max,\pm 1}) = \pm \lambda, \quad (17)$$

де $\varphi_{d,\max,\pm 1}$ – кут дифракції, який відповідає положенням перших бокових максимумів (див. рис. 8, б).

Для параксіальної області справедливе співвідношення

$$\varphi_{d,\max,\pm 1} \approx \text{tg}(\varphi_{d,\max,\pm 1}) = \frac{x_{3,\max,1}}{f} = \frac{\Delta x_{3,\pm 1,\max}}{2f}, \quad (18)$$

де f – фокусна відстань Фур'є-об'єктива;
 $\Delta x_{3,\pm 1,\max}$ – відстань між першими боковими максимумами: $\Delta x_{3,\pm 1,\max} = x_{3,\max,+1} - x_{3,\max,-1}$.

Із рівняння дифракційної ґратки (17) знаходимо період ґратки:

$$d_x = \frac{\lambda}{\sin(\varphi_{d,\max,1})} = \frac{2\lambda f}{\Delta x_{3,\pm 1,\max}}. \quad (19)$$

Аналогічно, період двовимірної структури уздовж осі y описується функцією

$$d_y = \frac{\lambda}{\sin(\varphi_{d,\max,1})} = \frac{2\lambda f}{\Delta y_{3,\pm 1,\max}}. \quad (20)$$

Метод вимірювання цих періодів такий:

1. Із рис. 9, б і в знаходимо відстань між першими боковими максимумами уздовж осей x і y :

$$\Delta x_{3,\pm 1,\max} = x_{3,\max,+1} - x_{3,\max,-1} = 5,68 \text{ мм};$$

$$\Delta y_{3,\pm 1,\max} = y_{3,\max,+1} - y_{3,\max,-1} = 5,66 \text{ мм}.$$

2. Із формул (19) і (20) визначаємо періоди уздовж відповідних осей:

$$d_x = \frac{2\lambda f}{\Delta x_{3,\pm 1,\max}} = \frac{2 \cdot 0,532 \cdot 135}{5,68} = 25,3 \text{ мкм};$$

$$d_y = \frac{2\lambda f}{\Delta y_{3,\pm 1,\max}} = 26,4 \text{ мкм}.$$

Зробимо низку важливих зауважень.

1. Запропонований метод дає змогу вимірювати середні значення розміру комірки прозорої тканини в межах площі лазерного пучка на поверхні тканини. Це обумовлено тим, що дифракційні максимуми формуються в результаті інтерференції хвиль, які утворилися після дифракції світла на кожній комірці.

2. Дисперсія розміру комірки визначається шириною дифракційного максимуму, що було обґрунтовано в монографіях [2, 3].

3. Використання перших дифракційних максимумів пояснюється тим, що:

3.1. Ці максимуми мають найбільшу амплітуду (за винятком нульового максимуму).

3.2. Підвищується точність вимірювання положення дифракційних максимумів відносно центра дифракційної картини, оскільки виміряти положення нульового максимуму складно з огляду на його велику ширину.

Висновки

Розроблена фізико-математична модель пропускання прозорої тканини з метою визначення середніх значень розмірів прозорих комірок тканини. Дослідження такої моделі показали:

1. Структуру тканини можна розглядати як двовимірну дифракційну ґратку, період якої визначається товщиною нитки і прозорою частиною комірки тканини.

2. Просторовий спектр такої ґратки є нескінченною кількістю дифракційних максимумів, розмішених уздовж декартових осей x і y , положення яких визначається середніми розмірами комірки тканини.

3. Для вимірювання середніх розмірів комірок прозорої тканини запропоновано використовувати когерентний оптичний спектроаналізатор, який дає можливість безпосередньо вимірювати просторові частоти дифракційних максимумів і розраховувати середні значення розмірів комірок тканини.

4. Розроблено модель пропускання прозорої тканини, у якій в результаті порушення технологічного процесу виготовлення або експлуа-

тації виникають деформації форми комірок. Дослідження такої моделі показали, що просторовий спектр пропускання тканини змінюється залежно від форми деформації. Наприклад, якщо комірка має форму паралелограма, то осі, уздовж яких розміщені дифракційні максимуми, утворюють кут, відмінний від 90° .

5. Для підтвердження достовірності запропонованого методу розроблено експериментальний стенд когерентного цифрового спектроаналізатора, який дав можливість провести вимірювання середніх розмірів і деформацію прозорих комірок тканини (штори).

У подальшому доцільно розробити математичну модель прозорої тканини з різними формами деформації комірок та дослідити просторовий спектр.

References

- [1] J.W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, 3rd ed. New York: Roberts & Company, 2005.
- [2] K.E. Okan, *Diffraction, Fourier Optics and Imaging*. New Jersey: Wiley & Sons, 2007.
- [3] V.G. Kolobrodov and G.S. Tymchyk, *Applied Diffractive Optics*. Kyiv, Ukraine: Politekhnik, 2014.
- [4] S. Yuniang, "Diffractive optics", *Optical Eng.*, vol. 43, no. 11, pp. 2503–2504, 2004.
- [5] V.G. Kolobrodov *et al.*, "Physical and mathematical model of the digital coherent optical spectrum analyzer", *Optica Applicata*, vol. 47, no. 2, pp. 273–282, 2017.
- [6] V.V. Bogatyireva and A.L. Dmitriev, *Optical Methods of Information Processing*. St. Petersburg, Russia: ITMO University, 2009.
- [7] D.G. Makarov *et al.*, "Light transmission through the band gap bigyrotropic structure", *Physica Status Solidi (A) Applied Research*, vol. 201, no. 1, pp. 130–138, 2004. doi: 10.1002/pssa.200306710
- [8] V.G. Kolobrodov *et al.*, *Coherent Optical Spectrum Analyzer*. Kyiv, Ukraine: Politekhnik, 2015.
- [9] M.S. Kuzmin and S.A. Rogov, "A folded-spectrum analyzer with a liquid-crystal input device", *Tech. Phys. Lett.*, vol. 40, no. 8, pp. 629–631, 2014. doi: 10.1134/s1063785014080082
- [10] V.G. Kolobrodov and G.S. Tymchyk, "Analysis of optical schemes of coherent spectrum analyzers", *Optical-Mechanical Industry*, no. 10, pp. 4–7, 1982.
- [11] V.G. Kolobrodov and G.S. Tymchyk, "The ability to research microdefects of reflective surfaces and transparent films using a coherent spectrum analyzer", *Optical-Mechanical Industry*, no. 11, pp. 11–13, 1982.
- [12] M.S. Kuzmin and S.A. Rogov, "Optical Fourier processor with a liquid-crystal information-input device", *J. Optical Technol.*, vol. 83, no. 3, pp. 147–152, 2015. doi: 10.1364/jot.82.000147
- [13] R.D. Fiete, *Modeling the Imaging Chain of Digital Cameras*. Washington: SPIE Press, 2010.
- [14] G. Curatu and J.E. Harvey, "Analysis and design of wide-angle foveated optical system based on transmissive liquid crystal spatial modulators", *Optical Eng.*, vol. 48, no. 4, pp. 043001-1–043001-10, 2009. doi: 10.1117/1.3122006
- [15] V.M. Borovytsky and O. Hudz, "Abbe experiment with inclined grating", in *Proc. SPIE 10745, Current Developments in Lens Design and Optical Engineering XIX*, 1074512, 2018. doi: 10.1117/12.2320489

Н.С. Колобродов

ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРОЗРАЧНЫХ ТКАНЕЙ

Проблематика. Основным элементом оптических систем обработки информации является когерентный оптический спектроанализатор (КОС). В текстильной промышленности при изготовлении и применении тонких прозрачных тканей (марли, бинтов и т.п.) возникает проблема контроля формы и геометрических размеров прозрачных ячеек. Для этого применяют микроскопы, с помощью которых измеряются геометрические параметры многих прозрачных ячеек. Такой процесс является трудоемким, требует значительных затрат времени на измерения. Использование КОС позволяет непосредственно измерять средние значения размеров ячеек.

Цель исследования. Разработка оптической модели прозрачной ткани, на основе которой предложены лазерный метод и экспериментальный стенд для измерения средних геометрических размеров прозрачных ячеек ткани.

Методика реализации. Предложенный метод контроля качества прозрачных тканей основывается на использовании КОС. Если в передней фокальной плоскости Фурье-объектива расположить прозрачную ткань, то в задней фокальной плоскости формируются дифракционные максимумы, положение которых зависит от размеров прозрачных ячеек ткани.

Результаты исследования. Предложена геометрическая модель структуры прозрачной ткани, которая описывает амплитудный коэффициент пропускания ткани в зависимости от периода и размеров прозрачных ячеек ткани. Получена аналитическая формула для расчета пространственного спектра коэффициента пропускания такой модели. Разработан лабораторный стенд КОС, который позволяет измерять геометрические размеры прозрачных ячеек ткани.

Выводы. Исследование модели пропускания прозрачной ткани показало, что структуру ткани можно рассматривать как двумерную дифракционную решетку, период которой определяется толщиной нити и прозрачной частью ячейки ткани. Для измерения размеров ячеек прозрачной ткани предложено использовать КОС, который позволяет непосредственно измерять пространственные частоты дифракционных максимумов и рассчитывать средние значения размеров ячеек ткани. Для подтверждения достоверности предложенного метода разработан экспериментальный стенд цифрового КОС.

Ключевые слова: модель пропускания прозрачной ткани; когерентный оптический спектроанализатор; пространственный спектр.

M.S. Kolobrodov

OPTICAL METHOD FOR QUALITY CONTROL OF TRANSPARENT FABRICS

Background. The main element of optical information processing systems is a coherent optical spectrum analyzer (COSA). In the textile industry in the manufacture and use of thin transparent fabrics (gauze, bandages, etc.) there is a problem of controlling the shape and geometric dimensions of transparent cells. For this purpose, microscopes are used with the help of which the geometrical parameters of many transparent cells are measured. Such process is time consuming, requires a considerable amount of time for measurement. Using COSA allows you to directly measure the average cell size.

Objective. The purpose of the paper is development of an optical model of a transparent fabric, on the basis of which a laser method and an experimental stand for measuring the average geometric dimensions of transparent fabrics cells are proposed.

Methods. The proposed method of quality control of transparent fabrics is based on the use of COSA. If a transparent fabric is positioned in the front focal plane of a Fourier lens, then diffraction maximums are formed in the back focal plane, the position of which depends on the size of the transparent fabric cells.

Results. The geometric model of the structure of a transparent fabric, which describes the amplitude transmittance coefficient of the fabric depending on the period and the size of the transparent fabrics cells, is proposed. An analytical formula is obtained for calculating the spatial spectrum of the transmittance of such a model. The COSA laboratory stand was developed, which allows measuring the geometric dimensions of transparent fabric cells.

Conclusions. The research of the transmission model of transparent fabric showed that the fabric structure can be viewed as a two-dimensional diffraction grating, the period of which is determined by the thickness of the filament and the transparent part of the fabric cell. To measure the size of the cells of the transparent fabric, it is proposed to use the COSA, which allows you to directly measure the spatial frequencies of the diffraction peaks and calculate the average values of the fabric cell sizes. To validate the proposed method, an experimental stand of digital COSA has been developed.

Keywords: transparent fabric transmission model; coherent optical spectrum analyzer; spatial spectrum.

Рекомендована Радою
приладобудівного факультету
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
17 вересня 2019 року

Прийнята до публікації
31 жовтня 2019 року