

ЗАХИСТ ОБТ ВІД ЗАСОБІВ ВИЯВЛЕННЯ ТА УРАЖЕННЯ

УДК 551.501.81

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.23.2020.65-74>П.П. Ванкевич¹, В.В. Дегтяренко², Б.Д. Дробенко¹, Ю.А. Настишин²¹Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України²Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

ОПТОВОЛОКОННА ТКАНИНА ЯК ЕЛЕМЕНТ СИГНАЛЬНИХ СИСТЕМ

В статті представлено матеріали досліджень, спрямовані на розробку волоконно-оптичних сенсорів, які можуть бути інтегровані в елементи одягу або бойового екіпірування військовослужбовців. Геометричні, механічні та функціональні характеристики сенсорів можна варіювати в залежності від призначення сигнального елемента, що надає можливість їхньої інтеграції в текстильні матеріали, які є основою для виготовлення бойового спорядження військовослужбовця. Заміна ділянок текстильної тканини в місцях, де вона покриває оптичний сенсор, тканинними елементами, виготовленими із оптичних волокон, має багатофункціональне призначення. По-перше, за рахунок своєї тканинної структури, перетворює зонduючий світловий промінь з точкової плями (з просторовою розмірністю 0D) в 2D-розгортку, тим самим, покращуючи просторову діаграму чутливості сенсора. По-друге, заміщує видалену тканину поверх сенсора, тим самим відновлюючи цілісність тканини. По-третє, виконує захисну та маскувальну функцію для сенсора. За міцністю, еластичністю та довговічністю такі тканинні матеріали практично нічим не відрізняються від традиційних. В роботі експериментально продемонстровано, що система квазіпаралельних волокон, яка може бути частиною тканинних елементів одягу чи екіпірування військовослужбовця, відіграє роль дифракційної ґратки для лазерного променя. При цьому форма дифракційної смуги сильно залежить від кута падіння світлового променя відносно нормалі до ґратки. Форма дифракційної смуги є прямолінійною, якщо падаючий промінь знаходиться в площині, перпендикулярній до площини системи квазіпаралельних оптичних волокон і одночасно перпендикулярній напрямку волокон. Якщо падаючий промінь знаходиться поза цією площиною, то в загальному випадку форма дифракційної смуги описується кривою другого порядку. Ефект викривлення дифракційної смуги при похилому падінні лазерного променя на ґратку є наслідком так званої конічної дифракції світла, при якій дифраговані промені поширюються вздовж поверхні конуса. Зокрема, якщо падаючий промінь знаходиться в площині, перпендикулярній до площини системи волокон (ґратки) і одночасно паралельній до напрямку волокон, то в залежності від кута між падаючим променем і перпендикуляром до площини ґратки дифракційна смуга є гіперболою при кутах падіння, менших, ніж 45° , параболою, коли кут падіння рівний 45° чи еліпсом при кутах падіння більших за 45° . Випадок малих кутів падіння, коли дифракційна смуга є гіперболою, продемонстровано в роботі. Властивість зміни типу кривої другого порядку (гіпербола/парабола/еліпс) дифракційної смуги та її орієнтації (вигнута праворуч/ліворуч чи вверх/вниз) при зміні кута падіння світлового променя на ґратку, можна використати для визначення положення джерела світла (лазерного прицілу снайпера) відносно оптоволоконної ґратки, інтегрованої в елемент одягу чи екіпірування військовослужбовця.

Ключові слова: текстиль, волоконно-оптичні давачі, чутливі полімерні матеріали, світлова хвиля, зонduючий промінь, світлове гало, дифракційний максимум, рівняння дифракції, напрямні косинуси, конічний переріз конуса, криві другого порядку.

Постановка проблеми

Інтегровані в текстиль волоконно-оптичні давачі можуть бути використані для діагностування різних небезпечних ситуацій, що виникають під час ведення бойових дій в режимі реального часу. Ці небезпеки пов'язані із можливістю застосування противником хімічної, біологічної загрози, підвищених рівнів

зовнішніх температур, електромагнітних полів, лазерного випромінювання та дії полів, генерованих джерелами різноманітної фізичної природи.

Для впровадження інтегрованих волоконно-оптичних систем попередження про небезпеку необхідно виконати низку теоретичних і експериментальних досліджень. Особливу актуальність мають експериментальні роботи, які можуть бути розділені

на чотири основних напрями: дослідження характеристик чутливих полімерних матеріалів; підготовка (виробництво) оптичних волокон з чутливими покриттями; дослідження характеристик волоконно-оптичних давачів; інтеграції сенсорних елементів у текстильні матеріали.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Існуючі нині, адаптовані під практичне застосування давачі, складаються зі складних волоконно-оптичних систем, які комплектуються багатофункціональними облицювальними матеріалами і здатні сприймати та відображувати різноманітні умови навколишнього середовища [1, 2]. Це можуть бути термочутливі хромогенні матеріали, хімічні або біологічні агенти, що наносяться на волоконні полімери тощо [3–5]. Чутлива функція заснована на їхній здатності змінювати світлові характеристики поширення променів в оптичних волокнах.

Текстильні матеріали із вмонтованими волоконно-оптичними давачами з певним наближенням можна вважати «розумними» технічними матеріалами, які можуть взаємодіяти з навколишнім середовищем. Вони можуть відчувати і реагувати на умови навколишнього середовища та зовнішніх подразників від механічних, теплових, хімічних або інших джерел. Такі текстильні матеріали можуть бути багатофункціональними залежно від того, які чутливі елементи або давачі включені в текстильну основу.

Метою даної роботи є дослідження характеристик полімерного волокна поліаніліну, яке може бути використане для формування волоконно-оптичних мікродавачів, здатних певним чином протидіяти застосуванню противником зброї, в якій, як зонduючий/уражаючий фактор використовується локально-зосереджене спрямоване лазерне випромінювання.

Виклад основного матеріалу

Коли на шляху світлової хвилі є деяка перешкода, наприклад, непрозора діафрагма з отвором, хвиля огинає перешкоду, і на екрані, розміщеному трохи далі, з'являється пляма більшого розміру, ніж розмір отвору. Пляма складається з почергових темних і світлих кілець.

Система реєстрації світлових сигналів, здатних попередити військовослужбовця про небезпеку, ґрунтується на принципі розгортання вузько-апертурного зонduючого лазерного променя з точковим (просторова розмірність 0D) перерізом світлової плями в лінійну (просторова розмірність 1D) чи плоску (просторова розмірність 2D) світлову пляму, розмір, якої значно перевищує розмір світлової плями вхідного зонduючого/уражаючого променя. Ефект розгортання точкового перерізу лазерної плями в

лінійну смугу засновано на явищі розсіювання світла на нитках тканини. Розгортання променя з точковим 0D перерізом у площинну 2D дифрактограму може відбуватися одночасно, як мінімум, за трьома механізмами: дифракцією на окремих волокнах, розфокусування та оптоволоконного ефекту. Слід очікувати, що внаслідок суперпозиції цих трьох механізмів дифрактограма не буде дискретною, тобто не міститиме розділених дифракційних рефлексів із вираженими максимумами та мінімумами інтенсивності, як це очікувалося б при чистій дифракції на краях волокон. Натомість слід очікувати, що розподіл інтенсивності світла позаду тканини матиме розмитий характер. Розмиванню розподілу світлової плями за тканиною сприятиме не тільки накладання двох інших механізмів розсіювання на дифракцію, а і накладання дифрактограм від окремих волокон тканини. Але це не означає, що результуюча дифрактограма матиме дифузно-ізотропний характер. Іншими словами не слід очікувати, що розсіяна світлова пляма матиме круговий переріз із плавним радіальним розподілом інтенсивності. Саме навпаки, анізотричний характер розсіювачів, тобто циліндрична форма кожного окремого волокна передбачає, що розподіл інтенсивності розсіяного світла буде суттєво анізотропним, а саме: для системи квазіпаралельних волокон більша частина енергії розсіюватиметься у напрямку, перпендикулярному до довгих осей волокон за рахунок дифракції та лінзового ефекту. А оптоволоконний ефект приводитиме до розсіювання світла вздовж волокон, тобто в напрямку, перпендикулярному до основної (більш інтенсивної тонкої) смуги, утворюючи світлове гало по обидва її боки.

У звичайних тканинах нитки є непрозорими для видимого світла, а тому значна частина світлової енергії поглинатиметься, що знижує ефективність детектування. Якщо ж тканина або вставки до неї у місцях, де розміщені фотодетектори, виготовлена з прозорого полімерного волокна, то така тканина не тільки пропускати світло, а й значно сильніше розсіюватиме його за рахунок розфокусування та оптоволоконного ефекту. Кожне окреме полімерне волокно відіграватиме роль циліндричної лінзи, розгортаючи лазерний промінь з точковим перерізом у смужку, товщина якої буде рівною діаметру перерізу лазерної плями, а довжина визначатиметься відстанню від волокна до екрана та оптичним фокусом f циліндричної лінзи волокна [6]

$$f = \frac{n_e}{n_e - 1} R,$$

де n_g – показник заломлення волокна, а число 1 в знаменнику відповідає показнику заломлення повітря. Приймаючи показник заломлення матеріалу волокна рівним $n_g = 1,5$, отримуємо оцінку заднього фокуса циліндричної волоконної лінзи $f=3R$. Тоді для волокна радіусом $R=50$ мкм маємо $f=150$ мкм. Це означає, що далеко за фокусом (на відстанях набагато більших, ніж 150 мкм), світловий пучок буде розбіжним, що в свою чергу означає, що промінь з точковим перерізом розгортається в смужку, перпендикулярну до довгої осі волокна. Тому цей ефект становить інтерес для детального розгляду розсіювання лазерного променя двошаровою котушкою квазіпаралельних мотків оптичного волокна.

Завдяки тому, що показник заломлення волокна значно вищий від показника заломлення повітря, кожна нитка відіграє роль оптичного волокна, в яке світло заходить, та при похилому падінні (відносно довгої осі волокна) внаслідок ефекту повного внутрішнього відбивання поширюється вздовж волокна. В ідеальному оптичному волокні світло поширюватиметься без втрат та без витоку з нього, але в реальних волокнах внаслідок недосконалості поверхні частина світлової енергії просочуватиметься із волокна, тим самим розгортаючи переріз променя з квазіточкового з просторовою розмірністю 0D в квазілінійний з просторовою розмірністю 1D, якщо волокна розміщені паралельно чи квазіпаралельно одне до одного. Якщо ж волокна розміщені так, як у типовій тканині, тобто утворюючи квадратну сітку, то розсіяна світлова пляма матиме більш складну 2D геометрію. А це означає, що щільність заповнення піксельними фотоприймачами можна понизити у відповідну кількість разів.

Таким чином, можна очікувати такі можливі ситуації:

1) тканина, виготовлена з оптичного волокна, буде розсіювати зонduючий промінь, розгортаючи

його в 1D смугу для квазіпаралельних волокон чи в 2D світлову пляму для квадратної сітки волокон;

2) для системи паралельних волокон, крім основної смуги, перпендикулярної до довгих осей волокон, можна очікувати існування світлового гало по обидва її боки внаслідок оптоволоконного ефекту;

3) за виглядом функції просторового розподілу інтенсивності розсіяного світла, можна отримати інформацію про кутові координати та дальність розміщення джерела світла, від якого виходить зонduючий промінь.

У сучасній літературі, наприклад [7], можна знайти опис дифракції світла, але лише для найпростіших випадків дифракції на непрозорих ідеальних ґратках. Якщо ж ґратка далека від ідеальної (аперіодична, дефектна чи прозора із супутніми оптоволоконним та лінзовим ефектом), то опис значно ускладнюється і буде значною мірою залежати від конкретної геометрії ґратки з урахуванням усіх геометричних та оптичних недосконалостей. Аналітичний опис розсіювання світла на реальній оптоволоконній тканині є практично неможливим, а числове моделювання буде переобтяжене величезною кількістю параметрів. У такому випадку слід провести тестовий експеримент, який дасть можливість перевірити справедливості якісних передбачень та встановити емпіричні співвідношення між координатним розподілом інтенсивності дифрактограми та координатами джерела світла.

Для моделювання розсіювання лазерного променя на тканині проведено тестовий експеримент, у якому лазерний промінь гелій-неонового лазера (довжина хвилі $\lambda=632,8$ нм) поширюється через двошарову котушку із 15 мотків (в одному шарі) аперіодично намотаного полімерного волокна поліаніліну діаметром 0,1 мм на плоскій пластиковій підкладці з розмірами $47 \times 30 \times 2$ мм із прямокутним вікном розміром 25×10 мм для світлового променя (рис. 1).



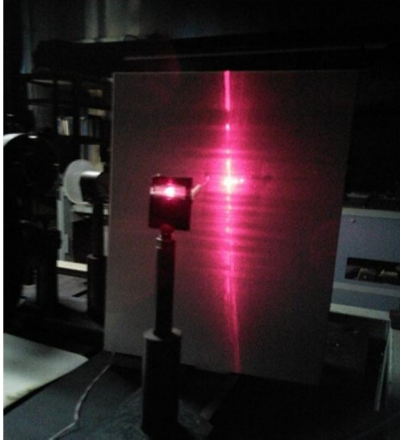
Рис. 1. Двошарова котушка з 15 мотків (в одному шарі) аперіодично намотаного полімерного волокна поліаніліну (діаметром 0,1 мм) на плоскому пластиковому екрані з розмірами $47 \times 30 \times 2$ мм із прямокутним вікном розміром 25×10 мм для світлового променя

Типові картини розсіювання світла на такій двошаровій котушці показано на рис. 2 (а, б), для

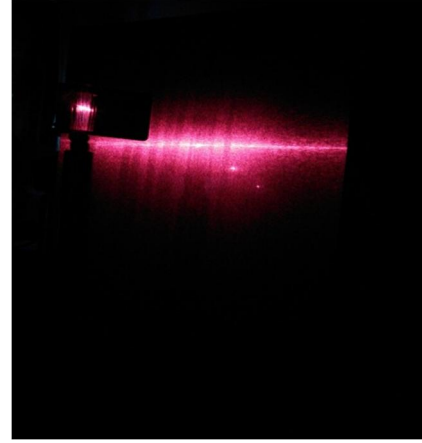
нормального, та на рис. 3 для похилого падіння зонduючого променя.

Рис. 2 а демонструє геометрію експерименту: довгі осі полімерних волокон розміщені горизонтально; розмір розсіяної світлової плями виявляється набагато більшим від розмірів вікна підкладки. На рис. 2 б показано пляму розсіяного світла для випадку, коли довгі осі волокон орієнтовані вертикально. Порівняння рис. 2 а та рис. 3 б

однозначно вказує на те, що більша частина світлової енергії розсіюється в напрямку, перпендикулярному до довгих осей волокон. Деталі вигляду картини розсіювання при нормальному падінні видно на рис. 3 а.



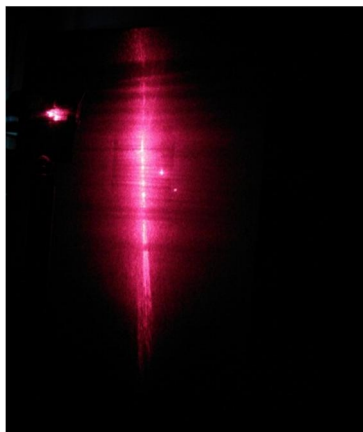
а



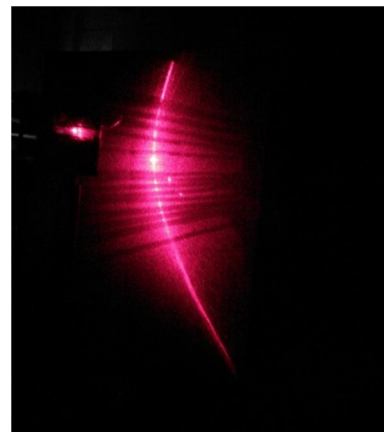
б

Рис. 2. Демонстрація геометрії експерименту з розсіювання лазерного світла на двошаровій котушці оптоволоконного волокна:

а – горизонтальна орієнтація довгих осей волокон; б – вертикальна орієнтація довгих осей волокон



а



б

Рис. 3. Детальний вигляд плями лазерного променя розсіяного на двошаровій котушці волокон для горизонтальної орієнтації довгих осей волокон при:

а – нормальному; б – похилому падінні (під кутом 30°) лазерного променя

Отже, як і очікувалось, при нормальному падінні на площину вікна лазерний промінь, проходячи через котушку, розгортається в 1D квазілінійну яскраву смугу, перпендикулярну до напрямку намотування волокон та менш яскравого гало з обох боків смуги (рис. 3 а, б).

Обговорення результатів експерименту

Таким чином, експеримент підтверджує два якісних передбачення, висловлені вище.

По-перше, котушка волокна, яка моделює тканину з квазіпаралельними волокнами, ефективно розгортає точковий переріз зонduючого лазерного

променя в квазілінійну смугу так, що її лінійний розмір ($l > 10$ см) у напрямку, перпендикулярному до напрямку намотування, є в сотні разів більшим від діаметра ($d \sim 1$ мм) зонduючого променя. Зрозуміло, що величина l зростає із збільшенням відстані між котушкою та екраном.

По-друге, існування світлового гало з обох боків основної інтенсивнішої смуги розсіяної світлової плями найпевніше пов'язане з вторинним розсіюванням світла, розсіяного першим шаром волокна, на другому шарі волокна. Вище отримано оцінку для фокуса циліндричної лінзи волокна $f = 0,15$ мм. Оскільки другий шар котушки розміщений відносно

першого шару на відстані $\sim 2 \text{ мм} \gg 0,15 \text{ мм}$, то пучок світла, що попадає на другий шар, є розбіжним. Внаслідок цього вторинне розсіювання відбувається уже не на одному чи кількох сусідніх волокнах, а на всьому другому шарі. Справді, на світлинах, показаних на рис. 2 та рис. 3, можна легко розпізнати усі 15 волокон шару котушки. Завдяки розбіжному характеру первинно розсіяного пучка світлові промені падають на другий шар котушки під значними кутами, що призводить до позаосьового розфокусування та розширення пучка на виході із другого шару не лише в площині, перпендикулярній до напрямку намотування, а й в інших напрямках. Крім того, за рахунок похилого падіння світлових променів на другий шар котушки, задіяним може виявитися і оптоволоконний (хвилевідний) механізм, що супроводжується просочуванням світла з волокна. Поперечний розмір L гало (порядку кількох сантиметрів) є в десятки разів більшим від діаметра зондуємого лазерного променя, що узгоджується із другим передбаченням, зробленим вище, стосовно розфокусування та оптоволоконної складової розгортки променя.

На рис. 4 подано розподіл інтенсивності вздовж основної (інтенсивнішої) смуги розсіювання, отриманий оцифруванням дифракційної картини, представленої на рис. 3 б. Без врахування шумових викидів за рахунок неоднорідності розсіяння, координатний розподіл інтенсивності виявляється симетричним відносно координати, що відповідає позначці 600 на горизонтальній координатній осі графіка. Ця координата відповідає зондуємому лазерному променю, тому відповідна ділянка виглядає найяскравішою. По обидва боки від середини смуги інтенсивність спадає при віддаленні від середини смуги. Із зображення на рис. 3 видно, що розподіл інтенсивності має неперервний характер вздовж смуги розсіювання і не містить очевидних ознак дискретності, що вказує на те, що розфокусування за рахунок лінзового ефекту є переважаючим у порівнянні з дифракційним механізмом; також на рис. 3 можна розглядіти дві інтенсивні вертикальні смуги, що відповідають розфокусуванню на двох шарах котушки з горизонтально розміщеними волокнами.

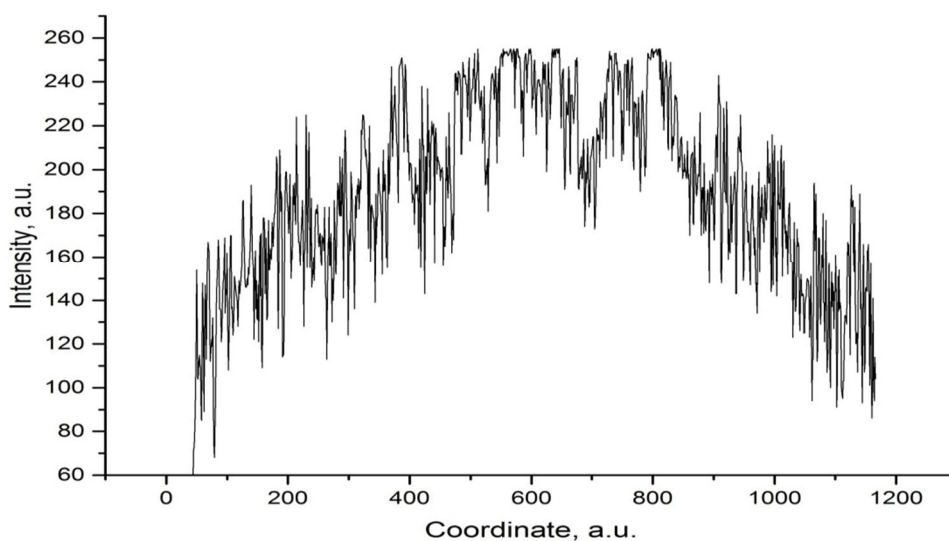


Рис. 4. Координатний розподіл інтенсивності вздовж основної (інтенсивнішої) смуги розсіювання

Встановлення фізичних механізмів утворення світлового гало потребує подальшого вивчення, але важливо відзначити, що ширина L світлового гало за рахунок оптоволоконного механізму розгортання променя не мала б залежати від відстані до екрана. Іншим механізмом утворення гало є вторинне розсіювання на другому шарі котушки. На всіх світлинах, поданих на рис. 2 і рис. 3, спостерігаються тіні від окремих волокон, що не узгоджується з механізмом оптоволоконного ефекту, при якому внаслідок просо-

чування світла з волокон, вони (волокна) повинні б виглядати світлими, а не темними, як це видно на світлинах. Звідси слідує, що домінуючим механізмом утворення гало по обидва боки від основної смуги є розфокусування за рахунок вторинного розсіювання на другому шарі волоконної котушки. Таким чином, завдяки розгортці променя оптоволоконною тканиною вздовж волокон, щільність розміщення фотоприймачів можна суттєво знизити не лише в напрямку поперек волокон, а й уздовж них.

Для того, щоб перевірити третє передбачення про можливість отримання інформації про координати джерела зондуючого лазерного променя, підкладка котушки була повернута навколо осі, перпендикулярної до напрямку намотування оптоволокна так, що кут між напрямком поширення променя та нормаллю до площини підкладки становив 30° . Із отриманої дифрактограми (рис. 3 б) чітко видно, що зміна кутових координат джерела світлового відносно нормалі до площини ґратки призводить до суттєвої зміни форми розподілу інтенсивності розсіяного світла. Основна (інтенсивніша) смуга та гало суттєво викривилися (що видно з порівняння картини, відображеної на рис. 3 а та рис. 3 б). Таким чином, дані наведеного експерименту однозначно демонструють, що кривизна дифракційної світлової смуги залежить від кута падіння зондуючого променя, що передбачає можливість визначення кутового положення випромінювача.

Ефект викривлення дифракційної смуги при похилому падінні лазерного променя на ґратку є наслідком так званої *конічної дифракції* світла, при якій дифраговані промені поширюються вздовж поверхні конуса [7–9]. Перетин дифракційного конуса площиною екрана приводить до формування на екрані дифракційних максимумів (дифракційної смуги, якщо сусідні дифракційні максимуми перекриваються), що лежать на кривій другого порядку: еліпсі, параболі чи гіперболі в залежності від кутового положення джерела лазерного світла відносно нормалі до ґратки. Таким чином, форма дифракційної смуги містить інформацію про координати джерела лазерного світла. Якщо лазерний промінь виходить із прицілу снайпера, то форму дифракційної смуги можна використати для встановлення кутового місцеперебування (а при певних умовах і повних координат) снайпера. Опис дифрактограми від плоскої однієї ґратки задається, так званими, рівняннями ґратки, які пов'язують кути, які описують напрямки поширення падаючого та дифрагованих променів. Якщо лазерний промінь з довжиною світлової хвилі λ падає на ґратку, період якої рівний d , в площині, перпендикулярній до площини ґратки і перпендикулярній до напрямку волокон ґратки, під кутом θ_0 відносно нормалі до ґратки, то кутове положення дифракційних максимумів задається рівнянням

$$\sin \theta_0 \mp \sin \theta_m = \mp \frac{m\lambda}{d}, \quad (1)$$

де θ_m – кут між нормаллю до ґратки та променем дифракційного максимуму порядку m , а знаки “+”

та “–” відповідають геометрії відбивання та пропускання дифракційного променя, відповідно. У випадку нормального падіння дифракційні максимуми лежать на прямій лінії, перпендикулярній до напрямку, вздовж якого лежать лінійні елементи, що формують ґратку (оптичні волокна в нашому випадку), подібно до того, як це показано на рис. 2. Тобто, якщо волокна дифракційної ґратки розміщені горизонтально, то дифракційна смуга є вертикальною (рис. 2 а). Відповідно, якщо волокна ґратки є вертикальними, то дифракційна смуга є горизонтальною (рис. 2 б). Якщо лазерний промінь падає на ґратку в площині, перпендикулярній до площини ґратки, і перпендикулярній до напрямку волокон ґратки, під кутом θ_0 , то дифрагований промінь, що відповідає нульовому максимуму ($m = 0$) поширюється під кутом θ_0 відносно нормалі у тій же площині. Нульовий максимум легко розпізнати візуально, бо він є найбільш інтенсивним серед усіх дифракційних максимумів. На екрані позаду ґратки світлова пляма нульового дифракційного максимуму буде зсунута праворуч (ліворуч) або вниз (вверх) відносно точки, в якій падаючий промінь перетинає ґратку, в залежності від того, звідки падає промінь: з лівого (правого) боку на вертикальну ґратку чи зверху (знизу) на горизонтальну ґратку. За допомогою матрично-піксельного фотоелемента можна оцифрувати дифрагований сигнал та з допомогою мікросхеми, яка проаналізує дифрактограму, генерувати звуковий сигнал у навушниках військовослужбовця на кшталт “снайпер ліворуч (праворуч) чи вверху(внизу)”.

Якщо ж лазерний промінь падає на ґратку похило, будучи не в площині, перпендикулярній до площини ґратки, яка є перпендикулярною до напрямку волокон ґратки, то рівняння ґратки приймає вигляд [7–9]

$$\frac{m\lambda}{d} = \cos \varphi_0 (\sin \theta_0 + \sin \theta_m), \quad (2)$$

φ_0 – кут відхилення променя від площини, перпендикулярної до площини ґратки, яка є перпендикулярною до напрямку волокон ґратки (більш зрозумілими означення кутів φ_0 та θ_0 стануть після введення системи координат нижче по тексту). В такому випадку дифраговані промені лежать на поверхні конуса, а це означає, що дифракційна смуга уже не є прямою лінією; вона є перерізом конуса дифракції площиною екрана і описується кривою другого порядку, яка в залежності від значень кутів φ_0 та θ_0 є гіперболою, параболою або еліпсом.

Для того, щоб показати це, виберемо вісь Z декартової системи координат XYZ вздовж нормалі

до площини ґратки. Вісь X спрямуємо в площині ґратки перпендикулярно до її волокон. Відповідно вісь Y буде спрямована вздовж волокон ґратки, тобто площина XY співпадатиме з площиною ґратки. Таким чином, при нормальному падінні світловий пучок поширюється вздовж осі Z . Положення ґратки відносно падаючого променя можна задати трьома кутами Ейлера θ_0 , φ_0 та ψ [11]. Повернемо ґратку навколо осі Y на кут θ_0 , тобто кут θ_0 – це кут між нормаллю (вісь Z') ґратки, повернутої навколо осі Y , та напрямком поширення лазерного променя (віссю Z). Кут φ_0 відповідає повороту ґратки навколо осі X , тому кут φ_0 – це кут між нормаллю (вісь Z') ґратки, повернутої навколо осі Y , та напрямком поширення лазерного променя (віссю Z). І нарешті, кут ψ відповідає повороту ґратки навколо осі Z , тобто ψ – це азимутальний кут між напрямком волокон ґратки та віссю X вибраної системи координат.

Для випадково орієнтованої ґратки рівняння дифракції компактно записуються в підході напрямних косинусів падаючого (індекс i – від англ.: incident) та дифрагованого (індекс m – порядок дифракції) променів [8, 10]:

$$\alpha_i \mp \alpha_m = \mp \frac{m\lambda}{d} \sin \psi; \beta_i \mp \beta_m = \mp \frac{m\lambda}{d} \cos \psi, \quad (3)$$

де напрямні косинуси падаючого променя виражаються як:

$$\alpha_i = -\sin \theta_0 \cos \varphi_0, \beta_i = -\sin \varphi_0, \quad (4)$$

а напрямні косинуси дифрагованого променя виражимо через координати дифракційного максимуму порядку m

$$\alpha_m = \frac{x_m}{\sqrt{x_m^2 + y_m^2 + z_m^2}}, \beta_m = \frac{y_m}{\sqrt{x_m^2 + y_m^2 + z_m^2}}. \quad (5)$$

Підставивши залежності (1) та (2) в співвідношення (3), отримаємо параметричне рівняння положення дифракційного максимуму. Для випадку $\psi=90^\circ$, $\theta_0=0$, виключивши з розгляду порядок дифракції m , отримуємо

$$x_m^2 + z_m^2 - y_m^2 \operatorname{ctg}^2 \varphi_0 = 0. \quad (6)$$

Відповідно до загальної теорії поверхонь другого порядку [11] дискримінант поверхні внаслідок відсутності вільного члена та рівності нулю коефіцієнтів членів першого степеня у рівнянні (6) тотожно рівний нулю, а тому рівняння (6) описує конус з віссю вздовж осі Y , кутом між твірною конуса і його віссю $\varphi = \frac{\pi}{2} - \varphi_0$ та коловим перерізом з радіусом $R = y_m \operatorname{ctg} \varphi_0$. Із рівняння (6) знаходимо, що переріз конуса дифракції площиною

екрана, встановленого на відстані l від ґратки, описується кривою другого порядку

$$x_m^2 \cos^4 \varphi + z_m^2 \cos 2\varphi + 2z_m l \sin^3 \varphi - l^2 \sin^2 \varphi = 0. \quad (7)$$

Із рівняння (7) видно, що для кутів $\varphi < \frac{\pi}{4}$ маємо $\cos 2\varphi > 0$, а отже, крива (7), на якій розміщені дифракційні максимуми на екрані, є еліпсом; при $\varphi = \frac{\pi}{4}$ маємо $\cos 2\varphi = 0$ і рівняння (7) зводиться до рівняння параболи; для кутів $\varphi > \frac{\pi}{4}$ буде $\cos 2\varphi < 0$ і тоді рівняння (7) описує гіперболу.

Зауважимо, що випадок $\varphi > \frac{\pi}{4}$ відповідає малим кутам нахилу ґратки φ_0 . Таким чином, для геометрії експерименту $\varphi_0=30^\circ$, приведеного на рис. 3 б, робимо висновок, що дифракційна смуга є гіперболою. Зазначимо, що рівняння (7) записано в системі координат нахиленої ґратки. Для того, щоб провести фітування дифракційної смуги, яка утвориться на екрані, встановленому перпендикулярно напрямку поширення падаючого променя (терпендикулярно осі Z), слід виразити координату z_m через координати y та $z = l$ в системі координат, прив'язаної до екрана.

Властивість зміни типу кривої другого порядку (гіпербола/парабола/еліпс) дифракційної смуги та її орієнтації (вигнута праворуч/ліворуч чи вверх/вниз) при зміні кута падіння світлового променя на ґратку можна використати для визначення положення джерела світла (лазерного прицілу снайпера) відносно оптоволоконної ґратки, інтегрованої в елемент одягу чи екіпірування військовослужбовця. Ідентифікацію типу кривої другого порядку можна провести з допомогою мікросхеми, яка фітуватиме рівнянням кінцевого перерізу дифракційної смуги зареєстрованому міні CCD-камерою. Зрозуміло, що випадок коли кут падіння точно рівний $\varphi_0=45^\circ$, є вкрай мало ймовірним, тому детермінація типу кривої зводиться до вибору між гіперболою та еліпсом. Гіперболу можна відрізнити від еліпса за її асимптотичною поведінкою (кривизна прямує до нуля при віддаленні від початку координат), в той час як для еліпса кривизна є ненульовою для всіх значень координат.

Для перевірки цієї ідеї на практиці потрібно провести відповідний макетуючий експеримент, що може стати предметом наступних досліджень.

Висновки

Результати проведених досліджень показують, що полімерні волокна, зокрема поліанілін мають прийнятні оптичні та механічні характеристики і

тому можуть слугувати основою для створення волоконно-оптичних давачів відповідного типу.

Матеріали для одягу та спорядження з волоконно-оптичними системами можуть бути отримані традиційним шляхом текстильного виробництва при використанні спеціальних полімерних ниток. На основі модульного системного підходу такі давачі можуть бути інтегровані у військову форму (у довільному місці, буквально від «голови до ніг») та елементи бойового екіпірування військовослужбовців.

Одним із основних та проблемних напрямів подальших досліджень є вибір і отримання характеристик доступних багатофункціональних матеріалів, чутливих до різних умов навколишнього середовища. Крім цього, оптичне волокно має мати стабільні оптичні властивості, тому конструкції давачів вмонтованих в середовище покриття волокна чутливим облицювальним матеріалом повинні мати підвищену зносостійкість до агресивного впливу зовнішнього середовища та хімічних агентів, що мають місце при проведенні заходів із чистки й відновлення одягу, в який вони інтегровані.

В статті представлено матеріали досліджень, спрямовані на розробку волоконно-оптичних сенсорів, які можуть бути інтегровані в елементи одягу або бойового екіпірування військовослужбовців. Геометричні, механічні та функціональні характеристики сенсорів можна варіювати в залежності від призначення сигнального елемента, що надає можливість їхньої інтеграції в текстильні матеріали, які є основою для виготовлення бойового спорядження військовослужбовця. Заміна ділянок текстильної тканини в місцях, де вона покриває оптичний сенсор, тканинними елементами, виготовленими із оптичних волокон, має багатофункціональне призначення. По-перше, за рахунок своєї тканинної структури перетворює зонduючий світловий промінь з точкової плями (з просторовою розмірністю 0D) в 2D-розгортку, тим самим, покращуючи просторову діаграму чутливості сенсора. По-друге, заміщує видалену тканину поверх сенсора, тим самим відновлюючи цілісність тканини. По-третє, виконує захисну та маскувальну функцію для сенсора. За міцністю, еластичністю та довговічністю такі тканинні матеріали практично нічим не відрізняються від традиційних. В роботі експериментально продемонстровано, що система квазіпаралельних волокон, яка може бути частиною тканинних елементів одягу чи екіпірування військовослужбовця відіграє роль дифракційної ґратки для лазерного променя. При цьому форма дифракційної смуги сильно залежить від кута падіння світлового променя відносно нормалі до ґратки. Форма дифракційної смуги є прямолінійною, якщо падаючий промінь знаходиться в площині, перпендикулярній до площини

системи оптичних волокон і одночасно терпендикулярній напрямку волокон. Якщо падаючий промінь знаходиться поза цією площиною, то в загальному випадку форма дифракційної смуги описується кривою другого порядку. Ефект викривлення дифракційної смуги, при похилому падінні лазерного променя на ґратку є наслідком так званої кінчної дифракції світла, при якій дифраговані промені поширюються вздовж поверхні конуса. Зокрема, якщо падаючий промінь знаходиться в площині, перпендикулярній до площини системи волокон (ґратки) і одночасно паралельній до напрямку волокон, то в залежності від кута між падаючим променем і перпендикуляром до площини ґратки дифракційна смуга є гіперболою при кутах падіння, менших, ніж 45° , параболою, коли кут падіння рівний 45° чи еліпсом при кутах падіння більших за 45° . Випадок малих кутів падіння, коли дифракційна смуга є гіперболою продемонстровано в роботі. Властивість зміни типу кривої другого порядку (гіпербола/парабола/еліпс) дифракційної смуги та її орієнтації (вигнута праворуч/ліворуч чи вверх/вниз) при зміні кута падіння світлового променя на ґратку можна використати для визначення положення джерела світла (лазерного прицілу снайпера) відносно оптоволоконної ґратки, інтегрованої в елемент одягу чи екіпірування військовослужбовця.

Список літератури

1. M. El-Sherif (1997), "Fiber Optic Sensors for Soldier's Smart Uniforms". Third ARO Workshop on Smart Structures, Virginia Polytechnic and State University, Blacksburg, Virginia, Aug. 27–29.
2. M. El-Sherif, Jianming Yuan, Fuzhang Zhao and Xiangyang Wang, (1997, 1998, and 1999), "Annual Report of MURI/ARO (Multi-Disciplinary University Research Initiative-Army Research Office) Functionally Tailored Fibers and Fabrics," ARO Research DAAH 04-96-0018-01.
3. M.F. Rubber (1985), "Polyurethane-Diacetylene Elastomers: A New Class of Optically Active Materials", ACS Polym. Materls. Sci. and Eng. Preprints, Vol. 53, pp. 683–688.
4. M.F. Rubber (1986), "Novel Optical Properties of Polyurethane-Diacetylene Segmented Copolymer", Vol. 54, pp. 665–669.
5. A.G. MacDiarmid and A. J. Epstein (1991), Synthetic Metals: A Novel Role for Organic Polymers, Makromol. Chem., Macromol. Symp. 51, pp. 11–28.
6. Born M. and Wolf E. (2005), Principles on Optics. Seventh (expanded) edition: Cambridge University Press, 952 p.
7. Palmer C. (2002), Diffraction Grating Handbook. Fifth edition: Thermo RGL, New York, 204 p.
8. James E. Harvey and Richard N. Pfisterer (2019), "Understanding diffraction grating behavior: including conical diffraction and Rayleigh anomalies from transmission gratings", Opt. Eng. Issue N 58(8), 087105. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.OE.58.8.087105>.

9. Ganci S. (1981), *Fourier diffraction through a tilted slit*. *Eur. J. Phys. Issue 2*, pp. 158–160.

10. Harvey J.E. and Vernold C.L. *Description of Diffraction Grating Behavior on Direction Cosine Space*. *Engineering and Laboratory notes*. pp. 8158–8160.

11. Корн Г., Корн Т. *Справочник по математике для научных работников и инженеров*: М.: Наука, 1975. 832 с.

References

1. M. El-Sherif (1997), "Fiber Optic Sensors for Soldier's Smart Uniforms". *Third ARO Workshop on Smart Structures, Virginia Polytechnic and State University, Blacksburg, Virginia, Aug. 27–29*.

2. M. El-Sherif, Jianming Yuan, Fuzhang Zhao and Xiangyang Wang, (1997, 1998, and 1999), "Annual Report of MURI/ARO (Multi-Disciplinary University Research Initiative-Army Research Office) Functionally Tailored Fibers and Fabrics," ARO Research DAAH 04-96-0018-01.

3. M.F. Rubber (1985), "Polyurethane-Diacetylene Elastomers: A New Class of Optically Active Materials", *ACS Polym. Materls. Sci. and Eng. Preprints*, Vol. 53, pp. 683–688.

4. M.F. Rubber (1986), "Novel Optical Properties of

Polyurethane-Diacetylene Segmented Copolymer", Vol. 54, pp. 665–669.

5. A.G. MacDiarmid and A. J. Epstein (1991), *Synthetic Metals: A Novel Role for Organic Polymers*, *Makromol. Chem., Macromol. Symp.* 51, pp. 11–28.

6. Born M. and Wolf E. (2005), *Principles on Optics*. *Seventh (expanded) edition: Cambridge University Press*, 952 p.

7. Palmer C. (2002), *Diffraction Grating Handbook*. *Fifth edition: Thermo RGL, New York*, 204 p.

8. James E. Harvey and Richard N. Pfisterer (2019), "Understanding diffraction grating behavior: including conical diffraction and Rayleigh anomalies from transmission gratings", *Opt. Eng. Issue N 58(8)*, 087105. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.OE.58.8.087105>.

9. Ganci S. (1981), *Fourier diffraction through a tilted slit*. *Eur. J. Phys. Issue 2*, pp. 158–160.

10. Harvey J.E. and Vernold C.L. *Description of Diffraction Grating Behavior on Direction Cosine Space*. *Engineering and Laboratory notes*. pp. 8158–8160.

11. Korn H. and Korn H. (1975), "Spravochnik po matematice dla nauchnykh rabotnikov i ingenerov" [*Mathematical Handbook for scientist and engineers*]: Nauka, Moscow, 832 p. [in Russian].

ОПТОВОЛОКОННАЯ ТКАНЬ КАК ЭЛЕМЕНТ СИГНАЛЬНЫХ СИСТЕМ

П.П. Ванкевич, Б.Д. Дробенко, В.В. Дегтяренко, Ю.А. Настишин

В статье представлены материалы исследований, предназначенных на разработку волоконно-оптических сенсоров, которые могут быть интегрированы в элементы одежды или боевой экипировки военнослужащих. Геометрические, механические и функциональные характеристики сенсоров можно варьировать в зависимости от назначения сигнального элемента, который дает возможность их интеграции в текстильные материалы, лежащие в основе изготовления боевого снаряжения военнослужащего. Замена участков текстильной ткани в местах, где она покрывает оптический сенсор, тканевыми элементами, изготовленными из оптических волокон, имеет мультифункциональное назначение. Во-первых, за счет своей тканевой структуры преобразовывает зондирующий световой луч из точечного пятна (с пространственной размерностью 0D) в 2D-развертку, тем самым, улучшая пространственную диаграмму чувствительности сенсора. Во-вторых, замещает удаленную ткань поверх сенсора, тем самым восстанавливая целостность ткани. В-третьих, выполняет защитную и маскировочную функцию для сенсора. По прочности, эластичности, долговечности такие тканевые материалы практически ничем не отличаются от традиционных. В работе экспериментально продемонстрировано, что система квазипараллельных волокон, являющаяся частью тканевых элементов одежды или экипировки военнослужащего, играет роль дифракционной решетки для лазерного луча. При этом форма дифракционной полосы в значительной степени зависит от угла падения светового луча относительно нормали к решетке. Форма дифракционной полосы прямолинейная, если падающий луч находится в плоскости, перпендикулярной к плоскости системы квазипараллельных оптических волокон и одновременно перпендикулярна направлению волокон. Если падающий луч находится вне этой плоскости, то в общем случае форма дифракционной полосы описывается кривой второго порядка. Эффект искривления дифракционной полосы при наклонном падении лазерного луча на решетку является следствием так называемой конической дифракции света, при которой дифрагирующие лучи распространяются вдоль поверхности конуса. В частности, если падающий луч находится в плоскости, перпендикулярной к плоскости системы волокон (решетки) и одновременно параллельной к направлению волокон, то в зависимости от угла между падающим лучом и перпендикуляром к плоскости решетки дифракционная полоса является гиперболой при углах падения, меньше чем 45° , параболой, если угол падения равен 45° или эллипсом при углах падения больших, чем 45° . Случай малых углов падения, когда дифракционная полоса является гиперболой, продемонстрировано в работе. Свойство изменения типа кривой второго порядка (гипербола/парабола/эллипс) дифракционной решетки и ее ориентации (вогнута вправо/влево или вверх/вниз) при изменении угла падения светового луча на решетку, можно использовать для определения положения использования источника света (лазерного прицела снайпера) относительно оптоволоконной решетки, интегрированной в элементе одежды или экипировки военнослужащего.

Ключевые слова: текстиль, волоконно-оптические датчики, чувствительные полимерные материалы, световая волна, зондирующий луч, световое гало, дифракционный максимум, уравнение дифракции, направляющие косинусы, коническое сечение конуса, кривые второго порядка.

FIBER FABRIC AS AN ELEMENT OF SIGNAL SYSTEMS

P. Vankevych, V. Dehtyarenko, B. Drobenko, Yu. Nastyshyn

The article presents research materials for developing fiber-optic sensors that can be integrated into items of clothing or combat equipment of servicemen. The geometric, mechanical and functional characteristics of the sensors can be varied depending on the purpose of the signal element, which allows their integration into textile materials, which are the basis for the manufacture of military equipment. Replacement of areas of textile fabric in places where it covers the optical sensor with fabric elements made of optical fibers has a multifunctional purpose. First, due to its tissue structure, it expands the probing light beam from a spot (with a spatial dimension of 0D) into a 2D scan, thereby improving the spatial sensitivity diagram of the sensor. Second, it replaces the removed tissue on top of the sensor, thereby restoring the integrity of the tissue. Third, it performs a protective and masking function for the sensor. In terms of strength, elasticity and durability, such fabric materials are almost indistinguishable from traditional ones. The paper experimentally demonstrates that the system of quasi-parallel fibers, which can be part of the fabric elements of clothing or equipment of a serviceman, plays the role of a diffraction grating for a laser beam. The shape of the diffraction band strongly depends on the angle of incidence of the light beam relative to the normal to the grating. The shape of the diffraction band is linear if the incident ray is in a plane perpendicular to the plane of the system of quasi-parallel optical fibers and at the same time perpendicular to the direction of the fibers. If the incident ray is outside this plane, then in the general case, the shape of the diffraction band is described by a second-order curve. The effect of curvature of the diffraction band when the laser beam falls obliquely on the lattice is a consequence of the so-called conical diffraction of light, in which the diffracted rays propagate along the surface of the cone. In particular, if the incident ray is in a plane perpendicular to the plane of the fiber system (grating) and parallel to the direction of the fibers, then depending on the angle between the incident ray and perpendicular to the grating plane, the diffraction band is a hyperbola at angles of incidence smaller than 45° , parabola, when the angle of incidence is 45° or ellipse at angles of incidence larger than 45° . The case of small angles of incidence when the diffraction band is a hyperbola is demonstrated in the work. The property of changing the type of the second-order curve (hyperbola / parabola / ellipse) of the diffraction band and its orientation (curved to the right / left or up / down) when changing the angle of incidence of the light beam on the grating can be used to determine the position of the light source (laser sniper sight) with respect to the fiber optic grating integrated into the item of clothing or equipment of the serviceman.

Key words: textile, fiber optical sensors, sensitive polymer materials, light wave, sound ray, light galo, diffractonal maximum, diffraction equations, direction cosine, of cone conical cut, the curves of second rang.

UDK 621.396.96

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.23.2020.74-78>

Ю.М. Косовцов, А.А. Звонко, В.В. Атаманюк, О.М. Дробан

Національна академія сухопутних військ, Львів

МОЖЛИВОСТІ ЗМІНИ ДІАГРАМИ ЗВОРОТНОГО РОЗСІЮВАННЯ ОБ'ЄКТА, ПОВЕРХНЯ ЯКОГО УТВОРЕНА ПЛОСКИМИ ГРАНЯМИ, ШЛЯХОМ НАНЕСЕННЯ ФАЗОЗМІНЮЮЧОГО ПОКРИТТЯ

Проведена оцінка можливості зниження радіолокаційної помітності об'єктів, поверхня яких утворена поєднанням плоских граней за рахунок нанесення фазозмінюючого покриття. Визначені переваги використання фазозмінюючого покриття у порівнянні з радіопоглинаючим. Отримані діаграми зворотного розсіювання прямокутної грані без покриття та з нанесеним покриттям. З отриманих результатів видно, що за рахунок використання фазозмінюючого покриття можна досягти бажаних змін характеристики діаграми зворотного розсіювання об'єкта, поверхня якого утворена плоскими гранями.

Ключові слова: радіолокаційна помітність, плоска електропровідна грань, фазозмінююче покриття, поглинаюче покриття, діаграма зворотного розсіювання, радіолокаційна станція.

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз попередніх досліджень показує, що на даний час найбільш поширеним та ефективним способом зменшення радіопомітності є формування

геометричної форми об'єкта у такому вигляді, що концентрує відбиту енергію у вузькому діапазоні кутів з врахуванням статистичних закономірностей орієнтації об'єкта відносно радіолокаційної станції (РЛС) та нанесення на об'єкт різного роду поглинаючих матеріалів і фарб.