КОЛОМІЄЦЬ ІВАН СЕРГІЙОВИЧ. Назва дисертаційної роботи: "ДИФЕРЕНЦІАЛЬНА МЮЛЛЕР ПОЛЯРИМЕТРІЯ ОПТИЧНО АНІЗОТРОПНИХ НЕДЕПОЛЯРИЗУЮЧИХ СЕРЕДОВИЩ"

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

імені ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

На правах рукопису

Коломієць Іван Сергійович

УДК 535.51

ДИФЕРЕНЦІАЛЬНА МЮЛЛЕР ПОЛЯРИМЕТРІЯ ОПТИЧНО

АНІЗОТРОПНИХ НЕДЕПОЛЯРИЗУЮЧИХ СЕРЕДОВИЩ

01.04.05 – оптика, лазерна фізика

Дисертація на здобуття наукового ступеня

кандидата фізико-математичних наук

Науковий керівник:

Савенков Сергій Миколайович

доктор фізико-математичних наук,

доцент

Київ – 2015

2

ЗМІСТ

ЗМІСТ ........................................................................................................................... 2

ВСТУП ......................................................................................................................... 4

РОЗДІЛ 1 ЗАСТОСУВАННЯ МАТРИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПИСУ

ПОЛЯРИЗАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СЕРЕДОВИЩ .................................... 10

1.1 Матричний метод Джонса .............................................................................. 10

1.2 Матричний метод Мюллера ........................................................................... 13

1.3 Базові види анізотропії ................................................................................... 16

1.4 Матричні моделі середовищ із складною анізотропією: мультиплікативні

моделі...................................................................................................................... 19

1.4.1 Теореми еквівалентності Джонса ........................................................... 20

1.4.2 Теорема полярного розкладу .................................................................. 24

1.4.3 Узагальнена теорема еквівалентності .................................................... 26

1.5 Матричні моделі середовищ із складною анізотропією: диференціальні

(однорідні) моделі ................................................................................................. 27

1.6 Неоднорідні недеполяризуючі середовища .................................................. 31

1.7 Основні результати і висновки ...................................................................... 35

РОЗДІЛ 2 РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ПОЛЯРИЗОВАНОГО СВІТЛА В

ОДНОРІДНИХ СЕРЕДОВИЩАХ ІЗ СКЛАДНОЮ АНІЗОТРОПІЄЮ .............. 36

2.1 Інтегральні матричні моделі .......................................................................... 36

2.2 Розв’язок спектральної задачі ........................................................................ 39

2.2.1 Власні поляризації ................................................................................... 41

2.2.2 Власні числа .............................................................................................. 46

2.3 Еволюція стану поляризації світла ................................................................ 55

2.4 Розв’язок оберненої задачі ............................................................................. 64

2.4.1 Загальний випадок ................................................................................... 64

2.4.2 Частинні розв’язки ................................................................................... 68

2.5 Порівняння однорідного та мультиплікативного моделювання ................ 71

2.6 Основні результати і висновки ...................................................................... 92

РОЗДІЛ 3 РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ПОЛЯРИЗОВАНОГО СВІТЛА В

НЕОДНОРІДНИХ НЕДЕПОЛЯРИЗУЮЧИХ СЕРЕДОВИЩАХ ........................ 94

3

3.1 Поляриметричні матричні моделі ................................................................. 94

3.2 Превалюючі стани поляризації .................................................................... 101

3.3 Стани поляризації, що ортогоналізуються ................................................. 105

3.4 Розв’язок спектральної задачі ...................................................................... 112

3.4.1 Власні поляризації ................................................................................. 115

3.4.2 Власні числа ............................................................................................ 123

3.5 Еволюція стану поляризації світла .............................................................. 125

3.6 Розв’язок оберненої задачі ........................................................................... 130

3.7 Основні результати і висновки .................................................................... 134

ВИСНОВКИ ............................................................................................................. 136

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ............................................................... 137

ДОДАТОК А ............................................................................................................ 152

ДОДАТОК Б ............................................................................................................ 157

ДОДАТОК В ............................................................................................................ 161

4

ВСТУП

Поляризоване світло - потужний інструмент, що використовується при

дослідженнях у різних галузях науки та техніки [1-4]. Вивчення особливостей

взаємодії поляризованого світла з досліджуваним середовищем є одним з

основних джерел інформації про його поляризаційні властивості. Такі

визначальні риси поляриметричних методів досліджень як незбурюючий

характер, висока чутливість та можливість здійснення дистанційних досліджень

зумовили широке використання поляриметрії у медицині [5,6], біології [7,8],

астрофізиці [9,10], екології [11,12], тощо [13-30].

У випадку лінійної взаємодії, при визначеній довжині хвилі λ світла, для

опису поляризаційних властивостей середовища використовуються матричні

методи Джонса та Мюллера [31-37]. Актуальною задачею сучасної

поляриметрії є аналіз поляризаційних властивостей середовища, яке одночасно

характеризується декількома видами анізотропії [38-65]. У рамках матричних

методів Джонса та Мюллера існує два основних підходи для аналізу

поляризаційних властивостей таких середовищ. В першому з них [40-43]

середовище є послідовністю оптичних елементів, що характеризуються

базовими видами анізотропії: лінійними та циркулярними фазовою та

амплітудною анізотропіями. Даний підхід лежить в основі так званих

мультиплікативних моделей середовищ, оскільки послідовності елементів у

матричних методах Джонса та Мюллера є добутками їх матриць Джонса

(Мюллера). Всі існуючі на сьогодні мультиплікативні моделі базуються або на

теоремах еквівалентності (теореми еквівалентності Джонса [40,42], узагальнена

теорема еквівалентності [66] тощо), або на алгебраїчних теоремах розкладу

(теореми полярного розкладу [67-69], сингулярного розкладу [70,71] тощо). В

більшості сучасних поляриметричних робіт застосовуються саме

мультиплікативні моделі через їх природню орієнтацію на експериментальні

дослідження. В той же час важливою особливістю мультиплікативних моделей

5

є неоднозначність представлення ними поляризаційних характеристик

досліджуваного середовища [72], внаслідок некомутативності матриць Джонса

(Мюллера) базових видів анізотропії.

Другий підхід - однорідний - спирається на диференціальні матричні

методи Джонса та Мюллера [16,73-75]. У цьому випадку поляризаційні

властивості досліджуваного середовища є сумою відповідних диференціальних

матриць Джонса (Мюллера), що описують нескінченно тонкий шар

середовища. Для характеристики скінченних товщин необхідно проводити

інтегрування векторного рівняння переносу, що описує еволюцію стану

поляризації світла в анізотропному середовищі. Адитивність однорідного

підходу обумовлює однозначність опису поляризаційних властивостей

досліджуваних середовищ [76-82]. Однак кількість робіт, пов’язаних з

використанням такого підходу [83-94] порівняно з мультиплікативним, є значно

меншою через його непристосовність до безпосереднього аналізу

експериментальних даних.

Значний інтерес в сучасній поляриметрії становить клас середовищ

неоднорідних у поздовжньому напрямку, зокрема закручених [73]. Прикладом

таких середовищ є рідкі кристали: холестерики та кручені нематики. Вони

широко використовуються у виготовленні рідкокристалічних дисплеїв [95-98].

Незважаючи на наявність достатньо великої кількості робіт, питання

розповсюдження поляризованого світла в цьому класі середовищ на сьогодні є

недостатньо вивченим [99,100].

Таким чином, актуальність дисертаційної роботи полягає в тому, що в ній

на основі системного порівняльного аналізу існуючих поляриметричних

матричних моделей у випадку як однорідних, так і неоднорідних середовищ із

складною оптичною анізотропією досліджені питання, пов’язані з

однозначністю опису їх поляризаційних характеристик.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження,

які проведені в дисертаційній роботі, відповідають науковій тематиці кафедри

електрофізики і кафедри квантової радіофізики факультету радіофізики,

6

електроніки та комп’ютерних систем Київського національного університету

імені Тараса Шевченка і виконувались у рамках держбюджетної науководослідної теми НДР №11БФ052-04 “Дослідження ефектів взаємодії

електромагнітних та акустичних полів з впорядкованими,

наноструктурованими та біологічними системами для створення новітніх

технологій”.

Мета і задачі дослідження. Дослідити однозначність та адекватність

поляриметричних матричних моделей, що використовуються для опису

фізичних ефектів, які виникають при взаємодії поляризованого світла з

недеполяризуючими анізотропними середовищами.

Для досягнення поставленої мети в роботі розв’язувалися наступні задачі:

1. Аналіз умов, за яких дихроїчні та двопроменезаломлюючі властивості

недеполяризуючих середовищ адекватно описуються на основі існуючих

матричних моделей;

2. Встановлення аналітичного зв’язку між параметрами анізотропії

недеполяризуючих середовищ у рамках однорідної моделі, який

забезпечує ортогональність їх власних поляризацій;

3. Розв’язок векторного рівняння переносу для недеполяризуючих

середовищ з різними видами анізотропії;

4. Побудова однозначних розв’язків оберненої задачі поляриметрії для

величин амплітудної та фазової анізотропій недеполяризуючих

середовищ;

5. Порівняльний аналіз опису поляризаційних властивостей

недеполяризуючих середовищ у рамках розробленої та інших моделей.

Об’єкт дослідження - взаємодія поляризованого світла із однорідними і

неоднорідними недеполяризуючими середовищами із складною анізотропією.

Предмет дослідження – однозначна характеристика властивостей

середовищ зі складною анізотропією на основі матричних методів Джонса та

Мюллера, дослідження особливостей поляризаційних характеристик цих класів

середовищ для їх ідентифікації.

7

Методи дослідження. В роботі для теоретичного аналізу поляризаційних

характеристик недеполяризуючих середовищ, розв’язку оберненої задачі, а

також для порівняння однорідної та мультиплікативної моделей застосовується

підхід, заснований на диференціальних методах Джонса та Мюллера.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що в роботі:

1. Вперше в рамках однорідного підходу отримано явний вигляд

однозначної, узагальненої, інтегральної матричної моделі для класу

недеполяризуючих середовищ.

2. Вперше на основі однорідного підходу встановлено співвідношення між

параметрами анізотропії, що забезпечують ортогональність власних та

превалюючих поляризацій у недеполяризуючих середовищах.

3. Вперше встановлено класи середовищ, для яких обернена задача на

основі мультиплікативного підходу має однозначний розв’язок.

4. Вперше показано неоднозначність розв’язку оберненої задачі

поляриметрії в рамках однорідного підходу для випадку довільного

недеполяризуючого середовища.

5. Вперше досліджені фізичні ефекти, які виникають при розповсюдженні

поляризованого світла в неоднорідних закручених середовищах з

фазовою та амплітудною анізотропіями.

Практичне значення одержаних результатів. Отримані результати

можуть бути використані для аналізу анізотропії однорідних середовищ у

фундаментальних та прикладних поляриметричних дослідженнях у різних

діапазонах довжин хвиль, для вивчення еволюції стану поляризації світла при

його розповсюдженні в однорідних та закручених недеполяризуючих

середовищах.

На основі результатів роботи можуть бути розраховані та синтезовані нові

типи пристроїв із заданим законом перетворення стану поляризації світла,

зокрема оптичні поляриметричні затвори в системах з поляризаційною

розв’язкою каналів зв’язку. Також значний практичний інтерес становить

можливість розрахунку та експериментального моніторингу поляризаційних

8

характеристик рідких кристалів та інших типів неоднорідних закручених

середовищ, що застосовуються для створення різноманітних дисплеїв та

індикаторних пристроїв.

Матеріали дисертаційної роботи можуть бути використані на кафедрах

електрофізики і квантової радіофізики факультету радіофізики, електроніки та

комп’ютерних систем Київського національного університету імені Тараса

Шевченка в лекційних курсах оптична поляриметрія, поляризаційна матрична

оптика, основи радіолокації, а також під час виконання бакалаврських та

магістерських кваліфікаційних робіт.

Особистий внесок здобувача. В роботах [101,102] взято участь у

моделюванні, теоретичних розрахунках, обговоренні результатів і виступах на

конференціях, в роботах [72,103-105] взято участь у аналізі існуючих моделей

середовищ та розробці нової моделі, а також написанні статей і виступі на

конференції, в роботах [106-110] взято участь у розробці моделі, теоретичних

розрахунках, написання статей і виступі на конференції, в роботах [111-116]

здобувач брав участь у моделюванні поляризаційних властивостей однорідних

середовищ на основі однорідного підходу, теоретичних розрахунках, а також

обговоренні результатів і виступах на конференціях.

Достовірність результатів. Достовірність наукових результатів,

отриманих в роботі, підтверджується загальністю та адекватністю моделей

недеполяризуючих класів середовищ, що досліджуються, повнотою опису

поляризаційних явищ, що мають місце в таких середовищах, та відповідністю

результатам експериментальних досліджень.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідалися на таких міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях: X

International Young Scientists’ Conference on Applied Physics (2010, Київ,

Україна), VI International Conference “Electronics and Applied Physics” (2010,

Київ, Україна), Конференція молодих вчених з фізики напівпровідників

«Лашкарьовські читання 2011» (2011, Київ, Україна), Міжнародна науковопрактична конференція «напівпровідникові матеріали, інформаційні технології

9

та фотовольтаїка» (2011, Кременчук, Україна), XІ International Young Scientists’

Conference on Applied Physics (2011, Київ, Україна), The XIII Conference on

Electromagnetic & Light Scattering (2011, Taormina, Italy), V Українська наукова

конференція з фізики напівпровідників (2011, Ужгород, Україна), VII

International Conference “Electronics and Applied Physics” (2011, Київ, Україна),

II Всеукраїнська конференція молодих вчених «сучасне матеріалознавство:

матеріали і технології» (2011, Київ, Україна), Конференція молодих вчених з

фізики напівпровідників «Лашкарьовські читання 2012» (2012, Київ, Україна),

XІІ International Young Scientists’ Conference on Applied Physics (2012, Київ,

Україна), VIIІ International Conference “Electronics and Applied Physics” (2012,

Київ, Україна), Конференція молодих вчених з фізики напівпровідників

«Лашкарьовські читання 2013» (2013, Київ, Україна), XІІІ International Young

Scientists’ Conference on Applied Physics (2013, Київ, Україна), ІХ International

Conference “Electronics and Applied Physics” (2013, Київ, Україна), Конференція

молодих вчених з фізики напівпровідників «Лашкарьовські читання 2014»

(2014, Київ, Україна), XV International Young Scientists’ Conference on Applied

Physics (2014, Київ, Україна), Х International Conference “Electronics and Applied

Physics” (2014, Київ, Україна), ), XVI International Young Scientists’ Conference

on Applied Physics (2015, Київ, Україна).

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковано в 11 статтях у

фахових наукових вітчизняних та закордонних журналах, перелік яких

наведено в кінці роботи.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертація складається зі

вступу, трьох розділів основного тексту, висновків, списку використаних

джерел (151 посилання) і трьох додатків. Повний обсяг дисертаційної роботи

складає 173 сторінки, 47 ілюстрацій і 2 таблиці.

ВИСНОВКИ

Врамкаходнорідногопідходуотриманозагальнийаналітичнийвигляд

інтегральноїматриціМюллерадовільногонедеполяризуючогосередовищаяка

дозволяєоднозначнотаадекватнохарактеризуватийогополяризаційні

властивості

Продемонстрованощоанізотропнісередовищаврамкаходнорідного

підходухарактеризуютьсяортогональнимивласнимиполяризаціямилишеу

випадкуспівпадінняазимутіворієнтаціїдвопроменезаломленняідихроїзму

Показанощооберненазадачаполяриметріїмаєоднозначнийрозв’язок

длятакихкласівсередовищзоднимбазовимвидоманізотропіїзфазовоюта

амплітудноюциркулярнимианізотропіямизколінеарнимиабо

ортогональнимифазовоютаамплітудноюлінійнимианізотропіями

Теоретичнотаекспериментальнонаприкладікристалівα−та



продемонстрованощоіснуютькласисередовищуякихврамках

досліджуванихпідходівспівпадаютьлишевидианізотропіїУіншихвипадках

розв’язокоберненоїзадачінаосновімультиплікативногопідходувстановлює

тількиефективнізначенняпараметріванізотропії

Встановленощовзагальномувипадкурозв’язокоберненоїзадачіна

основімультиплікативногопідходуєнеоднозначним

Показанощополяризаційнівластивостінеоднорідних

недеполяризуючихсередовищнеможутьбутиописанінаосновілише

розв’язкуспектральноїзадачіЗокреманеобхіднийаналіздодатковихтипів

поляризаційвхідногосвітлаасамепревалюючихполяризаційтаполяризацій

щоортогоналізуютьсядосліджуванимсередовищем

Продемонстрованоможливістьвикористаннядиференціальногометоду

Мюллерадляекспериментальноїоцінкиполяризаційноїоднорідності

рідкокристалічнихфазовихпластинок