ФЕЛІНСЬКИЙ СТАНІСЛАВ ГЕОРГІЙОВИЧ. Назва дисертаційної роботи: "АНОМАЛЬНА ДИСПЕРСІЯ ТА ВІДБИТТЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ В ДІЕЛЕКТРИЧНИХ КРИСТАЛАХ"

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

імені ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

На правах рукопису

Фелінський Станіслав Георгійович

УДК 537.86

АНОМАЛЬНА ДИСПЕРСІЯ ТА ВІДБИТТЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ

ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ В ДІЕЛЕКТРИЧНИХ КРИСТАЛАХ

01.04.03 – радіофізика

Дисертація на здобуття наукового ступеня

кандидата фізико-математичних наук

Науковий керівник:

Коротков Павло Андрійович

доктор фізико-математичних наук,

професор

Київ – 2016

2

ЗМІСТ

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ..................................................................................... 4

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ................................................. 5

ВСТУП.................................................................................................................... 11

РОЗДІЛ 1. Основи загальної теорії, експеримент та методи аналізу

дисперсії електромагнітних хвиль в кристалах і метаматеріалах

(огляд літератури)...................................................................................... 14

1.1. Тензор комплексної діелектричної проникності та його властивості ........ 14

1.1.1 Тензор-функція діелектричної проникності як узагальнена

характеристика електромагнітних властивостей середовища ......... 15

1.1.2 Частотна і просторова дисперсії та магнітні властивості середовища........................................................................................................ 18

1.1.3 Тензор діелектричної непроникності .................................................. 18

1.1.4 Визначення тензора діелектричної проникності на комплексній

площині .................................................................................................. 19

1.1.5. Особливості частотної дисперсії в кристалооптиці та терагерцовому діапазоні........................................................................................ 23

1.2. Дисперсія діелектричної проникності та динаміка кристалічної гратки... 26

1.2.1 Квантові рівняння руху для визначення дисперсії діелектричної

проникності.................................................................................................... 26

1.2.2 Дисперсійна формула Куросави та співвідношення ЛіддейнаСакса-Теллера........................................................................................ 28

1.2.3 Особливості визначення дисперсійних параметрів за спектрами

комбінаційного розсіяння .................................................................... 29

1.3 Експериментальні дослідження та методи дисперсійного аналізу

діелектричної проникності............................................................................. 37

1.4 Особливості розповсюдження світла в середовищах з від’ємним

показником заломлення та метаматеріалах.................................................. 47

Висновки до розділу 1................................................................................... 52

РОЗДІЛ 2. Області від’ємної діелектричної проникності в кристалах з

одним полярним коливанням........................................................................ 53

2.1 Вплив згасання на дисперсію діелектричної проникності ...................... 53

2.2 Критичне згасання та критерій існування смуги частот з від’ємною

ДП в кристалі з одним полярним коливанням.......................................... 56

2.3 Звуження смуги частот з від’ємною діелектричною проникністю в

3

підкритичному режимі фононного згасання............................................. 59

2.4 Класифікація полярних коливань в кристалі за ступенем фононного

демпфування................................................................................................. 60

2.5 Особливості формування від’ємної ДП в кристалічних модифікаціях

нітриду бора та кристалі MnF2.................................................................... 62

2.6 Метод фазових портретів для аналізу ефектів аномальної дисперсії

та комплексного показника заломлення.................................................... 74

Висновки до розділу 2................................................................................... 82

РОЗДІЛ 3. Від’ємна діелектрична проникність та аномалії фотонфононної взаємодії в нецентросиметричних кристалах .......... 83

3.1 Методика відновлення дисперсії тензора діелектричної проникності

за спектрами КР............................................................................................ 83

3.2 Від’ємна діелектрична проникність та аномальна рефракція в

нелінійних кристалах LiTaO3, LiIO3 та LiNbO3 ......................................... 86

3.3 Анізотропія областей від’ємної діелектричної проникності та

аномалії показника заломлення в кристалах із складним фононним

спектром........................................................................................................ 99

3.4 Фотон-фононна взаємодія за умови аномальної рефракції та колапс

електромагнітної хвилі в області від’ємної діелектричної

проникності................................................................................................... 102

Висновки до розділу 3................................................................................... 106

РОЗДІЛ 4. Терагерцові аномалії за межами області від’ємної

діелектричної проникності в кристалах ..................................... 107

4.1 Виявлення терагерцових каналів аномально низького відбиття в

спектрах полярних кристалів...................................................................... 107

4.2 Моделювання параметрів каналу аномально низького відбиття

числовими методами.................................................................................... 109

4.3 Аналіз фізичних умов формування терагерцових каналів аномально

низького відбиття......................................................................................... 114

4.4 Частотна ширина АВК................................................................................. 121

4.5 Перспективи застосування АВК................................................................. 122

Висновки до розділу 4................................................................................... 128

Висновки ................................................................................................................. 129

Перелік посилань.................................................................................................... 131

4

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ:

 АВК – антивідбиваючі канали.

 ДА – дисперсійний аналіз;

 ДП – діелектрична проникність;

 ІЧ – інфрачервоний. Може бути в контексті з діапазон,

випромінювання тощо;

 КР - комбінаційне розсіяння;

 ЛСТ - Ліддейна-Сакса-Теллера співвідношення;

 НВЧ – надвисокі частоти;

 СКР - спонтанне комбінаційне розсіяння;

 T-L-розщеплення – смуга частот між частотами поперечних та

поздовжніх коливань;

 УФ - ультрафіолетовий. Може бути в контексті з діапазон,

випромінювання тощо;

 ФДТ - флуктуаційно-дисипативна теорема;

5

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність. Діелектричні та нелінійні властивості конденсованих

середовищ в терагерцовому діапазоні корінним чином відрізняються від

суміжних радіо- та оптичного діапазонів, які є більш освоєними частинами

електромагнітного спектра. Під впливом дипольно активних коливань молекул

в газі чи рідині або полярних фононів в кристалах з власними частотами в

кілька терагерц резонансний відгук середовища принципово змінює його

діелектричну проникність (ДП). Поблизу від резонансних частот уявна частина

ДП зростає на багато порядків. Одночасно дійсна частина набуває

знакозмінного характеру, її екстремальні значення змінюються в десятки разів,

нормальна дисперсія переходить в аномальну, а потім навпаки, в результаті

чого можуть утворюватися області з від’ємними значеннями ДП.

Вплив аномальної дисперсії на нелінійну сприйнятливість речовини

виявляється не менш радикальним. Наприклад, ряд найбільш поширених

електрооптичних матеріалів майже повністю втрачає ці свої властивості на

частотах вище резонансів. До того ж надмірне згасання електромагнітної хвилі

виключає їх застосування вже на частотах понад кілька сотень гігагерц. З

іншого боку, фізичними наслідками аномальної дисперсії, як показали наші

дослідження, є виникнення нових ефектів, серед яких екстремально низьке

відбиття випромінювання за смугою залишкових променів. Загалом створення

технології приладобудування для освоєння терагерцового діапазону вимагає

додаткових досліджень не тільки властивостей кристалічного середовища, але й

особливостей розповсюдження електромагнітного випромінювання в області

аномальної дисперсії.

Дослідження фундаментальних процесів взаємодії електромагнітного

випромінювання з кристалічним середовищем в області аномальної дисперсії,

зокрема фізичних умов утворення від’ємної ДП, особливо актуалізувалися в

останнє десятиріччя в зв’язку з проблемою синтезу метаматеріалів. В природніх

умовах від’ємну ДП, яка є необхідною для створення метаматеріалів, виявляли

експериментально протягом всієї понад вікової історії спектроскопічних

6

досліджень оптичних монокристалів [2]. Вони проводились методами

інфрачервоної (ІЧ) спектроскопії та за допомогою комбінаційного розсіяння

(КР) світла. Досить відмітити, що виявлені смуги залишкових променів,

фактичною причиною утворення яких є від’ємна ДП, вже багато десятиліть

застосовуються в техніці. В теорії поляритонів, особливо поверхневих, а також

при описанні кутової дисперсії анізотропних фононів від’ємна ДП виникає як

базове поняття. Однак, від загальноприйнятого в цій теорії наближення

відсутності згасання доводиться відмовитися при описанні ефектів, що

пов’язані з аномальною дисперсією. Кількісний аналіз фізичних умов

утворення від’ємної ДП, що є принциповим питанням для проблеми

метаматеріалів, вимагає застосування узагальнених підходів без використання

обмежень малості уявної частини ДП в традиційній теорії дисперсії. При

створенні метаматеріалів виникає низка нових прикладних проблем, серед яких

кількісне визначення реальної смуги частот з від’ємною ДП, комплексного

показника заломлення в області аномальної дисперсії та залежностей спектрів

відбиття від згасання полярних фононів.

Отже дослідження терагерцових аномалій при взаємодії електромагнітних

хвиль з кристалами є актуальними як для вирішення проблем синтезу

метаматеріалів, так і для розвитку нових технологій для освоєння

терагерцового діапазону електромагнітних хвиль.

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

виконана на кафедрі електрофізики Київського національного університету

імені Тараса Шевченко в рамках держбюджетної теми №11БФ052-04

«Дослідження ефектів взаємодії електромагнітних та акустичних полів з

впорядкованими, наноструктурованими та біологічними системами для

створення новітніх технологій» (номер державної реєстрації 0111U005265).

Мета і задачі досліджень. Мета дисертаційної роботи полягає в

дослідженні впливу аномальної дисперсії від терагерцових полярних коливань

кристала на умови розповсюдження електромагнітного випромінювання та

7

матеріальні параметри кристалічного середовища. Відповідно до поставленої

мети необхідно було вирішити такі задачі:

 розробка фізичних моделей, алгоритмів та програм відновлення

повного тензора діелектричної проникності за експериментальними

даними ІЧ та КР досліджень кристалів із складним фононним спектром;

 аналітичний аналіз фізичних умов утворення областей з від’ємною

діелектричною проникністю в кристалі з одним полярним коливанням

методами комп’ютерної алгебри;

 розробка узагальнених методів дослідження терагерцових аномалій

на основі фазових портретів комплексних функцій ДП та показника

заломлення в області від’ємної діелектричної проникності;

 вивчення мінімумів коефіцієнта відбиття в терагерцових спектрах

модельних кристалів та кількісний аналіз параметрів каналу із

екстремально низьким відбиттям електромагнітного випромінювання.

Об’єкт досліджень – полярні коливання кристалічної гратки

терагерцового діапазону частот як джерело формування діелектричних

властивостей кристалу.

Предмет досліджень – вплив аномальної дисперсії та згасання полярних

мод кристала в терагерцовому діапазоні частот на взаємодію з

електромагнітним випромінюванням, в тому числі на формування областей з

від’ємною діелектричною проникністю.

Методи досліджень. Дисперсійний аналіз експериментальних спектрів

відбиття в далекому ІЧ (терагерцовому) діапазоні, а також спектрів

спонтанного комбінаційного розсіяння полярних кристалів. Математичне

моделювання особливостей виникнення аномальної дисперсії, процесів

утворення областей з від’ємною діелектричною проникністю та екстремально

низького відбиття електромагнітного випромінювання в терагерцовому

діапазоні частот методами комп’ютерної алгебри.

Наукова новизна одержаних результатів. Комплексні дослідження

дисперсії ДП із врахування згасання призвели до наступних результатів:

8

1. Вперше отримано критерій існування області від’ємної ДП та вираз

для її реальної смуги частот у діелектричних кристалах. Показана застосовність

отриманих аналітичних виразів для аналізу фізичних умов існування від’ємної

ДП в кристалах зі складним фононним спектром. Базуючись на цих

співвідношеннях запропонована кількісна класифікація ступеня демпфування

полярного коливання.

2. Встановлено, що звуження області від’ємної ДП відносно T-L

розщеплення та зменшення абсолютної величини ε'min<0 стає помітним в

експерименті для Г/(ωL-ωT) близьких до одиниці. При Г/(ωL-ωT)>1 область

від’ємної ДП повністю зникає.

3. Запропонована методика фазових портретів комплексних функцій

ДП та показника заломлення для узагальненого аналізу терагерцових аномалій

в кристалах, зокрема для кількісного визначення області від’ємної ДП.

4. Показано, що області від’ємних значень ДП в досліджених

кристалах мають надкритичні значення коефіцієнта екстинкції, які приводять

до колапсу терагерцових хвиль.

5. Нами вперше встановлено, що при резонансній взаємодії

терагерцового випромінювання з полярними коливаннями в кристалічних

середовищах утворюються частотні області з аномально низькими

коефіцієнтами відбиття (R≤0,01%), тобто існують терагерцові антивідбиваючі

канали (АВК).

Практичне значення отриманих результатів. Фундаментальні

співвідношення, отримані в роботі, можуть бути використані для виявлення

нових властивостей кристалічного середовища, що виникають в терагерцовій

області електромагнітного спектра. Критерій від’ємної ДП є зручним

інструментом для експрес-аналізу параметрів кристалів в області аномальної

дисперсії за даними ІЧ відбиття, а у випадку нецентросиметричного

середовища  за спектрами СКР. Введені ступені демпфування можуть бути

покладені в основу класифікації полярних коливних мод в кристалах.

Дослідження АВК є фундаментом для створення нового типу концентраторів

9

теплового випромінювання, а в подальшому  для перетворювачів теплової

енергії в електричну.

Особистий внесок здобувача полягає у самостійному пошуку та аналізі

літературних джерел, проведенні математичних розрахунків та обробці

результатів. Автором отримані аналітичні вирази для критерію існування

від’ємної ДП та її частотної смуги, а також кількісні співвідношення для

основних параметрів каналів аномально низького відбиття. Постановку задач

досліджень і узагальнення теоретичних результатів проведено спільно з

науковим керівником проф. Коротковим П.А. В обговоренні результатів

досліджень брав участь д. ф.-м. н. Фелінський Г.С. Особисто автором

підготовлено окремі розділи у статтях [1-6], тезах доповідей [7-32]. Основні

наукові результати доповідалися особисто автором на наукових конференціях і

семінарах.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові та практичні

результати роботи оприлюднені та обговорені на таких конференціях: Х, XI,

XII, XIII Int. Young Scientists’ Conference on Applied Physics (Kyiv, 2010, 2011,

2012, 2013 рр.); VI, VII, VIII, IX Int. Conference “Electronics and Applied Physics”

(Kyiv, 2010, 2011, 2012, 2013 рр.); IV міжнародній науково-практичній

конференції «Матеріали електронної техніки та сучасні інформаційні

технології» (МЕТІТ-4) (Кременчук, 2010 р.); 10th

, 11th

, 12th Int. Conference “Laser

& Fiber-Optical Modeling” (LFNM 2010, 2011, 2013) (Sevastopol, 2010; Kharkov,

2011; Sudak, 2013); 2

nd IEEE Int. Workshop on THz Radiation: Basic Research &

Applications (TERA’ 2010) (Sevastopol, 2010; Kharkov, 2011); Конференціях

молодих вчених з фізики напівпровідників «Лашкарьовські читання – 2011,

2012» з міжнародною участю (Київ, 2011, 2012 р.); I міжнародній науковопрактичній конференції «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології

та фотовольтаїка» (НМІТФ-1). (Кременчук, 2011 р.) II Всеукраїнська

конференція молодих вчених «Сучасне матеріалознавство: матеріали та

технології» (Київ, 2011 р.); XX, XXI Int. School-Seminar of Galyna Puchkovska

“Spectroscopy Molecules & Crystals” (Beregove, Crimea, 2011, 2013); V

10

Українській науковій конференції з фізики напівпровідників (УНКФН-5)

(Ужгород, 2011 р.); 6

th Int. Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers,

(CAOL’ 2013) (Sudak, 2013); IEEE 35th Int. Conference on Electronics and

Nanotechnology (ELNANO) (Kyiv, 2015).

Публікації. Результати дисертації відображені у 32 публікаціях: 6 статей у

провідних фахових журналах, 26 тез доповідей на конференціях.

Структура і зміст роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох

розділів, висновків та списку використаних джерел. Вона містить 144 сторінки,

із них 132 сторінки основного тексту, 35 рис. і 10 табл. на окремих аркушах,

список використаних джерел з 132 найменувань на 14 сторінок.

Висновки

Врезультатівиконанняроботишляхомтеоретичногомоделюванняз

аналізоміснуючихекспериментальнихданихдослідженіфундаментальні

особливостіаномальноїдисперсіїтавідбиттяприрезонанснійвзаємодії

терагерцовоговипромінюваннязполярнимиколиваннямикристалуатакож

динамікавпливуфононногозгасаннянаформуванняобластейзвід’ємною

діелектричноюпроникністюДПтавиникненнячастотнихканалівзаномально

низькимвідбиттямелектромагнітниххвильЗокрема

Наведенотриеквівалентніформикритеріюіснуванняобластейз

від’ємноюДПАпробаціякритеріюпроведенашляхоманалізу

експериментальнихспектрівдалекогоінфрачервоноготерагерцового

відбиттяаувипадкахнецентросиметричнихкристалівспектрів

комбінаційногорозсіяннясвітлавтомучислідлясмугичастотТГц

см

Впершевстановленощообластьвід’ємноїДПвмежахсмуги

залишковихпроменівможливалишезаумовиякщосталафононного

згасанняГменшаніжрозщепленнявідповіднихфундаментальнихчастот

Встановленовизначальнийвпливзгасанняполярнихколиваньна

формуваннявід’ємноїДПнаосновіузагальненихметодівдослідження

терагерцовиханомалійзокремазвикористаннямфазовихпортретів

комплекснихфункційДПтапоказниказаломленняВпершеотримано

аналітичнівиразищовраховуютьфононнезгасаннядлякількісного

визначеннясмугичастотзвід’ємноюДПКореляціятеоретичних

співвідношеньзекспериментомдоведенашляхоманалізуспектроскопічних

данихвідбиттятерагерцовоговипромінюваннядлядипольноактивних

коливаньвтрьохкристалічнихмодифікаціяхкристаланітридубораатакож

дляколиванькристалапризмінітемпературивідКдоК

Запропонованометодикукласифікаціїполярнихколивнихмодза

ступенемдемпфуваннявкристалахякувикористанодляаналізузагалом

відомихфундаментальнихмодщовжевстановленіранішеметодами

спектроскопіїкомбінаційногорозсіяннясвітлавкристалахта



Показанощорозповсюдженнятерагерцовиххвильвцихкристалахможе

супроводжуватисянетількирізкимзростанняманізотропіїдіелектричних

властивостейайзнакозміннимхарактеромдляокремихкомпонентполяризації

хвиліприаномальнійдисперсії

Встановленощовобластіаномальноїдисперсіїдосліджених

кристалівособливопривід’ємнихзначенняхДПелектромагнітнахвиля

втрачаєможливістьдлярозповсюдженняаперіодичнозгасаєзарахунок

великогокоефіцієнтаекстинкціїівиявляєтьсялокалізованоювприповерхневій

областікристалащоменшазадовжинухвилізовнішньоговипромінюванняВ

більшостікристалівколапселектромагнітноїхвилімаємісцеусмузічастотщо

перевищуєобластьвід’ємнихзначеньДП

Визначеночастотніобластізаномальнонизькимикоефіцієнтами

відбиттятерагерцовоговипромінюванняНаосновідвохзапропонованих

моделейякідоповнюютьоднаіншудлярезонансноївзаємодіїтерагерцових

хвильзполярнимиколиваннямивкристалічнихсередовищахпоказанощо

коефіцієнтивідбиття≤уцілковитійвідповідностідо

експериментальнихспектріввідбиттявкількохкристалах