

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

ФЕЛІНСЬКИЙ СТАНІСЛАВ ГЕОРГІЙОВИЧ

УДК 537.86

**АНОМАЛЬНА ДИСПЕРСІЯ ТА ВІДБИТТЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ
ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ В ДІЕЛЕКТРИЧНИХ КРИСТАЛАХ**

01.04.03 – радіофізика

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електрофізики факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка Міністерства освіти і науки України, м. Київ

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
Коротков Павло Андрійович,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
професор кафедри медичної радіофізики

Офіційні опоненти: член-кореспондент НАН України,
доктор фізико-математичних наук, професор,
Тарапов Сергій Іванович,
Інститут радіофізики і електроніки імені О.Я.Усикова,
завідувач відділом радіоспектроскопії;

кандидат фізико-математичних наук, доцент,
Андрєєв Михайло Вікторович,
Дніпропетровський національний університет імені Олеся
Гончара МОН України;

Захист відбудеться “26” вересня 2016 р. о 15⁰⁰ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.001.31 Київського національного університету імені Тараса Шевченка за адресою: 03127, м. Київ, просп. Глушкова 4г, факультет радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем, ауд. 46.

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці ім. М. Максимовича Київського національного університету імені Тараса Шевченка за адресою: 01033, м. Київ, вул. Володимирська 58.

Автореферат розісланий “15” липня 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради Д 26.001.31
доктор фізико-математичних наук, професор

Мартиш Є.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. 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 сприйнятливості 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 досліджень оптичних монокристалів. 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 Шевченка 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 дослідження. Мета дисертаційної роботи полягає в дослідженні впливу аномальної дисперсії від терагерцових полярних коливань кристала на умови розповсюдження електромагнітного випромінювання та 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 ґратки 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 дослідження: 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:

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 $\varepsilon'_{min} < 0$ стає помітним в експерименті для $\Gamma/(\omega_L - \omega_T)$ близьких до одиниці. При $\Gamma/(\omega_L - \omega_T) > 1$ 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 ($R \leq 0,01\%$), тобто існують терагерцові антивідбиваючі канали (АВК).

Практичне значення одержаних 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 ГЧ 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 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: X, XI, XII, XIII Int. Young Scientists' Conference on Applied Physics (Kyiv, 2010, 2011, 2012, 2013 pp.); VI, VII, VIII, IX Int. Conference "Electronics and Applied Physics" (Kyiv, 2010, 2011, 2012, 2013 pp.); IV міжнародній науково-практичній конференції «Матеріали електронної

техніки та сучасні інформаційні технології» (METIT-4) (Кременчук, 2010 р.); 10th, 11th, 12th Int. Conference “Laser & Fiber-Optical Modeling” (LFNM 2010, 2011, 2013) (Sevastopol, 2010; Kharkov, 2011; Sudak, 2013); 2nd 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 науково-практичній 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 Українській науковій конференції з фізики напівпровідників (УНКФН-5) (Ужгород, 2011 р.); 6th 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 [1-6], 26 тез доповідей на конференціях [7-32].

Структура та обсяг дисертаційної 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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У *вступі* розглядається принципове значення згасання полярних коливань для аналізу терагерцових аномалій. На основі цього обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і задачі дослідження, визначено об’єкт, предмет та методи дослідження, що використовувались в роботі, викладено наукову новизну та практичне значення результатів дослідження.

У *першому розділі*, що є оглядовим, розглядаються основи загальної теорії, експеримент та методи аналізу дисперсії електромагнітних хвиль в кристалах і метаматеріалах. Тензор-функція ДП розглядається як узагальнена характеристика електромагнітних властивостей середовища для аналізу особливостей частотної дисперсії в кристалооптиці та терагерцовому діапазоні. Джерела дисперсії діелектричної проникності проаналізовані з найбільш загальних позицій динаміки кристалічної ґратки, як за квантового, так і класичного підходів. Наведені основні методики експериментальних досліджень, основи методів дисперсійного аналізу ДП, а також особливості визначення дисперсійних параметрів за спектрами КР. Розділ завершує виклад особливостей розповсюдження світла в середовищах з від’ємним показником заломлення та метаматеріалах. Наведені дані складають основу для проведення оригінальних обчислень, визначення області їх застосовності шляхом аналізу зроблених наближень, а також для обробки наявних експериментальних даних.

У *другому розділі* розглянуті оригінальні результати дослідження області від’ємної діелектричної проникності в кристалах з одним полярним коливанням.

Для аналізу впливу фононного згасання Γ на дисперсію діелектричної проникності та отримання аналітичних виразів для критерію існування областей від'ємної ДП розглянутий випадок однієї коливної моди в ізотропному кристалі, коли $\varepsilon_{ij}(\omega) = \varepsilon(\omega)\delta_{ij}$. Тоді загальний вираз для комплексного тензора ДП зводиться до співвідношення:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon'(\omega) + i\varepsilon''(\omega) = \varepsilon^\infty + \frac{S\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\Gamma}, \quad (1)$$

де S , $\omega_0 = \omega_T$ та Γ – відповідно сила осцилятора, частота поперечного фонона та стала згасання полярного коливання; ε^∞ – значення тензора ДП при $\omega \rightarrow \infty$. Аналіз виразу (1) на екстремуми, при умові, що діелектрична проникність має бути менша за 0, дозволяє отримати три форми критерію існування від'ємної ДП.

Перша форма:

$$\Gamma < \omega_T \left(\sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon^\infty}} - 1 \right), \quad (2)$$

яка в межах одноосциляторної моделі кристалу дає досить простий кількісний критерій існування смуги частот з від'ємною ДП. Він заснований на співвідношенні сталої згасання фонона з частотою ω_T до таких матеріальних параметрів кристалу як $\varepsilon_0 = \varepsilon(0)$ та ε^∞ .

Нерівність (2) визначає умову існування від'ємної ДП для кристала с одним коливанням. Оскільки $S = \varepsilon_0 - \varepsilon^\infty$, то (2) можна представити в еквівалентній формі через силу осцилятора S :

$$S > \varepsilon^\infty \frac{\Gamma}{\omega_T} \left(\frac{\Gamma}{\omega_T} + 2 \right). \quad (3)$$

Це друга форма нашого критерію – для сили осцилятора S , яку виражено через відносне згасання фононів Γ/ω_T . Нерівність (3) дає нижню межу для сили осцилятора полярного коливання, яке може утворити від'ємну ДП. Нарешті, підстановка співвідношення ЛСТ у вираз (2), приводить до ще однієї альтернативної форми критерію:

$$\Gamma < \omega_L - \omega_T \quad \text{або} \quad \frac{\Gamma}{\omega_L - \omega_T} < 1. \quad (4)$$

Той факт, що область від'ємної діелектричної проникності існує доки значення сталої згасання фонона не перевищує Т-Л розщеплення для цього фонона є безпосереднім наслідком (4).

Отже, згідно з (2) – (4) ми визначаємо критичне згасання Γ_{cr} , яке відповідає верхній границі фононного демпфування і обмежує область існування від'ємної ДП у кристалі:

$$\frac{\Gamma_{cr}}{\omega_T} = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon^\infty}} - 1 = \frac{\omega_L}{\omega_T} - 1 \quad \text{або} \quad \Gamma_{cr} = \omega_L - \omega_T. \quad (5)$$

При $\Gamma < \Gamma_{cr}$ навколо мінімуму ДП утворюється певна смуга частот із від'ємними

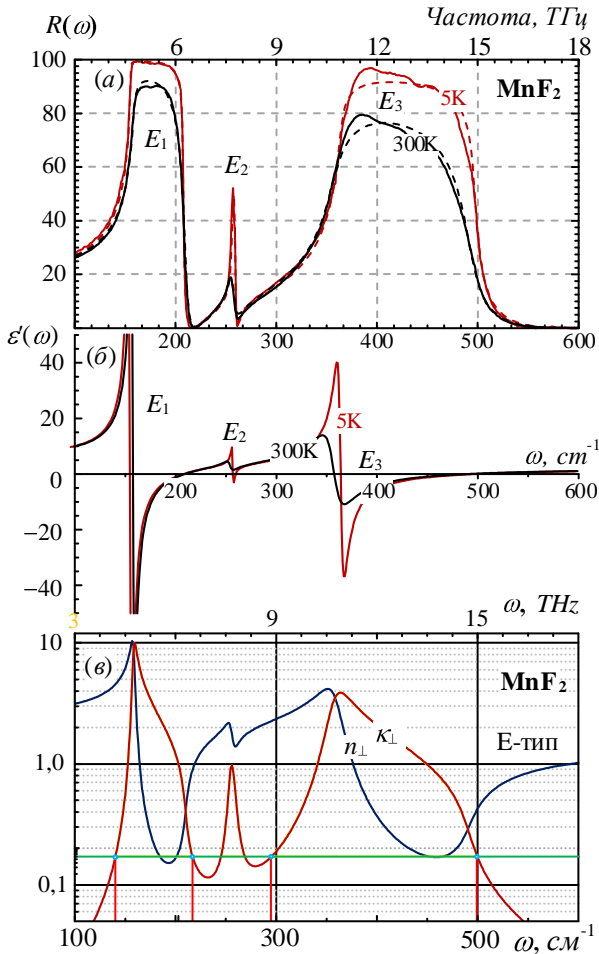


Рис. 1 а – експериментальні (суцільна лінія) та розрахункові (пунктир) спектри відбиття; б – дисперсія дійсної частини ДП; в – дисперсія показника заломлення n_{\perp} та коефіцієнта екстинкції κ_{\perp} в перпендикулярній поляризації падаючого випромінювання на кристал MnF_2 для двох температур 5К та 300К.

значеннями ДП в межах Т-Л розщеплення частот для цього коливання. І навпаки, при $\Gamma > \Gamma_{cr}$ функція $\epsilon'(\omega)$ залишається додатною, в тому числі і в смузі залишкових променів (Т-Л).

Нерівності (3) – (5) являють собою три еквівалентні форми кількісного критерію існування від'ємної ДП в кристалах в залежності від ступеню демпфування коливних мод. Для ізольованих коливань,

Таблиця 1. Спектроскопічні параметри та нормоване згасання фононних мод у кристалі MnF_2 [110]

Тип	ω_T , cm^{-1}	Γ , cm^{-1}	$\frac{\Gamma}{\omega_L - \omega_T}$	ϵ_{\min}
1	2	4	6	7
$T=300\text{K}$ ($\epsilon_p^{\infty} = 2.25$; $\epsilon_{\perp}^{\infty} = 2.16$)				
A_1	289.6	16.01	0.08	-33,0
E_1	158.5	3.48	0.07	-75,9
E_2	255.1	6.88	1.92	+1,5
E_3	357.9	21.70	0.16	-10,8
$T=5\text{K}$ ($\epsilon_p^{\infty} = 2.25$; $\epsilon_{\perp}^{\infty} = 2.16$)				
A_1	295.5	4.37	0.02	-127
E_1	158.4	0.25	0.004	-445
E_2	259.8	1.56	0.42	-3,0
E_3	367.0	7.00	0.05	-36,8

що видно на прикладі кристалу MnF_2 (Рис. 1 та Таблиця 1), критерій в формах (4) и (5) виявляється застосовним у кристалах із складним спектром, виходячи за рамки початкової одноосциляторної моделі.

В підкритичному режимі фононного згасання, тобто при $\Gamma < \Gamma_{cr}$, зі збільшенням сталої згасання область від'ємної ДП звужується відносно Т-Л розщеплення аж до повного її зникнення при $\Gamma = \Gamma_{cr}$. Тому для кількісного визначення частотної смуги від'ємної ДП доцільно знайти нулі функції $\epsilon'(\omega)$ в аналітичному вигляді. Саме аналітичний вираз для нулів функції $\epsilon'(\omega)$, які залежатимуть від згасання Γ , дає можливість обчислити смугу частот з від'ємною діелектричною проникністю та відслідкувати її звуження під впливом змін сталої згасання Γ .

Ми ввели позначення частот: нехай, ω_{-} – це частота при якій ДП починає приймати від'ємні значення, а ω_{+} – частота при якій ДП виходить з від'ємної області. Тоді:

$$\omega_{\pm} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\omega_L^2 + \omega_T^2 - \Gamma^2 \pm \sqrt{\omega_L^2 + \omega_T^2 - \Gamma^2}^2 - 4\omega_L^2\omega_T^2 \right)^{1/2}. \quad (6)$$

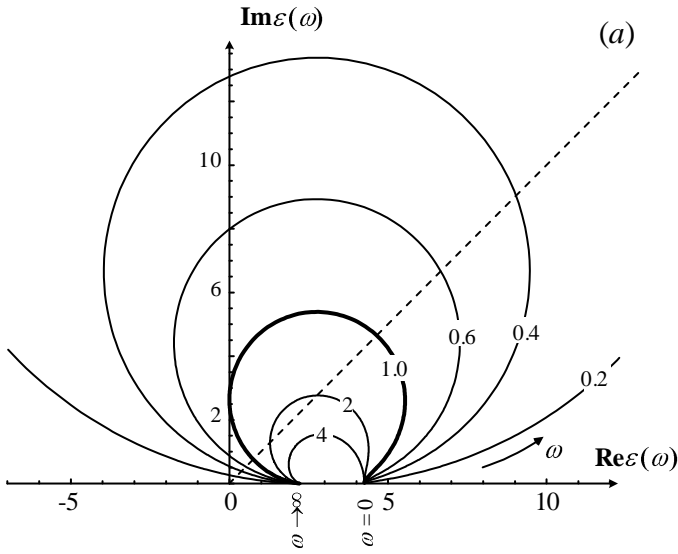


Рис. 2. Фазовий портрет комплексної діелектричної проникності кристала з одним полярним коливанням для різних значень нормованого фононного згасання.

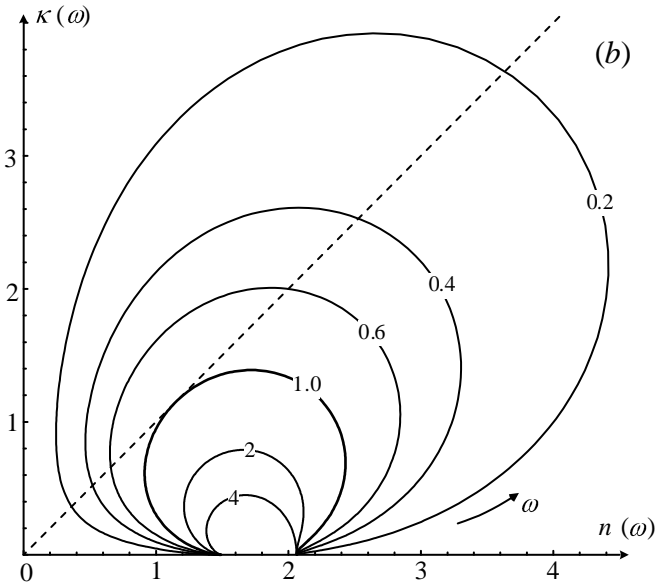


Рис. 3. Фазовий портрет для комплексного показника заломлення для тих же значень нормованого фононного згасання, як і для ДП на рис.2.

Якщо у (6) покласти $\Gamma=0$, то отримаємо: $\omega_- = \omega_T$, а $\omega_+ = \omega_L$.

Нехай $\Delta\omega = \omega_+ - \omega_-$, реальна смуга частот з від'ємною ДП. Явний вираз для $\Delta\omega$ легко знайти за допомогою співвідношень (6), отже, маємо:

$$\Delta\omega = \omega_L - \omega_T \sqrt{1 - \left(\frac{\Gamma}{\omega_L - \omega_T} \right)^2}. \quad (7)$$

Співвідношення (7) описує процес звуження смуги частот з від'ємною діелектричною проникністю в підкритичному режимі фононного згасання при $\Gamma < \Gamma_{cr}$. Додатне дійсне значення кореня в (7) відповідає реальній смузі частот з від'ємною ДП при $\Gamma < \Gamma_{cr} = \omega_L - \omega_T$, причому $\Delta\omega = 0$, якщо $\Gamma = \Gamma_{cr}$. Загальний вираз (7) із зменшенням Γ , при граничному переході $\Gamma \rightarrow 0$, дає ідеальний випадок відсутності згасання, оскільки якщо $\Gamma=0$, то $\Delta\omega = \omega_L - \omega_T$.

Метод фазового портрету дозволяє зробити узагальнений аналіз впливу згасання на аномальну дисперсію діелектричних та оптичних властивостей кристалу. На рис.2 та рис.3 наведені фазові портрети комплексної діелектричної проникності та комплексного показника заломлення кристала з одним полярним коливанням для різних значень нормованого фононного згасання. Результати застосування цього методу для двох напрямів поляризації падаючого випромінювання

в кристалі MnF_2 ми наводимо відповідно на рис.4 та рис.5, де представлені дисперсійні залежності (а) обох частин комплексного показника заломлення та (б) – фазові портрети для діапазону температур від 5К до 300К. Фазові портрети на цих рисунках зображені тонованими областями між граничними траєкторіями відповідно для 5К та 300К. Дисперсійні залежності наводяться для визначення частотного положення значень n і κ на фазовій траєкторії.

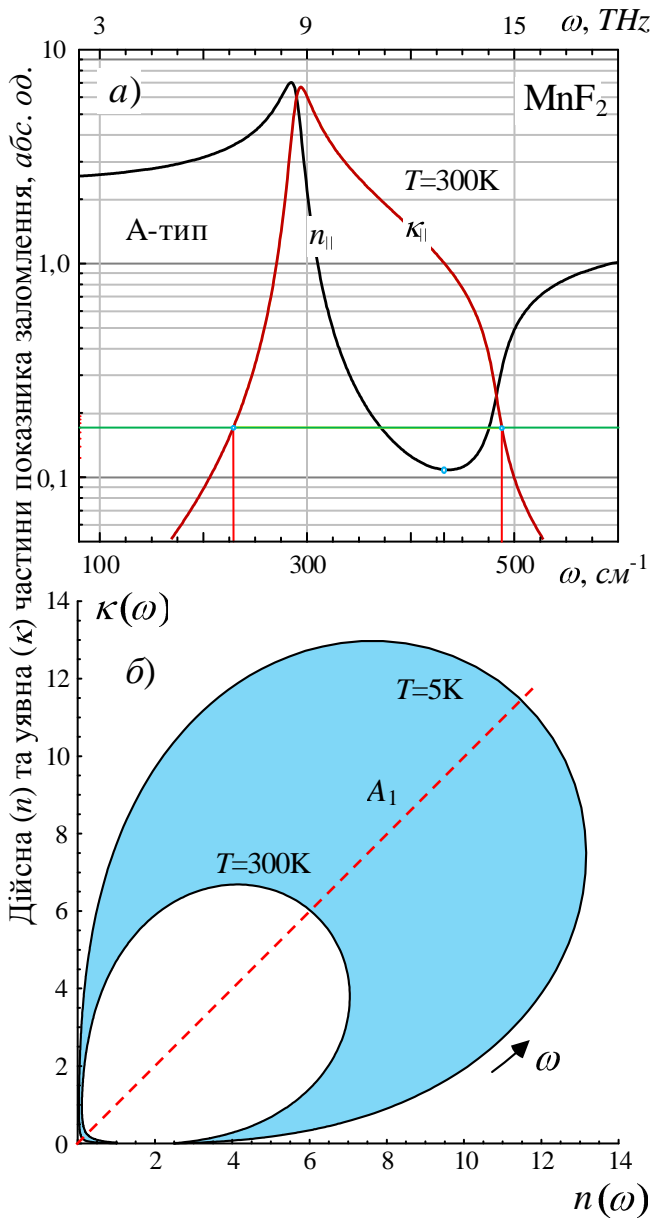


Рис. 4. Дисперсійні залежності (а) обох частин комплексного показника заломлення у паралельній поляризації (фонон А-типу) у MnF_2 та (б) – відповідний фазовий портрет для температур 5К та 300К.

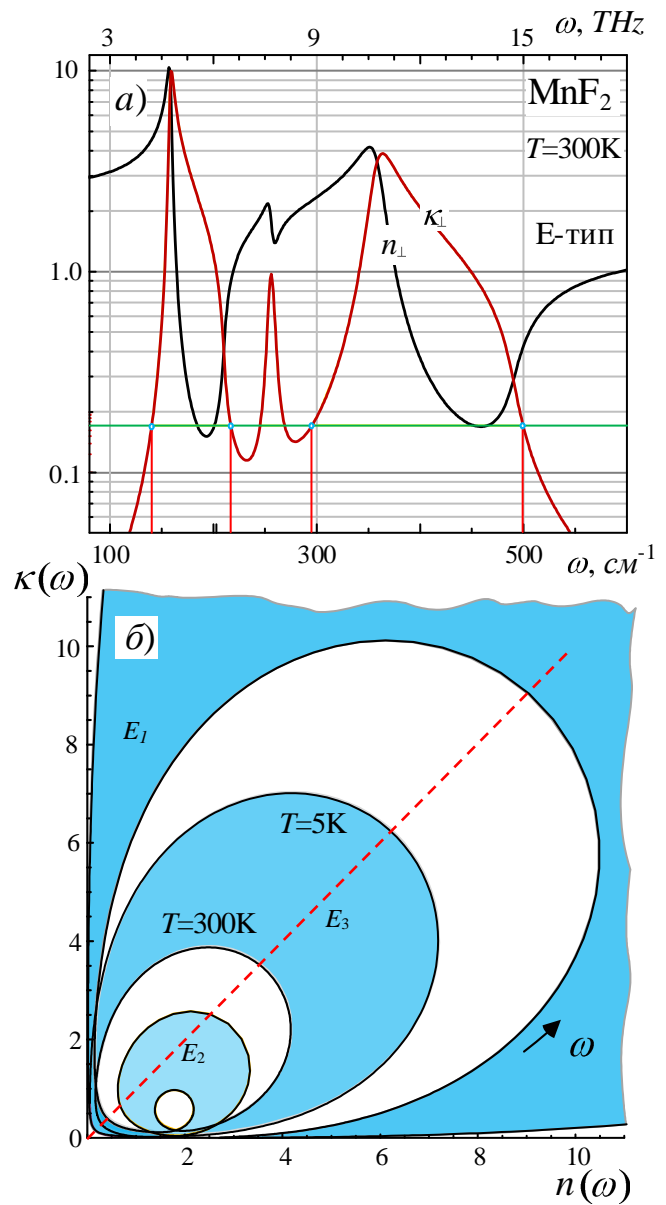


Рис. 5. Дисперсійні залежності (а) обох частин комплексного показника заломлення у перпендикулярній поляризації (фонон Е-типу) у MnF_2 та (б) – відповідний фазовий портрет для температур 5К та 300К.

Відповідність наведених теоретичних співвідношень з експериментом доведена шляхом аналізу спектроскопічних даних відбиття терагерцового випромінювання для 7 дипольно-активних коливань в трьох кристалічних модифікаціях кристала нітриду бора, а також для 4 коливань кристала MnF_2 при зміні температури від 5К до 300К.

У *третьому розділі* наведені результати кількісного аналізу областей від'ємної діелектричної проникності за експериментальними даними спектрів КР та аномалій фотон-фононної взаємодії в нецентросиметричних кристалах LiTaO_3 , LiIO_3 та LiNbO_3 .

Для LiTaO_3 коливання A_1 і A_2 мають досить «глибокі» області від'ємної ДП (Рис. 6.): $\varepsilon'_{min} = -119$ і $\varepsilon'_{min} = -40$ відповідно, що за абсолютною величиною перевищує значення ДП на низьких ($\varepsilon_0 = 30,24$) та високих частотах ($\varepsilon^\infty = 4,15$). Вони утворюють спільну область від'ємної ДП від 6,06 до 10,39 ТГц.

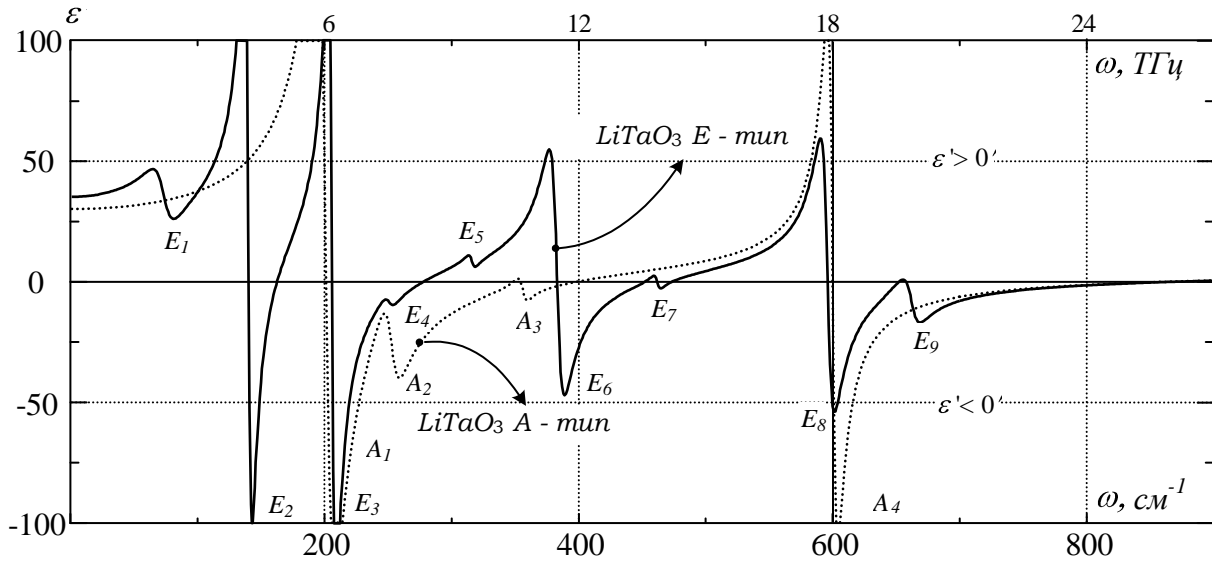


Рис. 6. Дисперсійна залежність дійсної частини ДП для кристалу LiTaO_3 для паралельної (A_1 – тип, точкова лінія) і перпендикулярної (E – тип, суцільна лінія) поляризацій.

Реальні частотні області від'ємних значень ДП $\Delta\omega$, які обраховані за (7), для всіх коливань кристалу LiTaO_3 (A_1 – тип), є дуже близькими до T-L розщеплення за рахунок набагато меншого за одиницю відносного згасання. Оскільки вираз (7) було виведено для одноосциляторної моделі кристалу, то для коливань із спільними областями від'ємної ДП співвідношення (7) може призводити до помітних похибок. Характерним прикладом такої ситуації є задемпфовані моди E_3 та E_4 кристалу LiTaO_3 перпендикулярної поляризації. Ці коливання мають спільну область від'ємної ДП, проте, кількісні дані вказують на розділення смуг від'ємної ДП для коливань E_3 та E_4 інтервалом додатної ДП з шириною 0.12 ТГц. Точне визначення смуги частот, в якій ДП набуває від'ємних значень для випадку злиття областей можна обрахувати, скориставшись виразами (6), відповідно визначивши ω_- для першого коливання та ω_+ для останнього коливань.

Відсутність областей з від'ємною ДП для $\omega_T = 2.22$ ТГц та $\omega_T = 9.48$ ТГц перпендикулярної поляризації (коливання E_1 і E_5) також відповідає критерію (5), оскільки ці моди є гіпердемпфованими. В цьому випадку співвідношення (5) повертає комплексні корені, що є цілком природнім, оскільки дисперсійна залежність дійсної частини ДП не перетинає нуль. Відповідно до (5) всі інші фонові коливання мають область від'ємної ДП.

В низькочастотній області 2.1-5.1 ТГц A_1 – тип немає жодного фонові коливання, на відміну від E – типу, що має два коливання одне з яких (E_2) досягає значних від'ємних значень ($\varepsilon'_{min} = -101$).

Дисперсійні залежності дійсної та уявної частин показника заломлення кристалу LiTaO_3 для паралельної і перпендикулярної поляризацій представлені нами на рис. 7. Слід відмітити, що в області аномальної дисперсії дійсна частина

показника заломлення може досягати значень менших за одиницю, що з точки зору класичної електродинаміки формально вказує на те, що фазова швидкість хвилі перевищує швидкість світла у вакуумі.

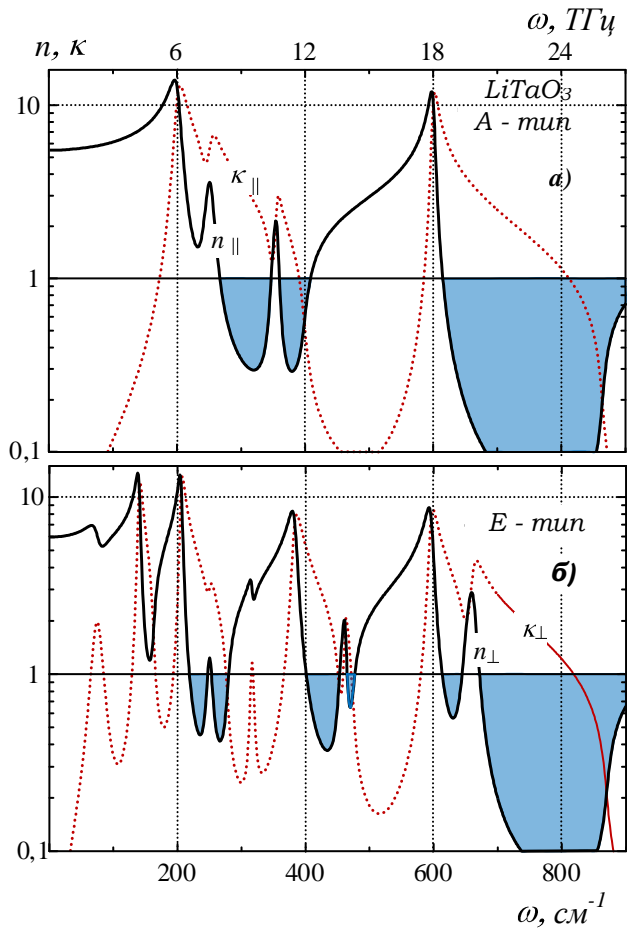


Рис. 7. Дисперсійна залежність дійсної (суцільна лінія) та уявної (точкова лінія) частини показника заломлення кристалу LiTaO_3 для паралельної (A_1 – тип, а) і перпендикулярної (E – тип), б) поляризацій.

зростанням анізотропії діелектричних властивостей, а й знакозмінним характером для окремих компонент поляризації хвилі при аномальній дисперсії.

При аналізі нормальної та аномальної дисперсії обох частин комплексного показника заломлення ми звернули увагу на дві особливості, що характерні для всіх досліджуваних кристалів в області аномальної дисперсії.

По-перше, для всіх кристалів поблизу власних частот поперечних фононів має місце гігантське зростання коефіцієнта екстинкції – на багато порядків у порівнянні з областями прозорості. В цих випадках коефіцієнт поглинання не тільки досягає значень, які зрівнюються за величиною з n , але $\kappa > n$ в більшій частині області аномальної дисперсії та смуги частот від’ємної ДП. По-друге, виявляється, що аномальна дисперсія показника заломлення знижує його до значень $0 < n < 1$ за наявності від’ємної ДП, однак завжди залишає його на рівні $n > 1$ при відсутності від’ємної ДП.

В результаті, розподіл поля становиться аперіодичним, а не хвильовим процесом, який жорстко локалізований поблизу від поверхні розділу. Наші

Аналогічний детальний аналіз областей від’ємної ДП проведений нами для кристалів LiIO_3 та LiNbO_3 . Всі ці кристали мають яскраво виражену анізотропію діелектричних властивостей, яка багатократно зростає в області аномальної дисперсії. Із порівняння дисперсійних залежностей ДП в кристалі LiIO_3 із відповідними кривими для структурно ізоморфних кристалів LiNbO_3 та LiTaO_3 безпосередньо видно, що анізотропія діелектричних властивостей кристала формується головним чином структурою елементарної комірки, а саме симетрією розташування атомів в середині цієї комірки. При цьому хімічний склад відіграє набагато меншу роль.

Отже методика класифікації полярних коливних мод за ступенем демпфування в кристалах була апробована нами шляхом аналізу загалом 34 відомих фундаментальних мод, які проявляються у спектрах комбінаційного розсіяння світла в кристалах LiNbO_3 , LiTaO_3 та LiIO_3 . Показано, що розповсюдження терагерцових хвиль в цих кристалах може супроводжуватися не тільки різким

розрахунки показують, що в більшості кристалів колапс електромагнітної хвилі буде мати місце у смузі частот, що перевищує область від'ємних значень ДП.

Четвертий розділ роботи присвячено терагерцовим аномаліям, що знаходяться за межами області від'ємної діелектричної проникності.

У цьому розділі наводяться результати наших досліджень мінімумів відбиття терагерцового (дальнього ІЧ) випромінювання, що спостерігаються експериментально поза межами Т-Л розщеплення частот в цілому ряді кристалічних середовищ, а також аналізуються фізичні умови для практично повного зникнення відбиття електромагнітної хвилі від поверхні розділу з кристалом.

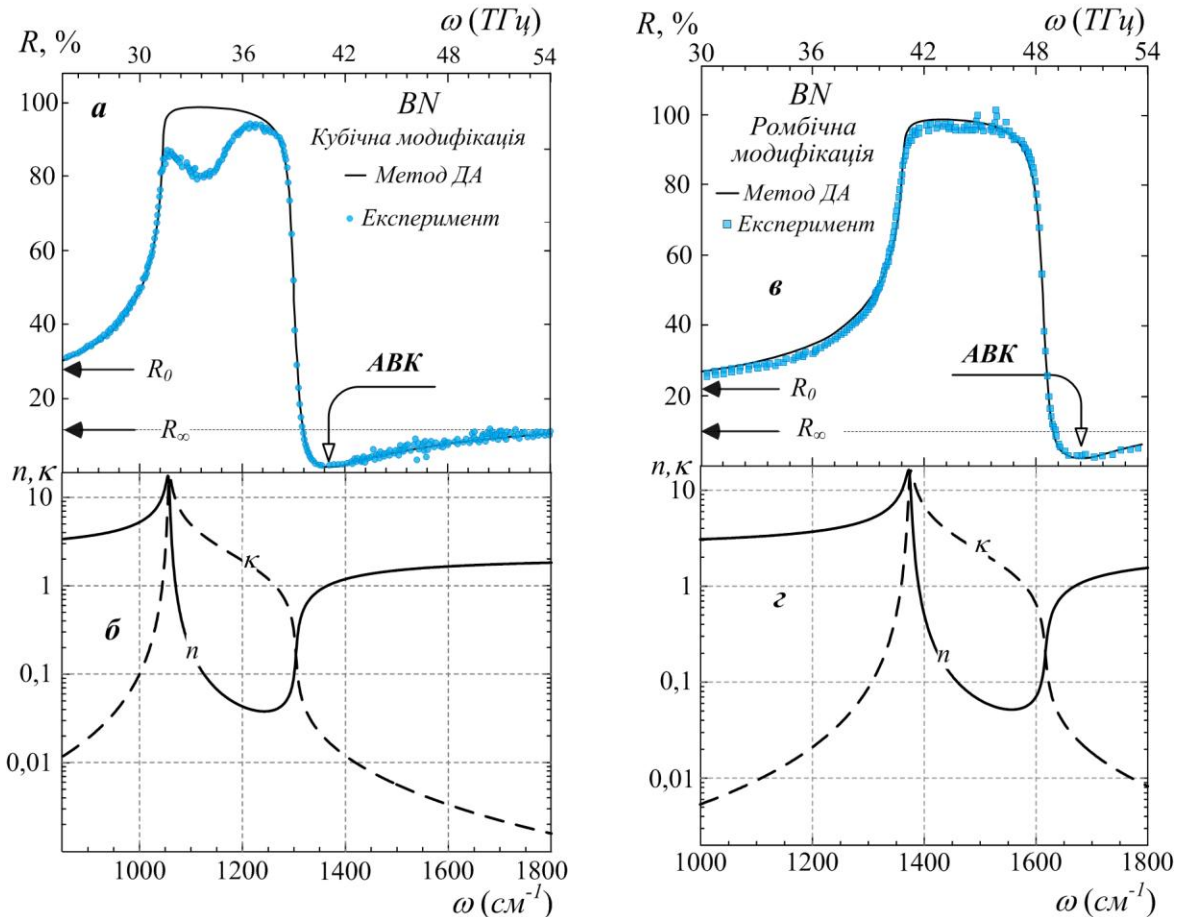


Рис. 8. Формування АВК в кубічній і ромбічній модифікаціях кристала нітриду бору: (а, в) спектри відбиття; (б, г) - залежності від частоти дійсної $n(\omega)$ (пунктир) та уявної $\kappa(\omega)$ (суцільна лінія) частин комплексного показника заломлення.

Традиційно, обробку спектрів відбиття кристалів у далекій інфрачервоній (зокрема в терагерцовій) області зазвичай обмежували аналізом параметрів полярних коливань, які утворюються поблизу піків відбиття і до наших досліджень не звертали належної уваги на мінімуми відбиття. Тим більше, що ці провали у спектрі часто заховані шумами спектрального обладнання.

Однак, навіть поверхневий аналіз спектрів відбиття великого числа реальних кристалів в терагерцовому діапазоні дозволяє виявити специфічні вузькі смуги частот з аномально низьким коефіцієнтом відбиття R . Зокрема вигляд анти відбиваючих каналів (АВК) в кубічній і ромбічній модифікаціях кристала нітриду бору показано на Рис. 8.

Спираючись на дисперсійний аналіз, ми отримали аналітичні залежності основних характеристик АВК (R_{min} та ω_{min}) від матеріальних параметрів кристалу, що має одне коливання. Розглянуто дві моделі середовища:

- ідеальна, або випадок відсутності згасання ($\Gamma = 0$);
- реальна, або випадок не нульового згасання ($\Gamma \neq 0$).

Для ідеальної моделі частота мінімуму каналу обчислюється виразом

$$\omega_{min} = \omega_T \sqrt{1 + \frac{S}{\varepsilon_\infty - 1}}. \quad (8)$$

В свою чергу коефіцієнт відбиття на цій частоті дорівнює нулю

$$R_{min} = R(\omega_{min}) = 0. \quad (9)$$

Отже, в околі окремого полярного коливання довільного кристалічного середовища при відсутності фононного згасання існує частота, на якій кристал зовсім не відбиває падаючого випромінювання. Однак це не означає, що середовище стає абсолютно невидимим, оскільки кристал залишається непрозорим. Тому неможливо спрогнозувати, що знаходиться за кристалом. Навпаки, на частоті мінімуму, образно кажучи, середовище поводить себе як „чорна дірка”, тобто все електромагнітне випромінювання, що падає на кристал незворотно пропадає у ньому.

Для реального випадку не нульового згасання, параметри АВК обчислюються наступними виразами

$$\omega_{min} = \sqrt{\frac{\Gamma^2(1 - \varepsilon^\infty) + (S + 2\varepsilon^\infty - 2)\omega_T^2 + \sqrt{\Gamma^4(\varepsilon^\infty - 1)^2 - 2\Gamma^2(\varepsilon^\infty - 1)(S + 2\varepsilon^\infty - 2)\omega_T^2 + S^2\omega_T^4}}{2(\varepsilon^\infty - 1)}} \quad (10)$$

та

$$R_{min} = \frac{\Gamma(\varepsilon^\infty - 1)\omega_{min} - D}{\Gamma(\varepsilon^\infty - 1)\omega_{min} + D}, \quad (11)$$

де

$$D = \sqrt{2}(\omega_{min}^2 - \omega_T^2) \sqrt{\sqrt{\frac{\Gamma^2(2 - \varepsilon^\infty)\varepsilon^\infty + S^2\omega_T^2 - S(\varepsilon^\infty - 1)(\Gamma^2 + \omega_{min}^2 - \omega_T^2)}{\Gamma^2}} - 1}.$$

В цьому випадку мінімальне значення коефіцієнту відбиття не є нульовим, а має скінченне значення, хоча і дуже мале.

Мінімальне відбиття може зменшуватися на кілька порядків у порівнянні з нерезонансними областями, практично до повного зникнення відбиття ($R < 0,01\%$). Головною особливістю нульового відбиття є зсув частоти АВК вгору відносно як ω_T так і ω_L частот, тобто за межі області існування від’ємної діелектричної проникності. Також показано, що в області АВК коефіцієнт екстинції різко падає, що дозволяє поширення біжучих електромагнітних хвиль, здатних переносити енергію вглиб кристала.

Шириною АВК ми назвали діапазон частот в якому коефіцієнт відбиття менший певного граничного значення R_{lim} . Нами встановлено, що нерівність $R < R_{lim}$ задовольняється для частот $\omega \in [\omega_l, \omega_r]$, які мають вигляд:

$$\omega_{r,l} = \omega_T \sqrt{\frac{\sqrt{R_{lim} \pm 1}^4 - \varepsilon_0 (1 - R_{lim})^2}{\sqrt{R_{lim} \pm 1}^4 - \varepsilon^\infty (1 - R_{lim})^2}} \quad (12)$$

Вираз $\Delta\omega = \omega_r - \omega_l$ визначає значення частотної ширини АВК.

Наприклад, у кристалах LiF та NaF ширина каналу складає 15 ТГц, а частоти мінімуму 27,27 ТГц і 17,35 ТГц відповідно. За рахунок таких параметрів питома потужність, що падає на кристал в області АВК, коливається в діапазоні від 85 Вт/м² до 485 Вт/м². Частота мінімуму АВК кристалу MgO становить 25,49 ТГц, що також припадає на максимум теплового випромінювання. Проте, за рахунок вузького каналу (4,65 ТГц) питома потужність зменшується, майже, в три рази. Варто зазначити, що втрати на відбиття в області АВК відсутні, саме тому подібні кристалічні середовища можуть бути перспективними в якості матеріалів, для перетворення теплової енергії в електричну

Таким чином, нами вперше кількісно досліджені частотні області діелектричних кристалів з аномально низькими коефіцієнтами відбиття терагерцового випромінювання, які утворюються при резонансній взаємодії терагерцових хвиль з полярними коливаннями в кристалічному середовищі. На основі двох запропонованих моделей, які доповнюють одна іншу, показано, що коефіцієнти відбиття можуть досягати значень $R \leq 0,01\%$, що фактично спостерігається в експериментальних спектрах відбиття багатьох кристалів.

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 фонованого згасання на формування областей з від'ємною діелектричною проникністю (ДП) та виникнення частотних каналів з аномально низьким відбиттям електромагнітних хвиль. Зокрема:

1. 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 1÷10 ТГц (30÷300 см⁻¹). Вперше встановлено, що область від'ємної ДП в межах смуги «залишкових променів» можлива лише за умови, якщо стала фонованого згасання Γ менша ніж T-L розщеплення відповідних фундаментальних частот.
2. 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 7 дипольно-активних коливань в трьох кристалічних модифікаціях кристала нітриду бора, а також для 4 коливань кристала MnF_2 при зміні температури від 5К до 300К.

3. Запропоновано методу класифікації полярних коливних мод за ступенем демпфування в кристалах, яку використано для аналізу загалом 34 відомих фундаментальних мод, що вже встановлені раніше методами спектроскопії комбінаційного розсіяння світла в кристалах $LiNbO_3$, $LiTaO_3$ та $LiIO_3$. 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.
4. 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 смугі частот, що перевищує область від'ємних значень ДП.
5. 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 $R \leq 0,01\%$ у цілковитій відповідності до експериментальних спектрів відбиття в кількох кристалах.

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Фелинский С.Г. Критерий существования отрицательной диэлектрической проницаемости в кристаллах / С.Г. Фелинский, П.А. Коротков, Г.С. Фелинский // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии (Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies). – 2014. – Том. 12. - № 3. - С. 587-595.
2. Фелінський С. Г. Критерій існування області від'ємної діелектричної проникності на частотах полярних коливань в кристалах / С.Г. Фелинский, П.А. Коротков, Г.С. Фелинский // Вісник Київського університету. Сер.: фіз.-мат. науки. – 2010. – № 1. – С. 191-196.

3. Фелінський С.Г. Від'ємна діелектрична проникність в анізотропних модифікаціях нітриду бора / С.Г. Фелінський, П.А. Коротков, Г.С. Фелінський // Нові технології. – 2010. – № 2. – С. 51-57.
4. Felinskyi S.G. Negative dielectric permittivity of nonmagnetic crystals in the terahertz waveband / S.G. Felinskyi, P.A. Korotkov, G.S. Felinskyi // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. – 2012. - Vol. 15. – No. 1. - P. 83-88.
5. Фелинский С.Г. Нулевое отражение электромагнитных волн терагерцового диапазона в кристаллах / С.Г. Фелинский, Г.С. Фелинский // Вестник Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина. Серия “Радиофизика и электроника. – 2011. - выпуск 19. - № 983. - С. 102-106.
6. Felinskyi S.G. Criterion for existence of the negative dielectric reality in crystals / S.G. Felinskyi, G.S. Felinskyi // American Journal of Modern Physics. – 2014. - Vol. 3. - No. 5. - P. 195-201. - doi: 10.11648/j.ajmp.20140305.11.
7. Фелінський С. Г. Критерій існування області від'ємної діелектричної проникності в оптичних монокристалах / С.Г. Фелінський, П.А. Коротков, Г.С. Фелінський // IV міжн. наук.-практ. конф. «Матеріали електронної техніки та сучасні інформаційні технології» (МЕТІТ-4) Кременчук, 19-21 травня, 2010. - Україна, Кременчук, 2010. - С. 82-84. - ISBN 978-96-8931-70-3.
8. Felinskyi S.G. Criterion for the appearance of negative dielectric areas in crystals / S.G. Felinskyi, G.S. Felinskyi // Proc. 10th Int. Conf. Laser & Fiber-Optical Modeling (LFNM 2010) Sevastopol, 12-14 September, 2010. – Ukraine, Sevastopol, 2010. - P. 58-59.
9. Felinskyi S.G. Spectroscopic criterion for existence the negative permittivity / S.G. Felinskyi, P.A. Korotkov, G.S. Felinskyi // XX Int. School-Seminar of Galyna Puchkovska “Spectroscopy Molecules & Crystals” Beregove, 20-27 September, 2011. - Ukraine, Crimea, Beregove, 2011. - P. 95.
10. Фелінський С.Г. Формування від'ємної діелектричної проникності та загасання полярних фононів в оптичних кристалах / С.Г. Фелінський, П.А. Коротков, Г.С. Фелінський // I міжн. наук.-практ. конф. „Напівпровідн. матеріали, інформ. технології та фотовольтаїка” (НМІТФ-1) Кременчук, 5-7 травня, 2011. - Україна, Кременчук, 2011. - С. 115-116. - ISSN 2222-4386.
11. Felinskyi S.G. Dumping effect on the forming of negative dielectric properties in crystal / S.G. Felinskyi, P.A. Korotkov, G.S. Felinskyi // 12th Int. Conf. on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling (LFNM'2013) Sudak, 11-13 September, 2013. - Ukraine, Sudak, 2013. - P. 20-22.
12. Felinskyi S.G. Classification of crystal polar vibrations by the damping degree / S.G. Felinskyi, P.A. Korotkov, G.S. Felinskyi // XII Int. Young Scientists' Conf. on Appl. Phys. (ICAP 2012) Kyiv, 23-25 May, 2012. – Ukraine, Kyiv, 2012. - P. 38-39.

13. Felinskyi S.G. Polar vibration classification as sources of negative dielectric properties in crystals / S.G. Felinskyi, P.A. Korotkov, G.S. Felinskyi // XXI Int. School-Seminar of Galyna Puchkovska "Spectroscopy Molecules & Crystals" Beregove, 22-29 September, 2013. – Ukraine, Crimea, Beregove, 2013. – P. 114.
14. Felinskyi S.G. Analysis of Negative Dielectric Permittivity in Boron Nitride / S.G. Felinskyi, P.A. Korotkov, G.S. Felinskyi // X Int. Young Scientists' Conference on Applied Physics (ICAP 2010) Kyiv, 16-19 June, 2010. – Ukraine, Kyiv, 2010. - P. 28-29.
15. Felinskyi S.G. Terahertz properties and the negative dielectric regions in boron nitride / S.G. Felinskyi, P.A. Korotkov, G.S. Felinskyi // Proc. 2nd IEEE Int. Workshop on THz Radiation: Basic Research & Applications (TERA 2010) Sevastopol, 12-14 September, 2010. – Ukraine, Sevastopol, 2010. – P. 265-266.
16. Felinskyi S.G. Negative dielectric properties of MnF_2 crystal / S.G. Felinskyi, P.A. Korotkov, G.S. Felinskyi // Proc. IX Int. Conf. "Electronics and Applied Physics" Kyiv, 23-26 October, 2013. - Ukraine, Kyiv, 2013. - P. 200-201.
17. Felinskyi S.G. Wave propagation collapse in the polariton negative dielectric band of crystal / S.G. Felinskyi, G.S. Felinskyi // IEEE 35th Int. Conf. on Electronics and Nanotechnology (ELNANO) Kyiv, 21-24 April, 2015. - Ukraine, Kyiv, 2015. - P. 211-213.
18. Felinskyi S.G. Negative dielectric properties of $LiIO_3$ near Raman-active phonon vibrations / S.G. Felinskyi, P.A. Korotkov, G.S. Felinskyi // Proc. VI Int. Conf. "Electronics and Applied Physics" Kyiv, 20-23 October, 2010. - Ukraine, Kyiv, 2010. - P. 7-8.
19. Felinskyi S.G. Anisotropic effect and negative dielectric permittivity in crystals / S.G. Felinskyi, P.A. Korotkov, G.S. Felinskyi // 11-th Int. Conf. Laser & Fiber-Optical Networks Modeling (LFNM 2011) Kharkov, 5-8 September, 2011. – Ukraine, Kharkov, 2011. - P. 1-3.
20. Фелінський С.Г. Вплив анізотропії на формування від'ємної діелектричної проникності в кристалах / С.Г. Фелінський, П.А. Коротков, Г.С. Фелінський // 36. тез V Української наукової конференції з фізики напівпровідників (УНКФН-5) Ужгород, 9-15 Жовтня, 2011. – Україна, Ужгород, 2011. - С. 274.
21. Felinskyi S.G. Formation features of negative dielectric properties in anisotropic crystals / S.G. Felinskyi, P.A. Korotkov, G.S. Felinskyi // Proc. VII Int. Conf. "Electronics and Applied Physics" Kyiv, 19-22 October, 2011. - Ukraine, Kyiv, 2011. - P. 19-20.
22. Felinskyi S.G. Electromagnetic wave vanishing in the negative dielectric permittivity area / S.G. Felinskyi, P.A. Korotkov, G.S. Felinskyi // XIII Int. Young Scientists' Conf. on Appl. Phys. (ICAP 2013) Kyiv, 12-15 June, 2013. – Ukraine, Kyiv, 2013. - P. 76.

23. Фелінський С.Г. Терагерцові антивідбиваючі канали в кристалічних середовищах / С.Г. Фелінський, П.А. Коротков, Г.С. Фелінський // Конф. молодих вчених з фізики напівпровідників „Лашкарьовські читання - 2011” з міжн. участю Київ, 12-14 Квітня, 2011. – Україна, Київ, 2011. - С. 38-39.
24. Felinskyi S.G. Extremely low reflection of Terahertz radiation in the crystal BN / S.G. Felinskyi, P.A. Korotkov, G.S. Felinskyi // XI Int. Young Scientists' Conf. on Appl. Phys. (ICAP 2011) Kyiv, 15-18, June, 2011. - Ukraine, Kyiv, 2011. - P. 17-18.
25. Felinskyi S.G. Terahertz Antireflection Channels in Crystals / S.G. Felinskyi, G.S. Felinskyi // 3d Int. Workshop on THz Radiation: Basic Research & Applications (TERA 2011) Kharkov, 4-5 September, 2011. - Ukraine, Kharkov, 2011. - P. 1-3.
26. Felinskyi S.G. Extremely low IR reflection bands in crystals / S.G. Felinskyi, G.S. Felinskyi // XX Int. School-Seminar of Galyna Puchkovska “Spectroscopy Molecules & Crystals” Beregove, 20-27 September, 2011. - Ukraine, Crimea, Beregove, 2011. - P. 96.
27. Фелінський С.Г. Антивідбиваючі канали у терагерцових спектрах кристалів / С.Г. Фелінський, Г.С. Фелінський // 36. тез V Української наукової конференції з фізики напівпровідників (УНКФН-5) Ужгород, 9-15 Вересня, 2011. – Україна, Ужгород, 2011. - С. 345-346.
28. Felinskyi S.G. Antireflection frequencies in terahertz crystal spectra / S.G. Felinskyi, G.S. Felinskyi // Proc. VII Int. Conf. “Electronics and Applied Physics” Kyiv, 19-22 October, 2011. - Ukraine, Kyiv, 2011. - P. 17-18.
29. Фелінський С.Г. Аномальне зниження відбиття терагерцового випромінювання в кристалах / С.Г. Фелінський, Г.С. Фелінський // II Всеукраїнська конференція молодих вчених “Сучасне матеріалознавство: матеріали та технології” Київ, 16-18 Листопада, 2011. – Україна, Київ, 2011. - С. 141.
30. Фелінський С.Г. Кількісний аналіз ефекту нульового відбиття в кристалах / С.Г. Фелінський, П.А. Коротков, Г.С. Фелінський // Конф. молодих вчених з фізики напівпровідників „Лашкарьовські читання - 2012” з міжн. участю Київ, 3-5 Квітня, 2012. – Україна, Київ, 2012. - С. 50-52.
31. Felinskyi S.G. Zero reflection phenomenon in terahertz crystalline spectra / S.G. Felinskyi, G.S. Felinskyi // 6th Int. Conf. on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL 2013) Sudak, 9-13 September, 2013. - Ukraine, Sudak, 2013. - P. 189-191.
32. Felinskyi S.G. Power density within anomalously low reflection channels in crystals for temperature range of 270-400K / S.G. Felinskyi, P.A. Korotkov, G.S. Felinskyi // Proc. VIII Int. Conf. “Electronics and Applied Physics” Kyiv, 24-27 October, 2012. - Ukraine, Kyiv, 2012. - P. 12-13.

АНОТАЦІЯ

Фелінський С.Г. Аномальна дисперсія та відбиття електромагнітних хвиль терагерцового діапазону в діелектричних кристалах. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю **01.04.03 – радіофізика**. – Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Міністерство освіти і науки України, м. Київ, 2016.

В роботі розглянуто вплив аномальної дисперсії від терагерцових полярних коливань кристала на умови розповсюдження електромагнітного випромінювання та матеріальні параметри кристалічного середовища. Наведені аналітичні розв'язки задачі про фізичні умови утворення областей з від'ємною діелектричною проникністю (ДП) та задачі про мінімуми відбиття терагерцових електромагнітних хвиль в кристалі з одним полярним коливанням. Основним інструментом для кількісного визначення областей з від'ємною ДП був дисперсійний аналіз експериментальних спектрів далекого інфрачервоного (терагерцового) відбиття, а у випадках нецентросиметричних кристалів – спектрів комбінаційного розсіяння світла для смуги частот $1\div 10$ ТГц ($30\div 300$ см⁻¹). При моделюванні і розрахунках застосовувались узагальнені методи дослідження терагерцових аномалій, зокрема з використанням фазових портретів комплексних функцій ДП та показника заломлення в області від'ємної діелектричної проникності. Експериментально доведена обґрунтованість теоретичних співвідношень щодо критерію існування областей з від'ємною діелектричною проникністю шляхом аналізу спектроскопічних даних відбиття терагерцового випромінювання для 7 дипольно-активних коливань в трьох кристалічних модифікаціях кристала нітриду бора, а також для 4 коливань кристала MnF₂ при зміні температури від 5К до 300К. Запропонована методика класифікації полярних коливань мод за ступенем демпфування в кристалах, яка використана для аналізу загалом 34 відомих фундаментальних мод, що вже встановлені раніше в кристалах LiNbO₃, LiTaO₃ та LiIO₃. Визначені частотні області з аномально низькими коефіцієнтами відбиття терагерцового випромінювання. На основі двох моделей, які доповнюють одна іншу, для резонансної взаємодії терагерцових хвиль з полярними коливаннями в кристалічних середовищах показано, що коефіцієнти відбиття $R \leq 0,01\%$ у цілковитій відповідності до експериментальних спектрів відбиття в кількох кристалах.

Ключові слова: взаємодія електромагнітного поля з речовиною; терагерцовий діапазон; розсіювання, поляризація хвиль; моделювання в електродинамічних системах та середовищах; від'ємна діелектрична проникність; .

АННОТАЦИЯ

Фелинский С.Г. Аномальная дисперсия и отражение электромагнитных волн терагерцового диапазона в диэлектрических кристаллах. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности **01.04.03 – радиофизика.** – Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Министерство образования и науки Украины, г. Киев, 2016.

В работе рассмотрено влияние аномальной дисперсии от терагерцовых полярных колебаний кристалла на условия распространения электромагнитного излучения и материальные параметры кристаллической среды. Приведены аналитические решения задачи о физических условиях образования областей с отрицательной диэлектрической проницаемостью (ДП) и задачи о минимумах отражения терагерцовых электромагнитных волн в кристалле с одним полярным колебанием. В качестве основного инструмента для количественного определения областей с отрицательной ДП использован дисперсионный анализ экспериментальных спектров дальнего инфракрасного (терагерцового) отражения, а в случаях нецентросимметричных кристаллов – спектров комбинационного рассеяния света в полосе частот $1\div 10$ ТГц ($30\div 300$ см⁻¹). При моделировании и расчетах применялись обобщенные методы исследования терагерцовых аномалий, в частности с применением фазовых портретов комплексных функций ДП и показателя преломления в области отрицательной ДП. Экспериментально доказана обоснованность теоретических соотношений для критерия существования областей с отрицательной ДП. Анализ выполнен при помощи спектроскопических данных отражения терагерцового излучения для 7 дипольно-активных колебаний в трех кристаллических модификациях кристалла нитрида бора, а также для 4 колебаний кристалла MnF_2 при изменении температуры от 5К до 300К. Предложена методика классификации полярных колебательных мод по степени демпфирования в кристаллах, которая использована для анализа в общей сложности 34 известных фундаментальных мод, исследованных ранее в кристаллах $LiNbO_3$, $LiTaO_3$ и $LiIO_3$. Определены частотные области с аномально низкими коэффициентами отражения терагерцового излучения. На основе двух моделей, которые дополняют друг друга, для резонансного взаимодействия терагерцовых волн с полярными колебаниями в кристаллических средах показано, что коэффициенты отражения могут достигать $R \leq 0,01\%$ в полном соответствии с экспериментальными спектрами отражения в нескольких кристаллах.

Ключевые слова: взаимодействие электромагнитного поля с веществом; терагерцовый диапазон; рассеяние, поляризация волн; моделирование в электродинамических системах и средах; отрицательная диэлектрическая проницаемость.

ABSTRACT**Felinskyi S.G. Anomalous dispersion and reflection of the electromagnetic waves in the terahertz band in dielectric crystals. – Manuscript, Kyiv, 2016.**

The anomalous dispersion effects due to terahertz oscillations polar crystal on the distribution terms of electromagnetic radiation and material parameters of crystalline media are presented in this work. The analytical solution of the problem about physical conditions for the formation of regions with negative dielectric permittivity (DP) and the problem solution of minimum reflection of terahertz electromagnetic waves in a crystal with a single polar vibration are presented. The main tool for the quantitative determination of areas with negative DP was dispersion analysis of experimental spectra of far-infrared (terahertz) reflection, and Raman spectra in cases of noncentrosymmetric crystals in the band from 1 THz to 10 THz (from 30 cm^{-1} to 300 cm^{-1}). The generalized methods are applied for simulation and calculation of the terahertz anomalies study, particularly the phase portraits of complex functions DP and the refractive index in the negative DP are used. The validity of theoretical relations with respect to the criterion of the existence of areas with negative DP is experimentally proved. The analysis is performed using the spectroscopic data for terahertz reflection at 7 dipole-active vibrations in three crystalline modifications of boron nitride crystal, and the 4 crystal modes in MnF_2 at temperature changes from 5K to 300K. The classifying method for the polar vibrational modes by the damping degree in the crystals is proposed, and it is used for the analysis of a total of 34 well-known fundamental modes have previously studied in crystals LiNbO_3 , LiTaO_3 and LiIO_3 . The frequency region with an abnormally low reflection of terahertz radiation is determined. Based on the two models which are complementary for the resonant interaction of terahertz waves with polar vibrations in crystalline media it is shown that the reflection coefficients $R \leq 0,01\%$ in full accordance with the experimental reflection spectra in several crystals.

Key words: interaction of electromagnetic fields with matter; terahertz band; scattering, polarization of waves; modeling of electrodynamics systems and media; negative dielectric permittivity.