ЗАТВЕРДЖУЮ

В. о. директора Інституту радіофізики

та електроніки ім. О. Я. Усикова

НАН України

_____ Юрій ЛОГВІНОВ

_____ 2025 р.

ВИТЯГ

з протоколу № 5 від 15травня 2025 р. розширеного засідання фахового наукового семінару відділу радіоспектроскопії Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України.

Були присутні: 22 учасники семінару, в тому числі: **доктори фізико-математичних наук:** Тарапов С. І., Білецький М. М., Аверков Ю. О., Іванченко І. В., Миценко І. М.; **кандидати фізико- математичних наук:** Гіріч О. О., Полевой С. Ю., Луценко І. В., Натаров М. П., Шубний О. І., Кривенко О. В., Головащенко Р. В., Векслерчик В. Є., Притула Г. М., Маслов В.В., Недух С. В., Бекіров Б. Е., Харченко Г. О.

Слухали: доповідь та обговорення дисертаційної роботи аспіранта 4 року навчання Поповича Івана Дмитровича на тему «Падіння електромагнітних хвиль на шаруваті твердотільні структури, що містять метаповерхню» на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 10 - Природничі науки за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

Тему дисертаційної роботи затверджено на засіданні Вченої ради Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України (протокол № 2 від 27 січня 2022 року). Наказом Інституту № 176/ВК від 13.10.2021 року науковим керівником затверджено доктора фізико-математичних наук, професора Білецького М. М.

В обговоренні дисертаційної роботи **брали участь (ставили питання і виступили)**: Тарапов С. І., Аверков Ю. О., Полевой С. Ю., Натаров М. П., Недух С. В.

Ухвалили: прийняти з даної роботи такий висновок

ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації Поповича І. Д.

Актуальність теми дослідження

Роботу присвячено актуальному дослідженню фізичних ефектів, які виникають при падінні *p*-поляризованих електромагнітних хвиль на твердотільні структури (ТС) із плазмонною метаповерхнею (ПМП). Основна увага приділялася вивченню ефекту невідбивного падіння *p*-поляризованих електромагнітних хвиль на ТС із ПМП. Отримані результанти не тільки розширюють наші знання про фізичні процеси за участю ПМП, але й дають можливість створити принципово нові пристрої радіофізики та оптики.

Другим важливим ефектом є повна трансформація *p*-поляризованих електромагнітних хвиль в *s*-поляризовані електромагнітні хвилі в ТС із ПМП. Цей ефект може бути використаним у великій кількісті можливих практичних застосувань у радіофізиці та електроніці.

У дисертації знайдено умови виникнення нових ефектів та визначення можливості їхнього налаштування в залежності від параметрів ТС.

Зв'язок роботи з планами наукових робіт

Дисертаційна робота виконувалась у відділі твердотільної електроніки Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України в рамках держбюджетної теми науково-дослідної роботи «Дослідження процесів формування, поширення та випромінювання потужних електромагнітних імпульсів та поляризованих хвиль гігагерцевого, терагерцевого та оптичного діапазонів у частотно-селективних структурах і метаматеріалах та їх взаємодії з біологічними об'єктами» (шифр «Імпульс», номер держреєстрації 0122U000667).

Наукова новизна одержаних результатів.

Основні наукові результати:

1. Показано, що присутність анізотропної одновісної ПМП на діелектричному шарі суттєво змінює умови для виникнення ефекту невідбивного падіння *p*-поляризованих електромагнітних хвиль, які поширюються вздовж та поперек великої осі анізотропії ПМП. Встановлено, що ПМП усуває жорсткі обмеження на величину проникності діелектричного шару, при якій спостерігається ефект невідбивного падіння *p*-поляризованих електромагнітних хвиль. Для прояву ефекту падіння *p*-поляризованих електромагнітних хвиль без відбиття проникність діелектричного шару може бути обрано в широкому діапазоні значень.

2. Наявність одновісної ПМП на діелектричному шарі може привести до трансформації *p*-поляризованої електромагнітної хвилі, що падає, у відбиту *s*-поляризовану електромагнітну хвилю. Визначено, що такий ефект може існувати у випадку, коли площа падіння *p*-поляризованої електромагнітної хвилі формує гострий кут з більшою віссю ПМП.

3. Доведено, що ефект невідбивного падіння *p*-поляризованих електромагнітних хвиль також може існувати для ТС, що складається з одновісної ПМП, діелектричного шару та металевої підкладки. Для цієї структури передбачено новий ефект трансформації падаючої *p*-поляризованої електромагнітної хвилі у відбиту *s*-поляризовану електромагнітну хвилю.

При цьому площина падіння *p*-поляризованої електромагнітної хвилі повинна бути розташована під гострим кутом до більшої осі симетрії плазмонної МП.

4. Встановлено, що діелектричне покриття твердотільної структури, яка складається з одновісної ПМП, діелектричного шару та металевої підкладки, має суттєвий вплив на ефект падіння *p*-поляризованих електромагнітних хвиль без відображення. Знайдено, що діелектрична проникність покриття суттєво впливає на частоту, при якій спостерігається ефект невідбивного падіння електромагнітних хвиль. Встановлена залежність між діелектричною проникністю та товщиною покриття, яка необхідна для появи ефекту невідбивного падіння *p*-поляризованих електромагнітних хвиль.

Практичне значення результатів дисертації

Одержані результати можуть бути застосовані для підвищення продуктивності та функціональності сучасного наноелектронного та оптичного обладнання. Крім того, вони можуть сприяти розробці нових пристроїв з унікальними та інноваційними характеристиками.

Результати теоретичних досліджень нових ефектів, які виникають при падінні *p*-поляризованих електромагнітних хвиль на ТС із ПМП, можуть бути ефективно використані для покращення маскувальних властивостей приладів на різних частотах. Це зробить їх менш помітними в умовах, коли приховування цих приладів має вирішальне значення. Використовуючи здобуту інформацію, можна досягти суттєвого прогресу в технологіях малопомітності в широкому спектрі практичних застосувань.

Обґрунтованість і достовірність отриманих у роботі результатів забезпечено детальною постановкою задачі та використанням добре перевірених і загально прийнятих методів теоретичної фізики та методів числових розрахунків. Для проведення чисельного моделювання використовувалась мова програмування Python. Порівняння результатів

отриманих аналітичних виразів з числовими розрахунками служило додатковою верифікацією застосованих підходів.

Публікації

За темою дисертації опубліковано 8 наукових праць, з них 4 статті у виданнях, що входять до наукометричних баз Scopus та Web of Science, і 4 тези доповідей у збірниках матеріалів міжнародних наукових конференцій. Публікації здобувача повністю відповідають темі дисертації та правильно відображають її зміст і основні результати.

Публікації за темою дисертації:

1. М. М. Білецький, І. Д. Попович. Вплив одновісної плазмонної метаповерхні на просвітлювальні властивості діелектричного шару. Radio physics and radio astronomy. 2022. Т. 27, № 1, С. 75-80.
DOI: 10.15407/rpra22.01.075.

2. M. M. Beletskii, I. D. Popovych. Changes in electromagnetic wave polarization resulting from its reflection at a uniaxial plasmonic metasurface on top of a dielectric layer. Radio physics and radio astronomy. 2022. Vol. 27, no. 2. P. 73-80. DOI: 10.15407/rpra22.02.73

3. M. M. Beletskii, I. D. Popovych Non-reflective incidence of *p*-polarized electromagnetic waves on the solid-state structure "uniaxial plasmonic metasurface – dielectric layer – metal". Radio physics and radio astronomy. 2023. Vol. 28, no. 2. P. 166-173. DOI: 10.15407/rpra28.02.166

4. M. M. Biletskiy, I. D. Popovych. Reflectionless incidence of the *p*-polarized electromagnetic wave through solid-state structure "coating-uniaxial plasmonic metasurface-dielectric-metal". East European Journal of Physics. 2024. no. 2, P. 90–98. DOI: 10.26565/2312-4334-2024-2-07.

5. M. Beletskii, I. Popovych , Metasurface affect on electromagnetic waves polarization. The 18th international conference on electronics and applied physics aphys. – Kyiv, Ukraine. – 18–22 Oct, 2022. – P. 58-59.

6. M. Beletskii, I. Popovych . Electromagnetic wave incidence on the metasurface-dielectric-metal structure. XXIII International Young Scientists Conference On Applied Physics. – Kyiv, Ukraine. – 16–20 May, 2023. – P. 57-58.

7. M. Beletskii, I. Popovych. Electromagnetic wave propagation through metasurface-dielectric-metal structure. International Research And Practice Conference "Nanotechnology And Nanomaterials". – Bukovel, Ukraine. – 16–19 Aug, 2023. – P. 515.

8. M. Beletskii, I. Popovych. The impact of the dielectric coating on the reflective properties of the structure "uniaxial plasmonic metasurface-dielectric-metal". XXIII International Young Scientists Conference On Applied Physics. – Kyiv, Ukraine. – 21–24 May, 2024. – P. 71-72.

Структура дисертації є цілісною, а обсяг публікацій за матеріалами дисертаційної роботи відповідає встановленим вимогам МОН України і є достатнім для подання роботи на здобуття наукового ступеня доктора філософії. Оформлення дисертації відповідає вимогам.

В дисертаційній роботі відсутні порушення академічної доброчесності.

Апробація результатів дисертації. Результати, представлені в роботі, доповідалися дисертантом на таких конференціях: XVIII International conference on electronics and applied physics Aphys (Kyiv, Ukraine, 18–22 Oct, 2022), XXIII International Young Scientists Conference On Applied Physics (Kyiv, Ukraine, 16–20 May, 2023), International Research And Practice Conference "Nanotechnology And Nanomaterials" (Bukovel, Ukraine, 16–19 Aug, 2023), XXIII International Young Scientists Conference On Applied Physics (Kyiv, Ukraine, 21–24 May, 2024).

Особистий внесок здобувача. Наукові статті, в яких представлено основні результати дисертаційної роботи, написано у співавторстві з керівником відділу твердотільної електроніки Інституту радіофізики та

електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України М. М. Білецьким за безпосередньої участі автора. Автор брав активну участь у розробці теоретичної бази для розуміння того, як електромагнітні хвилі взаємодіють з різними ТС із ПМП. Крім того, він брав участь в аналізі отриманих даних і висновків, а також редагував тексти наукових статей, які лягли в основу цієї роботи. Він також брав безпосередню участь у наукових конференціях, де був доповідачем наукових тез.

У роботі [1] дисертанта було залучено до моделювання та виконання необхідних розрахунків для визначення умов, потрібних для виникнення ефекту невідбивного падіння ЕМХ.

В статті [2] дисертант розрахував частоти та товщини діелектричного шару, при яких коефіцієнт поляризаційного перетворення досягає максимального значення в заданому діапазоні частот, а також написав відповідну частину тексту.

У роботі [3] дисертант виявив, що ефект невідбивного падіння *p*-поляризованих електромагнітних хвиль не обмежується величиною діелектричної проникності діелектричного шару. Він виконав необхідні розрахунки та оформив відповідний розділ статті.

В роботі [4] дисертант проаналізував зв'язок між товщиною покриття та його діелектричною проникністю, для яких існує ефект невідбивного падіння *p*-поляризованих електромагнітних хвиль. Він визначив, що збільшення діелектричної проникності покриття приводить до зменшення товщини, необхідної для спостереження невідбивного падіння ЕМХ на багатошарову структуру, яка містить МП.

Рішення. Науковий семінар відділу радіоспектроскопії Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України на підставі доповіді Поповича І. Д. та детального обговорення дисертаційної роботи «Падіння електромагнітних хвиль на шаруваті твердотільні структури, що містять метаповерхню», що подається на здобуття наукового ступеня доктора

філософії з галузі знань 10 – Природничі науки за спеціальністю 104 « Фізика та астрономія», відзначає високий науковий рівень і фундаментальність проведених у ній досліджень. За актуальністю вирішуваних завдань, новизною, науковою обгрунтованістю та практичною значущістю отриманих результатів семінар вважає, що дисертаційна робота Поповича І. Д. повністю відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Науковий семінар відділу радіоспектроскопії Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України **рекомендує**:

1) дисертаційну роботу Поповича І.Д. «Падіння електромагнітних хвиль на шаруваті твердотільні структури, що містять метаповерхню» до захисту на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – Природничі науки за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія» в разовій спеціалізованій вченій раді Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України.

2) утворити разову спеціалізовану вчену раду в складі:

Голова:

доктор фізико-математичнихнаук, старший науковий співробітник, завідувач відділу радіофізики твердого тіла Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України **Аверков Юрій Олегович**.

Члени:

Рецензенти:

доктор фізико-математичних наук, професор, член-кореспондент НАН України, завідувач відділу радіоспектроскопії Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України **Тарапов Сергій Іванович**;

доктор фізико-математичних наук, доцент, старший науковий співробітник відділу радіофізики твердого тіла Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України **Майзеліс Захар Олександрович.**

Опоненти:

доктор фізико-математичних наук, професор, заступник директора з наукової роботи Інституту фізики плазми НАН України **Греков Дмитро Леонідович**;

доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри квантової електроніки Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна **Маслов Вячеслав Олександрович**.

Головуючий на засіданні фахового
наукового семінару відділу
радіоспектроскопії
ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України
кандидат фізико-математичних наук _____ Олексій ГІРІЧ

Секретар фахового наукового
семінару відділу радіоспектроскопії
ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України
кандидат фізико-математичних наук _____ Сергій ПОЛЕВОЙ