

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. директора Інституту радіофізики та
електроніки

ім. О.Я. Усикова НАН України



М.П.

АНОТОВАНИЙ ЗВІТ

про виконану роботу у 2021 році в рамках реалізації проєкту
із виконання наукових досліджень і розробок

«Квантові явища при взаємодії електромагнітних хвиль з твердотільними наноструктурами»
(назва Проєкту)

Назва конкурсу: «Підтримка досліджень провідних та молодих учених»

Реєстраційний номер Проєкту: 2020.02/0149

Підстава для реалізації Проєкту з виконання наукових досліджень і розробок

№ 2020.02/0149 «Квантові явища при взаємодії електромагнітних хвиль з твердотільними наноструктурами»

Рішення наукової ради Національного фонду досліджень України щодо визначення переможця конкурсу «Підтримка досліджень провідних та молодих учених», протокол № 21 від «16-17» вересня 2020 року.

1. ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ ПРО ПРОЄКТ

Загальна тривалість виконання проєкту 2020 рік – 2022 рік

Тривалість виконання Проєкту у 2021 році

Початок – 29.04.2021 р
(дата укладання Договору про виконання наукового дослідження і розробки)

Закінчення – 15.12.2021 р.

Загальна вартість Проєкту, грн. 8 013 031,00 грн.

Вартість Проєкту по роках, грн.:

1-й рік 894 666,00 грн

2-й рік 3 499 700,00 грн.

3-й рік 3 618 665,00 грн.

2. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ВИКОНАВЦІВ ПРОЄКТУ

до виконання Проєкту було залучено 7 виконавців та 3 асистенти, з них:

доктори наук 4;

кандидати наук 3;

інші працівники 3.

3. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ГРАНТООТРИМУВАЧА ТА ОРГАНІЗАЦІЮ(Ї) СУБВИКОНАВЦЯ(ІВ) ПРОЄКТУ

Субвиконавці не долучаються до виконання проєкту.

4. ОПИС ПРОЄКТУ

4.1. Мета Проєкту (до 200 знаків)

Метою даного проєкту є дослідження квантових явищ, які виникають у твердотільних наноструктурах при опроміненні електромагнітними хвилями або під дією постійних електричного та/або магнітного поля.

4.2. Основні завдання Проєкту (до 400 знаків)

Основними завданнями виконання Проєкту у 2021 році є дослідження ефекту виникнення кулонівського опору в двошарових системах, що містять двовимірну електронну рідину, андерсонівської локалізації плазмон-поляритонів при їх розсіянні на шорсткій поверхні, транспортних ефектів в напівпровідникових системах та ефекту Ааронова-Бома у діелектричному циліндрі з двовимірним поверхневим провідниковим шаром.

4.3. Детальний зміст Проєкту:

- Сучасний стан проблеми (до 400 знаків)

Бурхливий розвиток нанотехнологій за останні десятиріччя дозволив створювати різноманітні наносистеми, що сприяє мініатюризації електроніки, підвищує обчислювальну потужність, зменшує енергоспоживання, а також дозволяє застосовувати в електроніці якісно нові квантові властивості. У проєкті охоплено низку важливих задач, пов'язаних із квантовою природою наносистем, які ще не мають детального теоретичного опису.

- Новизна Проєкту (до 400 знаків)

На другому етапі виконання Проєкту у 2021 році досліджено нові квантові явища, які виникають при взаємодії електромагнітного поля з наноструктурами, зокрема у двошарових провідникових наносистемах, у діелектричному нанорозмірному циліндрі з поверхневим провідниковим шаром, у напівпровідникових наноструктурах з кількома типами носіїв заряду, тощо.

- Методологія дослідження (до 400 знаків)

У проєкті передбачається використання сучасних аналітичних та чисельних методів теоретичної фізики. Буде також використано низку оригінальних методів, зокрема, будуть використані модифіковані гідродинамічні рівняння Нав'є-Стокса, метод квантування провідності невпорядкованих систем, метод розв'язання динамічних задач шляхом введення об'ємних ентропійних потенціалів, тощо.

5. ОТРИМАНІ НАУКОВІ АБО НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ (до 2 сторінок) реалізації Проєкту у 2021 році, зокрема:

5.1. Опис наукових або науково-технічних результатів, отриманих в рамках виконання Проєкту (із зазначенням їх якісних та кількісних (технічних) характеристик)

В результаті виконання Проєкту у 2021 році отримано наступні нові важливі фундаментальні результати, які розширюють знання про електродинамічні явища у наносистемах:

1) Визначено фазові переходи у квазідвовимірній системі взаємодіючих безспінових електронів та встановлено, що за певних параметрів системи менш вірогідне упорядкування комірки з періодом 3 має меншу енергію основного стану, ніж упорядкування з періодом 2. Побудовано графіки залежностей енергії системи від асиметрії зовнішнього потенціалу за різних параметрів задачі (потенціал взаємодії, перестрибування, відстань між каналами, кількість вузлів у каналі).

2) Отримано аналітичні вирази для теплового кулонівського опору в системі двох квантових дротів, що містять одновимірні електронні кристали, а також проаналізовано його залежності від параметрів системи. Зокрема виявлені характерні температури, які визначають форму температурної залежності кулонівського опору.

3) Розроблено оригінальний метод теоретичного опису поширення поверхневих електромагнітних хвиль та обчислення поля витоку (випромінювання), що виникає при розсіянні на випадкових неоднорідностях імпедансу. За допомогою розробленого методу обчислено діаграму спрямованості поля витоку та показано, що в моделі бездисипативного металу налітаючий плазмон-поляритон повністю відбивається від збуреної ділянки поверхні у зворотному напрямку, незалежно від наявності на ній умов для андерсонівської локалізації.

4) Встановлено вплив випадкової складової на властивості p -поляризованих неоднорідних електромагнітних хвиль, які поширюються уздовж шарів у випадково модульованому діелектрику і локалізовані у перпендикулярному напрямку. Показано, що для неоднорідних хвиль з фіксованими значеннями частоти і хвильового числа випадкова неоднорідність спричиняє послаблення локалізації. Для плазмон-поляритонів локалізація Андерсона змінює закон дисперсії, в результаті чого глибина локалізації змінюється різним чином, в залежності від того, який з параметрів, частота чи хвильове число, є фіксованим.

5) Встановлено, що у реальних квантових структурах термоелектричні явища у замкнутому ланцюзі супроводжуються порушенням термодинамічної рівноваги у металевих контактах. Нерівноважність, спричинена транспортом заряду, позначається на кондактансі системи, підвищуючи його. Нерівноважність внаслідок транспорту енергії позначається як на кондактансі, так і на квантовому коефіцієнті Зеєбека системи. Вплив потоку енергії в контактах на кінетичні коефіцієнти квантової системи зникає при низьких температурах на відміну від впливу електричного струму. Встановлено, що в квантовому дифузійному середовищі в режимі сильного тунелювання термоелектричний ефект має місце тільки при наявності постійного зовнішнього електричного поля.

6) Досліджено ефект виникнення кулонівського опору в двошарових системах, що містять двовимірну електронну рідину. Для досить чистих зразків з високою мобільністю носіїв при достатньо високих температурах, коли частота плазмонів, що збуджуються, порівняна з оберненим часом електрон-електронного розсіювання, можливо описувати електронну рідину в гідродинамічному наближенні. Використовуючи гідродинамічні рівняння Нав'є-Стокса, рівняння для потоку ентропії та рівняння неперервності для зарядженої рідини з урахуванням флуктуаційних сил Ланжевена та при врахуванні квантових ефектів Зеєбека і Пельтьє, визначено декілька механізмів, які призводять до виникнення кулонівського опору: в'язкі та теплові потоки, магнітоплазмонний резонанс. В результаті дослідження поляризаційної функції визначено декілька типів плазмонів: акустичні, оптичні, магнітов'язкісні та магнітотеплові. Отримано аналітичний вираз для магнітоопору та визначено, що його залежність від магнітного поля виявляється немонотонною. Зокрема показано, що кулонівський опір може демонструвати як зростання, так і спадання при відносно високих магнітних полях, коли циклотронна частота стає порівнянною з характерною частотою плазмонів, а за середніх магнітних полів можуть спостерігатись локальні максимуми та мінімуми, положення яких чутливо до вибору параметрів.

7) Виконано теоретичне дослідження впливу ефекту Ааронова-Бома на спектр власних мод напівпровідникової нанотрубки з діелектричним наповненням. Рівняння дисперсії отримано з урахуванням ефекту уповільнення і описує як об'ємно-поверхні, так і поверхневі власні хвилі. У випадку, коли індекс азимутальної моди не дорівнює нулю, відповідні власні моди досліджуваної структури є гібридними, тобто це власні моди, що містять усі компоненти електричного та магнітного полів. Продемонстрована можливість виникнення періодичних змін частот власних мод досліджуваної структури (коли поздовжнє хвильове число є фіксованим) від величини магнітного потоку. Ці коливання виникають завдяки залежності складових двовимірного тензору провідності нанотрубки від величини магнітного потоку в нанотрубці і відносяться до одного з проявів ефекту Ааронова-Бома.

8) Розроблено теоретичний метод для обчислення електромагнітних полів, збуджуваних при проходженні і розсіюванні поверхневої плазмон-поляритонної хвилі через кінцеву ділянку межі між металевим і діелектричним середовищами, яка є випадково-шорсткою. Шорсткуватість

межі враховано методом перетворення її геометричних нерівностей у два типи ефективних потенціалів, які виникають у керуючому рівнянні Гельмгольца, яке є подібним до рівняння Шредінгера у квантовій механіці. Встановлено, що ефективність розсіювання визначається не амплітудою шорсткуватостей, а їхньою гостротою, тобто градієнтом поверхневого рельєфу. Винайдено критерії, якими визначається баланс між розсіянням плазмон-поляритона, що налітає, у плазмон-поляритонний канал і у канал радіаційного випромінювання у «витікаючі» об'ємні моди. З'ясована роль дисипативних властивостей металу із поверхневими шорсткуватостями у перерозподілі енергії плазмон-поляритонів між вищевказаними каналами і сформульовані умови повного, тобто дзеркального, відбиття плазмон-поляритона від збуреної ділянки поверхні без випромінювання у вільний простір.

5.2. За наявності науково-технічної продукції обґрунтування її переваг у порівнянні з існуючими аналогами

При виконанні Проєкту у 2021 році досліджено типи упорядкування електронів у одновимірних вігнерівських кристалах, розвинено фундаментальну теорію виникнення кулонівського опору в двошарових системах, що містять двовимірну електронну рідину, андерсонівської локалізації плазмон-поляритонів при їх поширенні вздовж шорсткої поверхні, поверхні із випадковим імпедансом та уздовж шарів у випадково модульованому діелектрику, транспортних ефектів в напівпровідникових системах та ефекту Ааронова-Бома у діелектричному циліндрі з двовимірним поверхневим провідниковим шаром. Отримані результати розширюють знання про вказані наноструктури та ефекти, що можуть в них спостерігатися, відповідають світовим науковим стандартам та не мають аналогів в Україні. У той час, як більшість наукових досліджень у світі проводиться експериментальними або чисельними методами, у Проєкті розвинена послідовна аналітична теорія, яка дає можливість передбачувати нові квантові явища.

5.3. Практична цінність отриманих результатів реалізації Проєкту для економіки та суспільства (стосується проєктів, що передбачають проведення прикладних наукових досліджень і науково-технічних розробок)

Проєкт передбачає проведення фундаментальних наукових досліджень, що стосуються одержання нових теоретичних знань у фізиці, і не передбачає проведення прикладних наукових досліджень і науково-технічних розробок.

5.4. Опис шляхів та способів подальшого використання результатів виконання Проєкту в суспільній практиці.

Подальше застосування результатів досліджень, проведених у межах проєкту, полягає у використанні в твердотільній наноелектроніці отриманих нових фундаментальних знань про квантові ефекти при взаємодії твердотільних наноструктур з електромагнітними хвилями, а також у розробці нових елементів, що діють на їх основі. Результати, отримані при виконанні Проєкту у 2021 році, описують квантові електродинамічні явища у одновимірних електронних кристалах, двошарових провідникових наносистемах, у діелектричному нанорозмірному циліндрі з поверхневим провідниковим шаром, у напівпровідникових наноструктурах з кількома типами носіїв заряду, тощо. Ці результати можуть бути застосовані у сучасній електроніці.

Анотований звіт не містить відомостей, заборонених до відкритого опублікування.

Науковий керівник Проєкту

Г.н.с. ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України,
член-кореспондент НАН України
Ямпольський В.О.


(підпис)