

## ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

на дисертаційну роботу **Азнакаєвої Діани Емірівни** «Дослідження і моделювання нанорозмірних модуляторів», подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.17 — радіотехнічні та телевізійні системи

**Актуальність теми роботи.** Використання новітніх наукових досягнень необхідне для подальшого розвитку систем зв'язку. Радіочастотний діапазон передачі інформаційних даних щільно заповнений, тому актуальним є питання переходу до більш широкого оптичного діапазону для передачі сигналів. Це вимагає розробки та створення нових технічних пристроїв для роботи в оптичному діапазоні, що і проводиться у даній роботі. Оптичні підсистеми здатні розширити можливості радіочастотних систем. Використання електрооптичних модуляторів дозволяє змінювати частоту радіосигналу, забезпечує широку смугу пропускання. Перетворення електричних сигналів в оптичні в оптоволоконних лініях зв'язку забезпечується використанням електрооптичних модуляторів та оптичних конекторів. Тому тема дисертації, щодо розробки та моделювання нанорозмірних модуляторів систем зв'язку, є актуальною. Розробка та створення електрооптичних наномодуляторів, що діють у широкому діапазоні довжин хвиль з малим енергоспоживанням та великою енергоефективністю, необхідна для створенні нових типів радіотехнічних та телевізійних пристроїв та систем, та для їх мініатюризації. Електрооптичні модулятори широко використовуються також у цифровій електроніці та у системах оптичного зв'язку, у складі волоконно-оптичних гіроскопів в навігаційному обладнанні, для електронного управління оптичними лініями зв'язку, у

радіотехнічних пристроях. Суттєве покращення технічних характеристик каналів передачі аналогових і цифрових сигналів забезпечується застосуванням електрооптичних модуляторів. Це також забезпечує електромагнітну сумісність ліній передачі даних.

Таким чином, розробка, моделювання та виготовлення високоефективних широкосмугових, а також вузькосмугових електрооптичних наномодуляторів на основі сучасних двовимірних вуглецевих наноматеріалів є важливим науково-технічним завданням для істотного підвищення надійності та ефективності систем радіозв'язку.

**Структура дисертації.** Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатку.

У вступі обґрунтована актуальність, сформульовані мета та завдання досліджень, наукова новизна та практична цінність, наведено огляд літературних джерел за тематикою досліджень.

У першому розділі дисертації наведені принципи побудови радіотехнічних систем зв'язку з поліпшеними технічними характеристиками. Описуються радіорелейні лінії зв'язку з елементами волоконно-оптичної системи передачі інформації. Поліпшення якості і економічності передачі інформації по лініях зв'язку досягається поєднанням переваг радіорелейних та волоконно-оптичних ліній зв'язку (рис. 1.1.2). Показано, що використання нанорозмірних модуляторів дозволяє на порядок збільшити пропускну здатність волоконно-оптичних каналів передачі даних. При цьому швидкість передачі даних по каналах зв'язку може зрости на порядок. Явище плазмон-поляритонного резонансу дозволяє забезпечити високу концентрацію електромагнітного поля, що дозволяє ефективно поєднувати оптичні елементи з електронними схемами. Представляється важливим, зокрема, розробка у дисертаційній роботі одного з найбільш ефективних модуляторів – електрооптичного модулятора на основі графена.

У другому розділі наведений опис проведених досліджень електрооптичних модуляторів на основі графена. *Найбільш цікавими результатами цього розділу є виготовлення, вивчення та моделювання широкосмугових та вузькосмугових електрооптичних модуляторів на основі графена.* Отримані технологічні вдосконалення, що надають можливість виготовлення структур з перебудовуваними оптичними та електрооптичними властивостями та розмірами у сотні нанометрів. Виготовлені, досліджені та промодельовані широкосмугові та вузькосмугові електрооптичні модулятори на основі графена (рис. 2.1.1.1), що працюють у ближньому інфрачервоному діапазоні і у діапазоні видимого світла. Це стало можливим завдяки новому ефекту твердотілого суперконденсатора, який спостерігався у діоксиді гафнія, виготовленого з використанням системи електронно-променевого напилення. Експериментально визначені транспортні властивості графена, а також діелектрика діоксида гафнія, а також оптичні характеристики електрооптичних модуляторів на основі графена (рис. 2.1.3.1 та 2.1.3.2). Використовуючи ефект суперконденсатора, було виготовлено твердотільні модулятори, що працюють при малих електричних напругах. Створена нова база для виробництва електрооптичних модуляторів на графені, заснована на конфігурації Фабрі-Перо та проведено комп'ютерне моделювання (рис. 2.1.4.3) та отримані експериментальні характеристики таких електрооптичних модуляторів (рис. 2.1.4.4).

У третьому розділі описуються необхідні кроки при виготовленні експериментальних електрооптичних пристроїв. *Найбільш цікавими результатами цього розділу є розробка технології виготовлення електрооптичних модуляторів Фабрі-Перо на основі графена з використанням діелектрика оксида гафнію.* Методом мікромеханічного відшарування отримані моношарові флейки графена та флейки гексагонального нітриду бора (рис. 3.1.1.2). Проведений аналіз піків

збудження різних типів зразків з покриттями з флейків графена за допомогою раманівського спектрометра для визначення з'ясування якості зразків та кількості наявних дефектів. Використовуючи технологію електронно-променевого напилення тонких плівок, техніку перенесення графена на довільну підкладку та метод фотолітографії, були виготовлені інтерферометричний резонатор Фабрі-Перо, широкосмуговий електрооптичний модулятор на основі графена та вузькозонні електрооптичні модулятори Фабрі-Перо на основі графена (рис. 3.1.3.4). У дисертаційній роботі проведено осадження металів та діелектриків методом випаровування електронно-променевим пучком, та проведені дослідження з використанням методів спектроскопічної еліпсометрії та інфрачервоної Фур'є спектроскопії.

**Четвертий розділ** дисертаційної роботи присвячений експериментальним та теоретичним результатам проведених досліджень плазмонних гетероструктур та пристроїв на основі графена. Проведено теоретичне моделювання плазмонних явищ у міді та сріблі з захисним покриттям з графена. Описана методика виготовлення плазмонних пристроїв на основі графена та оптична схема для знаходження характеристичних параметрів виготовлених пристроїв. Проведено теоретичне моделювання та вимірювання плазмонних характеристик матеріалів методом спектроскопічної еліпсометрії (рис. 4.4.7). Для захисту міді та срібла від окиснення та корозії на повітрі та забезпечення експлуатаційних характеристик при роботі відповідних пристроїв, застосований захисний шар з графена.

Створення нанорозмірних електрооптичних модуляторів забезпечувалося розробленим у дисертаційній роботі теоретичним моделювання плазмонних гетероструктур на основі міді, срібла та графена (Розділ 4.2). Наведені результати комп'ютерного моделювання. За допомогою спектроскопічної еліпсометрії було виявлено залежність оптичних параметрів (коефіцієнтів рефракції, відбиття, проходження, а також коефіцієнтів

екстинкції) від довжини хвилі зовнішнього електромагнітного випромінювання. *Найбільш цікавим у цьому розділі є те, що у дисертаційній роботі проведено математичне та комп'ютерне моделювання на основі розроблених моделей, та експериментально визначені параметри для розрахунку оптичних констант (показника заломлення та коефіцієнта екстинкції), а також товщини шарів металів та діелектриків для побудови нанорозмірних електрооптичних модуляторів, захищених графеном.*

**Наукова новизна результатів, отриманих дисертантом.** Отримані автором дисертації наукові результати загалом є новими. Найбільш цікавими з них можна назвати наступні:

1. Вперше дослідженні, змодельовані і виготовлені широкосмугові, а також вузькосмугові електрооптичні наномодулятори поглинання випромінювання на основі графена та інших наноматеріалів з використанням геометрії резонатора Фабрі-Перо, які на відміну від відомих модуляторів мають більш високу ефективність.

2. Вперше встановлено і експериментально підтверджено, що використання у якості діелектрика діоксида гафнію забезпечує ефект суперконденсатора твердого стану і дозволяє спостерігати модуляцію світла від ближнього інфрачервоного до видимого діапазону довжин хвиль, близьких до видимого спектра, з надзвичайно низькими електричними напругами на затворі (близько 4 В), що дозволяє досягти глибини модуляції в режимі передачі 30% на довжині хвилі у 1,1 мкм. Створений модулятор є першим графеновим наномодулятором світла зі значним ефектом модуляції, реалізованим для твердого діелектрика при малих електричних напругах на затворі. Цей результат є новим і важливим для побудови радіотехнічних систем зв'язку з підвищеною ефективністю та пропускною здатністю.

3. Вперше розроблена нова технологія побудови захисного графенового покриття зразків міді, використовуючи геометрію Турбадара-Кречмана-

Райтера, для забезпечення їх робочих плазмонних характеристик та вивчено плазмонні властивості зразків міді, захищених графеном, для збудження та поширення поверхневих плазмон-поляритонів, що дозволяє підвищити експлуатаційні характеристики розроблених наномодуляторів.

4. Вперше розроблена нова технологія для створення захисного графенового бар'єру зразків срібла, що дозволяє захистити срібло від погіршення його характеристик та поліпшити експлуатаційні характеристики електрооптичних наномодуляторів в цілому. Це було підтверджено при спостереженні мінімуму кривої плазмон-поляритонного резонансу з величиною інтенсивності відбитого випромінювання  $R = 5 \cdot 10^{-4}$  на довжині хвилі у 435 нм та при куті падіння світла у  $53,5^\circ$ .

5. Розроблено моделі та проведено теоретичне моделювання, дослідження та виготовлення широкосмугових та вузькосмугових графенових електрооптичних наномодуляторів з подальшим визначенням їх електрооптичних характеристик, а також їх електричне та електрооптичне тестування.

**Наукова та практична цінність роботи,** полягає у наступному:

1. В дисертаційній роботі розроблений та виготовлений перший графеновий електрооптичний наномодулятор світла зі значним ефектом модуляції, реалізований з використанням твердого діелектрика при малих електричних напругах на затворі, що дозволяє створювати нанорозмірні елементи енергоефективних радіотехнічних та телекомунікаційних систем зв'язку з високою пропускнуою здатністю та поліпшеними технічними характеристиками.

2. Для забезпечення необхідних для функціонування приладів плазмонних характеристик срібла, розроблено нову технологію для створення захисного графенового бар'єру зразків срібла, засновану на перенесенні графена на свіжо виготовлені срібні плівки.

3. В дисертаційній роботі розроблено також нову технологію для створення захисного графенового бар'єру зразків міді для забезпечення їх робочих плазмонних характеристик та вивчено плазмонні властивості зразків міді, захищених графеном, для збудження та поширення поверхневих плазмон-поляритонів.

Матеріали дисертаційної роботи впроваджено в учбовий процес Національного авіаційного університету та використані при виконанні держбюджетної НДР № 30/22.01.06 «Новітні методи обробки сигналів і даних в електронних системах» у Національному авіаційному університеті, впроваджені у НВО «Телеоптика».

**Публікації та апробація роботи.** Результати дисертації були апробовані на 19 міжнародних наукових конференціях. Результати дисертації викладені у 26 статях, опублікованих у 12 фахових наукових виданнях та матеріалах 11 міжнародних наукових конференцій.

**Автореферат дисертації** достатньо повно відображає основні положення дисертації та висновки.

**Зауваження та недоліки.** Представляється необхідним зробити деякі зауваження та відзначити певні недоліки, які має дисертаційна робота:

1. В розд. 4 наведено порівняння результатів моделювання та вимірювань оптичних спектрів розсіяння світла на гетероструктурах з резонансними збудженнями плазмонно-поляритонних поверхневих хвиль (відповідні результати зображені, зокрема, на, Рис. 4.4.3, 4.4.7). Судячи з результатів такого порівняння, розроблена теоретична модель є адекватною. Тим не менше, доцільно було більш чітко пояснити теоретичні підходи та наближення, використані при створенні відповідної моделі та окремі питання, зокрема такі. (а) Потрібно було визначити величину  $\theta$  в формулі (4.2.26); (б) варто було прямо вказати, що амплітуди відбитої електромагнітної хвилі та хвилі, що проходить, при розсіянні на багат шаруватих структурах з плазмон-

поляритонними резонансними збудженнями (співвідношення (4.2.26), (4.2.47)), виражаються через елементи матриці передачі, яка, в свою чергу, визначається через добуток матриць передачі, що характеризують окремі шари шаруватої структури; (в) варто було явно вказати, що, як видно зі співвідношень (4.2.1)-(4.2.29), на початку виведення співвідношень (4.2.28, 4.2.29) вважалося, що магнітна проникність середовища залежить від координати  $Z$ , а починаючи зі співвідношень (4.2.24-4.2.29) надалі вважалося, що магнітна проникність вважається незалежною від  $Z$ ; (г) потрібно було вказати, що, незважаючи на включення неоднорідної магнітної проникності до розгляду розсіяння світла на багатошаровій структурі в параграфі (4.2), відповідні кінцеві результати застосовуються до структури з одиничною магнітною проникністю.

2. Варто було вказати, який фізичний зміст «остаточного виразу, який було використано для математичної симуляції у даній дисертаційній роботі, результати якої порівнювалися з експериментальними даними і представлені у розділах 4.4-4.7» (див. с. 151), а саме (4.2.56)?

3. Потрібно було більш детально зупинитися на тому фізичному принципі, який дозволив отримати нові та унікальні властивості модуляторів на структурі «графен-оксид гафнія», включаючи якісне пояснення «ефекту суперконденсатора» (с. 67 та ін).

4. Варто було пояснити вираз (с. 160): «Імпульс падаючого на поверхню призми під певним кутом фотона підсилюється при проходженні крізь скляну призму...». В якому сенсі вживається слово «підсилюється»? Якщо середовище не є активним (підсилюючим), то що саме підсилюється та у порівнянні з чим саме? Що мається на увазі під «певним кутом» і чому цей кут дорівнює та який фізичний зміст цього явища?

5. В роботі та авторефераті є деякі незначні друкарські помилки та неточності при викладенні матеріалу; іноді використовуються невдалі вирази,



наприклад (а) двомірних матеріалів, автореферат, с. 15. (б) Після опису виразу (4.2.37) згадуються величини  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ , які не входять до виразу (4.2.37). (в) Написи в рисунку 3.2.1.1 наведені на англійській мові. (г) На с. 150 наведений вираз “при моделюванні процесів плазмоніки”, замість якого краще було б написати, наприклад «при моделюванні плазмонних ефектів». (д) На с. 147 вище формули (4.2.8) помилково написано «... а інша- від змінної X» замість «... а інша- від змінної Z» та ін.

Проте зазначені зауваження не ставлять під сумнів високий науковий рівень роботи і загальний позитивний висновок, сформульований в кінці даного відгуку.

#### **Висновки по роботі в цілому.**

Дисертаційна робота Д. Е. Азнакаєвої “Дослідження і моделювання нанорозмірних модуляторів” виконана на високому рівні, є закінченою науковою працею, в якій отримані нові, науково обґрунтовані результати в області радіотехнічних пристроїв та систем, які в сукупності розв’язують ряд актуальних практично важливих задач. За своїм змістом дисертація відповідає спеціальності 05.12.17 — радіотехнічні та телевізійні системи. У дисертаційній роботі значна увага зосереджується на питаннях побудови ефективних електрооптичних модуляторів для використання у радіотехнічних та волоконно-оптичних системах зв’язку. Робота ефективно поєднує експериментальні методи та методи чисельного та аналітичного аналізу. Вона також містить результати проведених експериментів. Результати моделювання, проведеного в роботі, якісно та кількісно узгоджуються з експериментальними результатами.

З урахуванням актуальності, новизни, наукового та практичного значення отриманих результатів, вважаю, що дисертаційна робота Азнакаєвої Діани Емірівни «Дослідження і моделювання нанорозмірних модуляторів» є

закінченою науковою роботою, у якій вирішено актуальну наукову задачу, відповідає паспорту спеціальності та вимогам п. п. 9, 11 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567, що висуваються до кандидатських дисертацій. Автор дисертаційної роботи Азнакаєва Діана Емірівна заслуговує присудження їй наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.17 — радіотехнічні та телевізійні системи

Офіційний опонент:

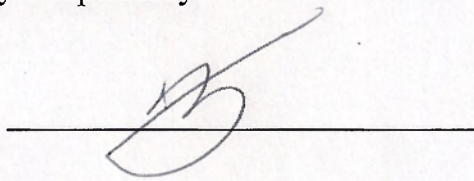
старший науковий співробітник

НДЛ фізики космосу фізичного факультету

Київського національного університету

імені Тараса Шевченка

доктор фіз.-мат. наук



Рапопорт Ю. Г.

Підпис Рапопорта Ю. Г. засвідчую:

