

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний авіаційний університет

**АЗНАКАЄВА Діана Емірівна**

УДК 621.376.32/33-022.532]:006.77-048.34(043.3)

**ДОСЛІДЖЕННЯ І МОДЕЛЮВАННЯ НАНОРОЗМІРНИХ  
МОДУЛЯТОРІВ**

05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному авіаційному університеті Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор,  
**Уланський Володимир Васильович**,  
Національний авіаційний університет,  
професор кафедри електроніки

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор,  
**Уваров Борис Михайлович**,  
Національний технічний університет України,  
«Київський політехнічний інститут  
ім. Ігоря Сікорського», професор кафедри  
радіоконструювання та виробництва  
радіоелектронної апаратури

доктор фізико-математичних наук,  
**Рапопорт Юрій Григорович**,  
Київський Національний університет  
ім. Тараса Шевченка, старший науковий  
співробітник кафедри астрономії та фізики  
космосу

Захист відбудеться «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 201\_ р. о \_\_\_\_\_ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.08 в Національному авіаційному університеті за адресою: 03058, м. Київ, просп. Космонавта Комарова 1, ауд. \_\_\_\_\_.

З дисертацією можна ознайомитись в науково-технічній бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: 03058, м. Київ, просп. Космонавта Комарова 1, корп. 8.

Автореферат розісланий «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 26.062.08,  
доктор технічних наук, професор

Шутко В. М.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

### Актуальність теми

Для передачі сигналів у радіотехнічних та радіоелектронних пристроях та системах використовуються електромагнітні хвилі та пристрої для їх формування, випромінювання, приймання та модуляції. Оскільки радіочастотний діапазон передачі інформаційних даних щільно заповнений, то актуальним питанням є перехід до більш широкого оптичного діапазону для передачі сигналів. Такий перехід вимагає розробки нових методів створення технічних пристроїв для роботи в оптичному діапазоні, що і проводиться у даній роботі. Крім того виникає необхідність дослідження електрооптичних характеристик нових матеріалів таких пристроїв та переходу на нову елементну базу (від кремньової до графенової електроніки) при конструюванні сучасних вискоефективних нанорозмірних радіотехнічних пристроїв. Оптичні підсистеми здатні замінити і розширити можливості радіочастотних підсистем. Використання електрооптичних модуляторів дозволяє підвищувати або знижувати частоту радіосигналу, виконувати одночасно кілька частотних перетворень, забезпечує широку смугу пропускання.

Сучасні тенденції розвитку систем зв'язку передбачають ефективне використання новітніх досягнень в таких областях як наноелектроніка і оптоелектроніка. У наземних радіотехнічних системах антенні пристрої мають у своєму складі цілий ряд відносно простих випромінювачів. В цьому випадку генератори електромагнітних коливань та приймачі приєднуються до антен через такі пристрої як фідери, оптоволоконні лінії, оптичні комутатори та електрооптичні модулятори для перетворення та модуляції електричних сигналів в оптичні сигнали та подальшої їх передачі по оптоволоконним лініям зв'язку. Такі електрооптичні комутуючі пристрої також використовуються для підвищення ємності ліній зв'язку за рахунок розміщення в одній оптоволоконній лінії зв'язку багатьох каналів передачі інформації. Для перетворення електричних сигналів генераторів в оптичні сигнали в оптоволоконних лініях зв'язку використовуються оптичні конвектори та електрооптичні модулятори. Використання електрооптичних модуляторів покращує також вольт-амперну характеристику радіотехнічних пристроїв. Електрооптичні модулятори використовуються також у лазерних системах зв'язку, а також у медичній апаратурі для фокусування малопотужних сигналів для значного підвищення потужності сумарного сигналу при хірургічних впливах на біотканини. Тому тема дисертації спрямована на розробку та оптимізацію нанорозмірних модуляторів систем зв'язку є вельми актуальною. Застосування принципів оптоелектроніки та плазмоніки при створенні нових електрооптичних пристроїв та пошук та використання нових наноматеріалів для їх виробництва є актуальною задачею. Плазмоніка – це швидко зростаюча гілка фотоніки, яка відкриває можливості для створення електронних та фотонних компонентів інтегральних мікросхем і підвищує межу чутливості хімічних та біологічних сенсорів.

Дослідження, моделювання та виготовлення вискоефективних, високопродуктивних широкосмугових, а також вузькосмугових електрооптичних наномодуляторів на основі графена та інших двовимірних наноматеріалів є

актуальною задачею. Знаходження відповідних наноматеріалів з великими значеннями діелектричної проникності для отримання ефекту суперконденсатора є важливим для досягнення енергоефективності електронних компонентів радіотехнічних та телевізійних пристроїв та систем.

Вагомий внесок у дослідження властивостей вуглецевих наноматеріалів внесли вітчизняні вчені Шпак А.П., Стріха М.В., Локтев В.М., Нищенко М.М., Гогоці Ю.Г. та Гогоці А.Г., Гусинін В.П., Уваров В.М., Рапопорт Ю.Г., Кручинін С.П. та ін. Створення електрооптичних наномодуляторів, що діють у широкому діапазоні довжин хвиль електромагнітного випромінювання з малим енергоспоживанням та великою енергоефективністю також представляє значний технічний інтерес при створенні нових типів радіотехнічних та телевізійних пристроїв та систем та для їх мініатюризації. Оптиелектронна техніка і її компоненти активно використовуються у високотехнологічних галузях промисловості. В тому числі в пристроях, що експлуатуються в космосі.

Електрооптичні модулятори використовуються на борту космічних апаратів для модуляції фази та інтенсивності різних джерел випромінювання з різними довжинами хвиль в жорстких умовах космічного простору. Зростаючи ринки оптоволоконних телекомунікаційних систем, висувають підвищені вимоги до більш високих швидкостей модуляції. Електрооптичні модулятори широко використовуються в цифровій електроніці, в системах оптичного зв'язку, в якості селекторів імпульсів, швидкісних електрооптичних перемикачів, оптичних фільтрів для фільтрації сигналів, як елементи інтегрально-оптичних інтерферометрів і волоконно-оптичних гіроскопів в навігаційному обладнанні, для електронного управління оптичними лініями зв'язку. В аналогових і цифрових системах комунікації, волоконно-оптичних датчиках також використовуються електрооптичні модулятори. Їх застосування забезпечує суттєве покращення технічних характеристик каналів передачі аналогових і цифрових сигналів, а також електромагнітну сумісність ліній передачі даних. Крім того, вони також можуть застосовуватися в радіотехнічних пристроях. Застосування різних вуглецевих наноструктур дуже актуально для наноелектроніки. Вони володіють малими розмірами, унікальними електричними, оптичними, магнітними, механічними властивостями і високою хімічною стабільністю, що дуже важливо при конструюванні елементів електронних пристроїв.

Вуглецеві наноструктури, в тому числі графен, використовуються для створення нанорозмірних напівпровідникових приладів з поліпшеними характеристиками і для розробки високопродуктивних компонентів обчислювальної техніки, зокрема комірок пам'яті. Об'єм графенової пам'яті може перевищувати об'єм найбільш використовуваної зараз флеш-пам'яті у 5 разів. Таким чином, дослідження, моделювання та виготовлення високоефективних, високопродуктивних ширококутових, а також вузькосмугових електрооптичних наномодуляторів на основі графена та інших двовимірних наноматеріалів є важливим науково-технічним завданням, рішення якого дозволить істотно підвищити надійність і ефективність систем радіозв'язку.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалася на кафедрі електроніки Національного авіаційного

університету у відповідності до держбюджетної науково-дослідної роботи № 30/22.01.06 «Новітні методи обробки сигналів і даних в електронних системах». Напрямок досліджень пов'язаний з науковою тематикою кафедри електроніки і її навчальними дисциплінами, а саме «Оптоелектронні пристрої та системи», «Математичні методи оптимізації електронних систем», «Основи теорії твердого тіла та квантової електроніки» та з Державною цільовою науково-технічною програмою «Розроблення і створення сенсорних наукоємних продуктів на 2008–2017 роки».

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є дослідження, математичне моделювання та розробка нанорозмірних електрооптичних модуляторів, призначених для підвищення ефективності роботи радіотехнічних систем зв'язку та дослідження електричних та оптичних характеристик цих модуляторів.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні завдання:

1. Дослідити вплив зовнішнього електромагнітного поля на оптичний відгук нанорозмірних гетероструктур на основі графена та інших двовимірних матеріалів завдяки явищу поверхневого плазмон-поляритонного резонансу.

2. Визначити необхідні параметри нанорозмірних електрооптичних модуляторів для підвищення їх енергоефективності та оптимізації їх функціонування.

3. Домогтися максимальної глибини модуляції електромагнітного випромінювання розроблюваними пристроями на телекомунікаційних довжинах хвиль за допомогою помірних електричних напруг.

4. Дослідити залежність глибини модуляції електромагнітного випромінювання розроблюваними пристроями від їх геометричних, структурних, оптичних та електричних характеристик.

5. Розробити схеми ефективних нанорозмірних електрооптичних модуляторів та промоделювати їх роботу для знаходження оптимальних значень їх параметрів.

6. Виготовити нанорозмірні зразки ефективних електрооптичних модуляторів на основі графена та інших двовимірних матеріалів та дослідити їх оптичні та електричні характеристики.

**Об'єктом дослідження** є нанорозмірні наномодулятори на основі графена та інших двовимірних матеріалів з різними геометричними, структурними, оптичними та електричними характеристиками.

**Предметом дослідження** є моделі нанорозмірних модуляторів на основі графена та інших двовимірних матеріалів та їх залежність від зовнішнього електромагнітного випромінювання для створення високоефективних електрооптичних наномодуляторів.

**Методи дослідження.** Для вирішення поставлених завдань у дисертаційній роботі використовуються методи математичного та комп'ютерного моделювання, атомно-силової мікроскопії, скануючої електронної мікроскопії, трансмісійної електронної мікроскопії, рефрактометрії, вольт-амперометрії, спектроскопії поверхневого плазмон-поляритонного резонансу, методи вирощування

нанорозмірних гетероструктур, електронно-променевого напилення тонких плівок за допомогою системи Moorfield, техніка 'wet transfer' перенесення графену на довільну підкладку, метод фотолітографії, використовуючи систему Laser Writer для виготовлення мікрооптичних елементів, та технологія Lift-off.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в наступному:

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

2. Уперше встановлено і експериментально підтверджено, що використання у якості діелектрика діоксида гафнію ( $\text{HfO}_2$ ) 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. Будучи першим графеновим наномодулятором світла зі значним ефектом модуляції, реалізованим для твердого діелектрика при малих електричних напругах на затворі, цей результат представляє новизну для побудови радіотехнічних систем зв'язку з підвищеною ефективністю та пропускнуою здатністю.

3. Уперше розроблена нова технологія побудови захисного графенового бар'єру зразків міді, використовуючи геометрію Турбадара-Кречмана-Райтера, для захисту їх плазмонних характеристик та вивчено плазмонні властивості зразків міді, захищених графеном, для збудження та розповсюдження поверхневих плазмон-поляритонів, що дозволяє підвищити експлуатаційні характеристики розроблених електрооптичних наномодуляторів.

4. Уперше розроблена нова технологія для створення захисного графенового бар'єру зразків срібла для підвищення експлуатаційних характеристик електрооптичних наномодуляторів, яка заснована на ретельному протоколі перенесення графена на свіжо виготовлені плівки срібла, що дозволяє захистити срібло від погіршення його плазмонних властивостей. Це підтверджено спостереженнями 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.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у наступному:

1. 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 з високою пропускнуою здатністю та поліпшеними технічними характеристиками.

2. Розроблено нову технологію для створення захисного графенового бар'єру зразків срібла для захисту їх плазмонних характеристик, що заснований на ретельному протоколі передачі графена на свіжо виготовлені плівки срібла.

3. Розроблено нову технологію для створення захисного графенового бар'єру зразків міді для захисту їх плазмонних характеристик та вивчено плазмонні властивості зразків міді, захищених графеном, для збудження та розповсюдження поверхневих плазмон-поляритонів.

Матеріали дисертаційної роботи впроваджено в навчальний 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 «Телеоптик».

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення і результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, отримані автором самостійно. Список наукових праць дисертанта, в яких викладено основні результати дисертаційної роботи, наведено у списку літератури. В роботах опублікованих у співавторстві, здобувачу належить теоретичний аналіз, розробка моделі та моделювання пристроїв нанорозмірних електрооптичних модуляторів, виготовлення та експериментальне дослідження зразків пристроїв, аналіз та теоретичне обґрунтування одержаних результатів та написання статей, доповідей та тез.

Автором особисто запропоновані і опубліковані:

- формули для розрахунку товщини шару окису міді у плазмонних структурах;
- формули для розрахунку абсолютного та відносного коефіцієнтів відбиття та проходження електромагнітного випромінювання у гетероструктурах;
- формули для визначення значень енергії Фермі у електростатично легованому графені;
- структура нанорозмірного електрооптичного модулятора на основі графена та інших двовимірних матеріалів;
- математичне моделювання нанорозмірних гетероструктур та їх взаємодії з зовнішніми електромагнітними полями;
- виготовлення зразків нанорозмірних електрооптичних модуляторів на основі графена та інших двовимірних матеріалів;
- експериментальні дослідження електричних та оптичних характеристик вироблених нанорозмірних електрооптичних модуляторів з різними геометричними, структурними, електричними та оптичними властивостями;
- метод підвищення глибини модуляції нанорозмірних електрооптичних пристроїв.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на наступних міжнародних конференціях і симпозіумах:

- The 17<sup>th</sup> IEEE International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET 2018), Kyiv, 2018;

- 8<sup>th</sup> Symposium on two-dimensional materials “CARBONHAGEN 2017”, Copenhagen, Denmark, 2017;
- IEEE 6<sup>th</sup> Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS-2017), Kiev, 2017;
- International SPIE Conference “Synthesis and Photonics of Nanoscale Materials XIII”, San Francisco, California, United States, 2016;
- 2<sup>nd</sup> International Conference on Smart Materials & Structures, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 2016;
- 3<sup>rd</sup> Annual International Conference on Optoelectronics, Photonics & Applied Physics, Singapore, 2016;
- 7<sup>th</sup> Symposium on two-dimensional materials “CARBONHAGEN 2016”, Copenhagen, Denmark, 2016;
- IEEE International Conference “Radar Methods and Systems Workshop”, Kyiv, 2016;
- Summer School on nanoScience@Surfaces, Cavendish Laboratory, University of Cambridge, Cambridge, UK, 2016;
- International Conference “Carbonhagen 2012”, Copenhagen, Denmark, 2012;
- IEEE 4<sup>th</sup> Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium “MRRS-2014”, Kiev, Ukraine, 2014;
- IEEE 34<sup>th</sup> International Conference on Electronics and Nanotechnology “ELNANO 2014”, Kiev, Ukraine, 2014;
- 23<sup>rd</sup> European Doctoral School on Metamaterials, Jena, Germany, 2014;
- 5<sup>th</sup> International Conference “Mathematical biology and bioinformatics”, Puschino, Russia, 2014;
- Summer Research Showcase, Manchester University, UK, 2014;
- 22<sup>nd</sup> European Doctoral School on Metamaterials, Fabrication of Metamaterials, Glasgow University, Scotland, UK, 2013;
- IEEE International Conference “MRRS 2013”, Kiev, Ukraine, 2013;
- IEEE International Conference “ELNANO 2013”, Kiev, Ukraine, 2013;
- Міжнародні науково-технічні конференції «ПОЛІТ–2018», «ПОЛІТ–2015» та «ПОЛІТ–2009»: Сучасні проблеми науки, Київ, 2018, 2015 та 2009;
- на міжнародних науково-технічних конференціях “AVIA” та «ПОЛІТ» Національного авіаційного університету та Інституті електроніки та систем управління, Навчально-наукових інститутів аеронавігації, та аеронавігації, електроніки та телекомунікацій, Київ, 2009–2018 р.р.

**Публікації.** За результатами дисертаційної роботи опубліковано 26 наукових робіт в тому числі 5 в іноземних та 7 у вітчизняних фахових реферованих журналах, 3 статті, які додатково відображають наукові результати дисертації, 14 що входять в базу Scopus, 11 статей у матеріалах міжнародних наукових конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел із 174 найменувань. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 192 сторінки. Робота ілюстрована 66 рисунками. Дисертація написана українською мовою.



## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми та необхідність виконання роботи, сформульовано мету та завдання дослідження, визначено об'єкт і предмет дослідження. Показано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведено інформацію щодо апробації результатів.

У **першому розділі** описуються принципи побудови радіотехнічних систем зв'язку з поліпшеними технічними характеристиками. Радіорелейні і супутникові лінії зв'язку – це комплекс обладнання, яке поєднує наземні і орбітальні ретранслятори, які дають можливість транслювати сигнал практично в будь-яку точку планети. Волоконно-оптичний зв'язок є якісно новою технологією передачі інформації на значні відстані без втрати якості сигналу. Завдяки своїй колосальній пропускній здатності, волоконно-оптичні лінії зв'язку не мають аналогів серед інших способів передачі великих обсягів інформації. Об'єднання переваг радіорелейних та волоконно-оптичних ліній зв'язку дозволяє поліпшити якість і економічність процесу передачі інформації по лініях зв'язку (рис. 1). Показана можливість на порядок збільшити пропускну здатність волоконно-оптичних каналів передачі даних при використанні нанорозмірних модуляторів. Швидкість передачі даних по каналах зв'язку при цьому може зрости в 10 разів. Швидкісні малорозмірні електрооптичні модулятори з низькими робочими електричними напругами та низьким споживанням енергії користуються великим попитом у системах передавання інформації. Описаний сучасний стан досліджень у галузі сучасних наноматеріалів для наноелектроніки, плазмоніки та оптоелектронних пристроїв. Сучасні технологічні тенденції полягають у мініатюризації і, як наслідок, розміщенні більшої кількості електричних або оптичних елементів у межах однієї електричної або електрооптичної інтегральної схеми, що, у свою чергу, підвищує ефективність та продуктивність пристрою. Як наслідок мініатюризації існує необхідність в застосуванні електрооптичних явищ у матеріалах розміром менших або порядку декількох мікрометрів.

Одним з шляхів різкого збільшення пропускної спроможності інформаційних каналів і підвищення їх завадостійкості є перехід до оптичного діапазону електромагнітних хвиль з використанням електрооптичних модуляторів. Оптичні властивості матеріалів можуть бути змінені не тільки зміною хімічного складу матеріалу, але й штучним шляхом за рахунок зміни його геометричної конфігурації. Слід зазначити, що у цьому випадку характерний розмір геометричної конфігурації може бути меншим або рівним довжині хвилі зовнішнього опромінювання. Можливість локалізувати високу концентрацію електромагнітного поля за допомогою явища плазмон-поляритонного резонансу відкриває шлях для ефективного поєднання оптичних елементів з електронними схемами.

Одним з найбільш ефективних модуляторів є електрооптичний модулятор на основі графена. Являючи собою двовимірний напівметал, графен має широкий спектр незвичайних характеристик, що не спостерігаються у звичайних напівпровідниках. Серед усіх діелектриків з високим значенням діелектричної проникності діоксид гафнія привернув значну увагу у порівнянні з іншими діелектриками завдяки високій температурі плавлення, механічній стабільності, широкому вікну оптичної прозорості, простоті та керованості фабрикації, а також CMOS сумісності. Величина діелектричної проникності, а також ширина забороненої енергетичної зони діелектрика є ключовими критеріями його застосування в електронній та оптоелектронній промисловості.

У **другому розділі** наведений опис проведених досліджень електрооптичних модуляторів на основі графена. Технологічні вдосконалення в галузі наноелектроніки роблять можливим виготовлення структур з перебудовуваними оптичними та електрооптичними властивостями та розмірами у сотні або декілька нанометрів.

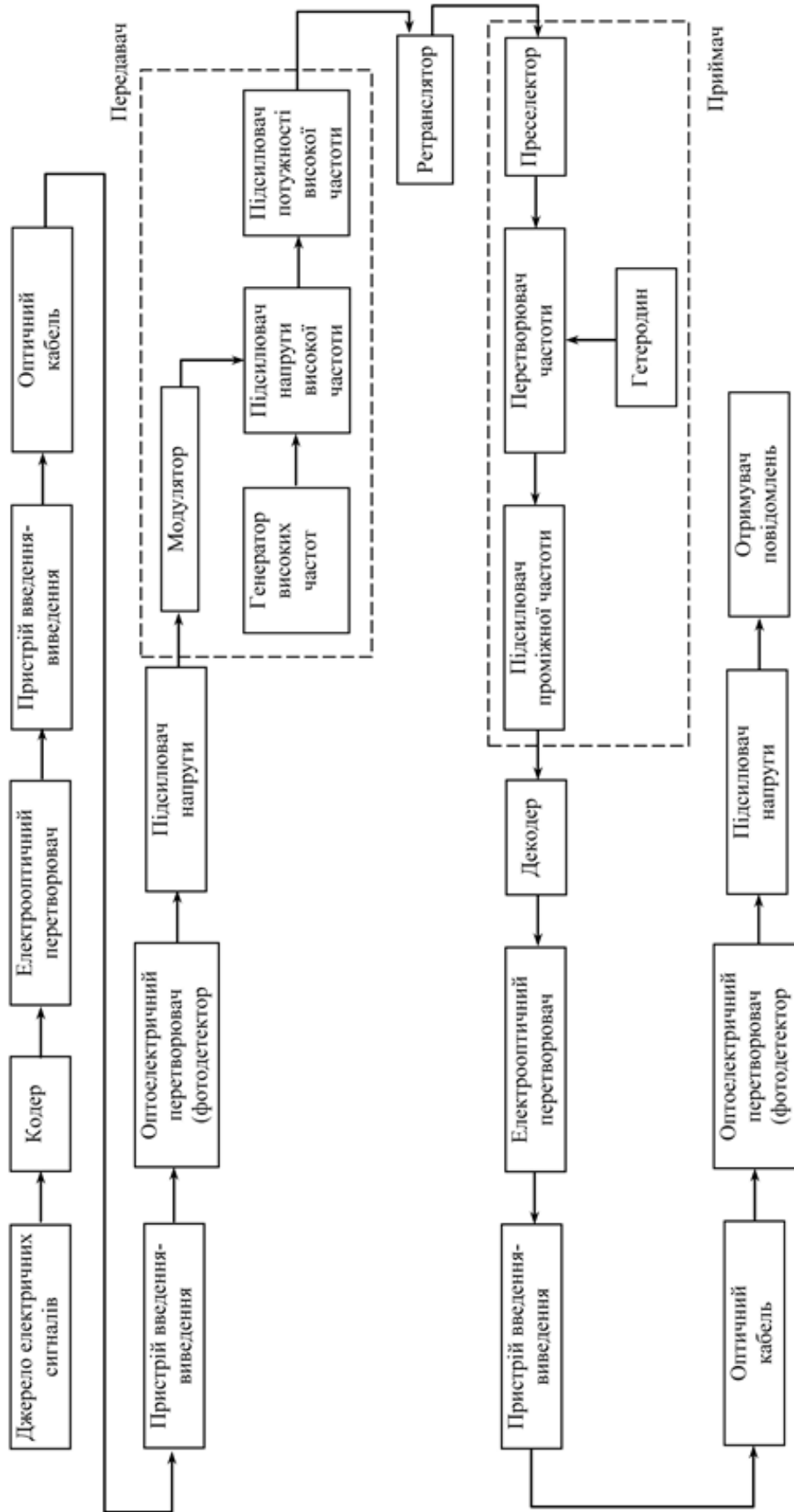


Рис. 1. Структурна схема радіорелейної лінії зв'язку з елементами волоконно-оптичної системи передачі інформації

Цей розділ присвячений виготовленню, вивченню та моделюванню широкосмугових та вузькосмугових електрооптичних модуляторів на основі графена. Найважливіша робота була присвячена виготовленню модуляторів на основі графена, що працюють у ближньому інфрачервоному діапазоні, і навіть у діапазоні видимого світла. При виконанні дисертаційної роботи був виготовлений та досліджений планарний електрооптичний модулятор, де модуляція світла досягалася з використанням одного шару графена. Електрооптичний модулятор представляє собою гетероструктуру, що складається з кварцової підкладки, тонкого шару металу (міді), шарів діелектрика  $\text{HfO}_2$  та графена (рис. 2).

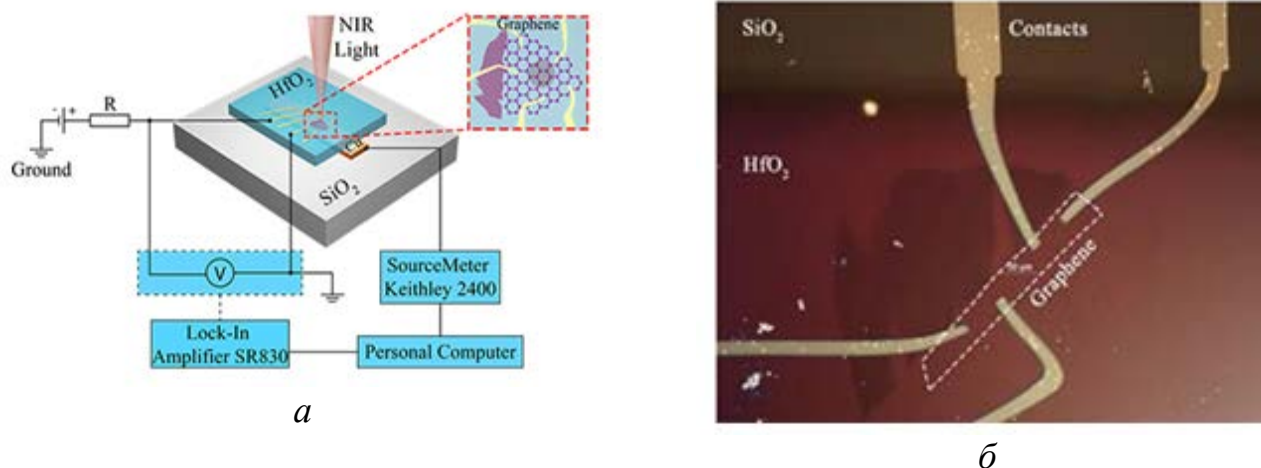


Рис. 2. Схема широкополосного електрооптичного модулятора на основі графена: *а* – схема пристрою. Гетероструктура модулятора складається з кварцової підкладки, мідного дзеркала, діелектричного шару з високим коефіцієнтом діелектричної проникності  $\text{HfO}_2$  та шару графена; *б* – оптичне зображення графенового електрооптичного модулятора, призначеного для роботи на довжині хвилі  $\lambda = 1 \text{ мкм}$

Він має невеликий об'єм  $\sim 5 \text{ мкм}^3$  (порядок малості становить  $\lambda^3/10$ ), працює при низьких напругах електроживлення ( $\sim 1\text{--}3 \text{ В}$ ), має низьке енергоспоживання ( $\sim 1 \text{ нВт}$ ), низькі внутрішні втрати ( $< 10\%$ ) і має широкосмугову модуляцію світла до довжини хвилі  $\lambda = 900 \text{ нм}$ . Цей виготовлений пристрій є CMOS сумісним і може знайти цілий ряд застосувань у радіотехнічній та оптоелектронній промисловостях. Модуляція світла таким модулятором відбувається через електричне керування оптичною провідністю графена за допомогою прикладеної електричної напруги. Показана принципова можливість модуляція світла при довжині хвилі  $900 \text{ нм}$  у широкосмуговому модуляторі та при довжині хвилі  $670 \text{ нм}$  у вузькосмуговому модуляторі. Це стало можливим завдяки новому ефекту твердотільного суперконденсатора, який спостерігався у діоксиді гафнія, виготовленого з використанням системи електронно-променевого напилення Moorfield. Для знаходження характеристик виготовленого графенового електрооптичного модулятора були виконані високочастотні вимірювання за допомогою метода двох зондів.

Для з'ясування механізму впливу затворної електричної напруги на електропровідність графена була виміряна її температурна залежність. Рис. 3 показує ефект електростатичного легування графена, що призводить до зміни

електропровідності графена при низьких та високих температурах. Електростатичне легування графена регулюється подвійним електричним шаром біля шару графена. Це призводить до ефекту суперконденсатора і, отже, до низьких електричних напруг, необхідних для оптичної модуляції сигналу. Проте при зниженій температурі іонна провідність падає, і система переходить до стану з “нормальною” ємністю. Проведене у дисертаційній роботі чисельне моделювання також підтверджує наявність ефекту суперконденсатора. Фактично вироблений пристрій забезпечує значну модуляцію в широкому діапазоні довжин хвиль (від  $\lambda = 900$  нм до більше ніж 2000 нм). Транспортні властивості графена, а також діелектрика діоксида гафнія, були експериментально визначені за допомогою методу двох зондів. Знаходження оптичних характеристик електрооптичних модуляторів на основі графена виконувалося за допомогою спектрометра з перетворенням Фур’є в інфрачервоному діапазоні довжин хвиль (FTIR) Bruker Vertex 80.

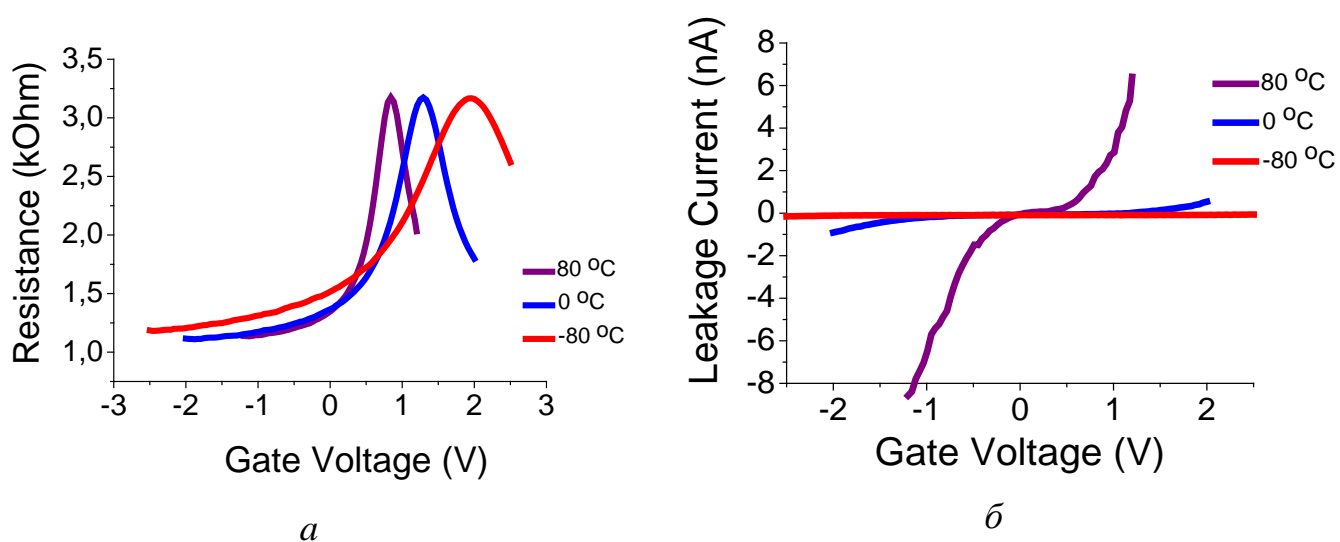


Рис. 3. Електричні властивості модулятора при різних температурах: *a* – залежність електричного опору графена  $R$  від електричної напруги на затворі при температурах  $-80$  °C,  $0$  °C та  $80$  °C; *б* – вимірний електричний струм витoku крізь діелектрик  $\text{HfO}_2$

Оптичне поглинання графена може бути включене або виключене за допомогою електричної напруги на затворі, що веде до зміщення рівня Фермі графена до рівня, нижче якого проявляється блокуючий ефект Паулі, що призводить до того, що графен стає прозорим для електромагнітного випромінювання. У цьому розділі дисертації представлені нові результати, де з використанням діелектрика  $\text{HfO}_2$ , виготовленого методом електронно-променевого наплення, стало можливим не тільки виконувати управління електрооптичними властивостями графена за допомогою невеликих електричних напруг на затворі, але й отримати високу глибину модуляції світла у режимах відбитті та проходження світла на довжинах хвиль  $\lambda = 1,5$  мкм,  $1,1$  мкм і навіть  $0,7$  мкм. Запропонована у дисертації нова база для електрооптичних модуляторів на графені заснована на конфігурації Фабрі-Перо. Завдяки багаторазовому відбиттю світла

всередині оптичного резонатора з гетероструктури, взаємодія речовини зі світлом істотно збільшилася, що надало можливість посилити ефект модуляції. Крім того, використання діелектрика  $\text{HfO}_2$  з високим значенням діелектричної проникності дозволяє проводити значне електростатичне легування графена. Спеціально оптимізуючи товщину нижнього металевого електрода, можна регулювати роботу модулятора або у режимі відбиття електромагнітного випромінювання та у режимі проходження електромагнітного випромінювання, або лише тільки у режимі відбиття електромагнітного випромінювання.

Оптичні спектри вимірювалися за допомогою спектрометра з перетворенням Фур'є Bruker Vertex 80 та з мікроскопом Hyperion 3000. Результати вимірювань електрооптичного модулятора на графені, який працює на телекомунікаційній довжині хвилі у 1,55 мкм, зображені на рис. 4.

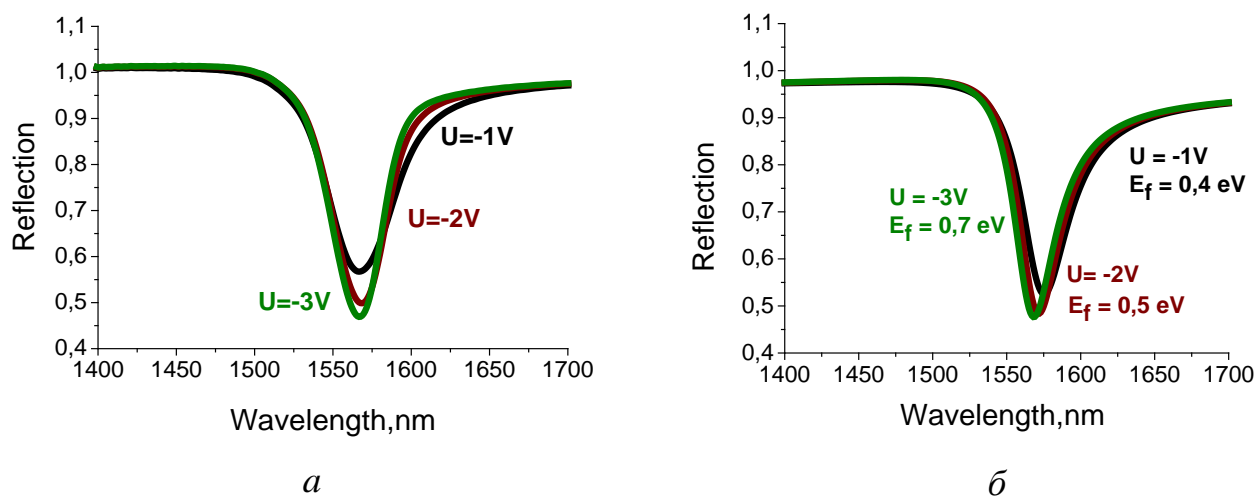


Рис. 4. Вплив електричної напруги на затворі електрооптичного модулятора на графені на зміну резонансної довжини хвилі резонатора: *a* – вихідні експериментальні значення амплітуди світлової хвилі відбитої від електрооптичного модулятора на графені при різних значеннях електричної напруги на затворі; *б* – результати комп'ютерного моделювання у випадку абсолютної величини відбитого світла від пристрою при різних значеннях електричної напруги на затворі

Використовуючи ефект суперконденсатора було виготовлено твердотільні модулятори, що працюють при малих електричних напругах. Були запропоновані різні конфігурації електрооптичних модуляторів, які дозволяють збільшити взаємодію графена з електромагнітним випромінюванням. Запропонована у дисертаційній роботі нова база для електрооптичних модуляторів на графені заснована на конфігурації Фабрі-Перо. Структура електрооптичного модулятора була оптимізована для роботи у режимі відбиття електромагнітного випромінювання шляхом вибору товщини нижнього мідного електрода у 70 нм, а товщини верхнього мідного електрода у 30 нм. Отримані електрооптичні спектри нашого приладу показують глибину модуляції у режимі відбиття електромагнітної хвилі у 20 % при електричній напрузі на затворі від -1 В до -3 В. Оскільки графен є електростатично керованим прикладеною до затвору електричною напругою, то положення резонансної кривої резонатора Фабрі-Перо змінюється. Це пов'язано з

залежністю комплексної діелектричної проникності графена від прикладеної електричної напруги.

При прикладанні електричної напруги до графена значення його енергії Фермі змінюється через зміну концентрації заряджених частинок. Оскільки енергія Фермі графена змінюється, то змінюється також і комплексна діелектрична проникність графена, а також його оптична провідність.

При зміні значення комплексної діелектричної проникності графена змінюється і значення його комплексного коефіцієнта заломлення, що, згідно з наведеною математичною моделлю у розділі 4.2 дисертаційної роботи, призводить до зміни оптичної відповіді та коефіцієнтів відбиття та проходження електромагнітної хвилі крізь речовину при прикладанні електричної напруги до графена. Отже значення резонансної довжини хвилі резонатора змінюється до тих пір, доки графен стає достатньо легованим і досягаються умови для прояву блокування Паулі.

Характер цієї зміни зображений на рис. 5, де результати комп'ютерного моделювання представлені поряд з отриманими експериментальними даними. Результати іншого пристрою, що працює на довжині електромагнітної хвилі близько 1,1 мкм, як у режимі відбиття та і у режимі проходження електромагнітного випромінювання, показані на рис. 5.

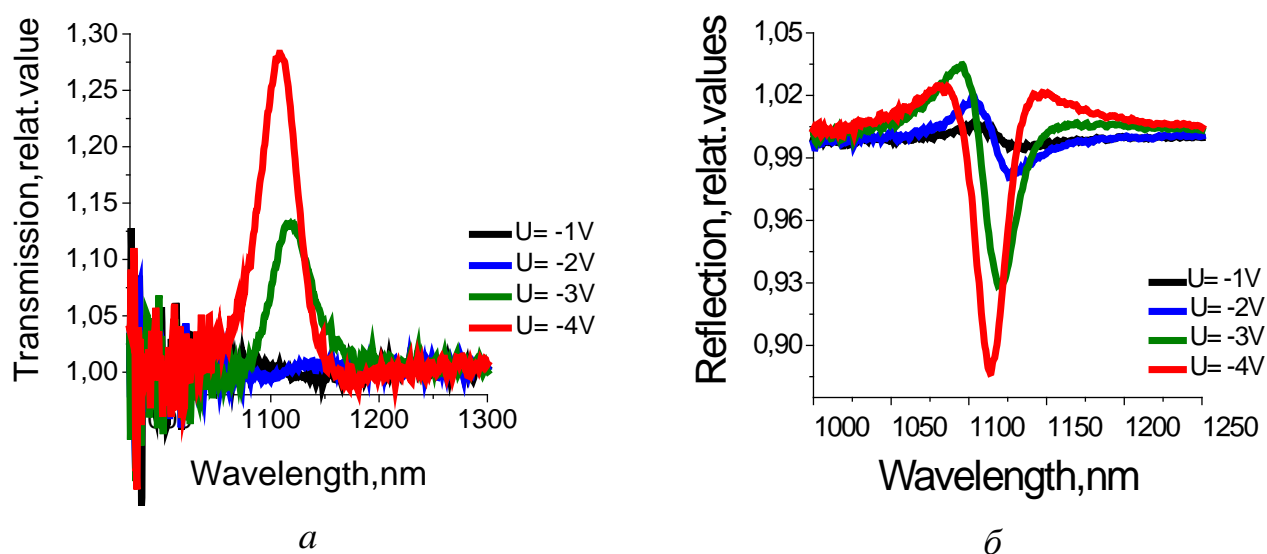


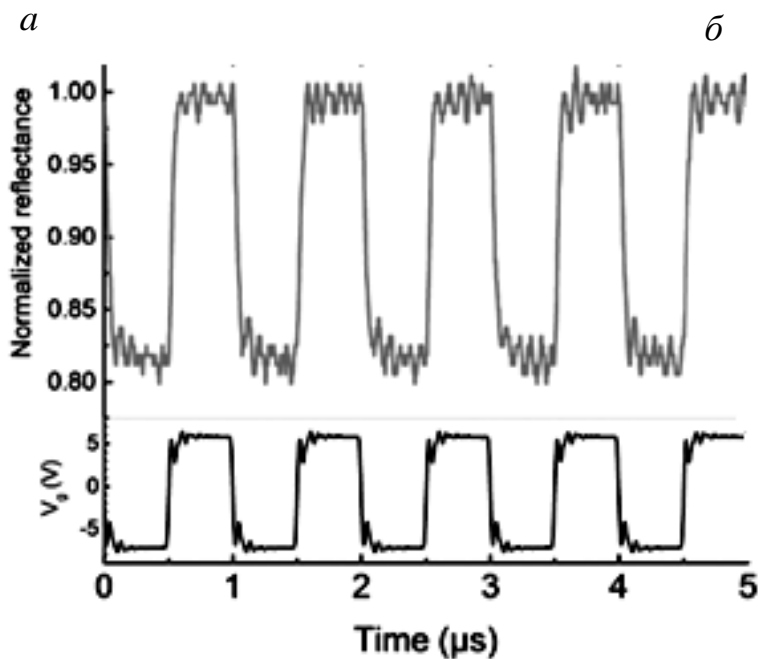
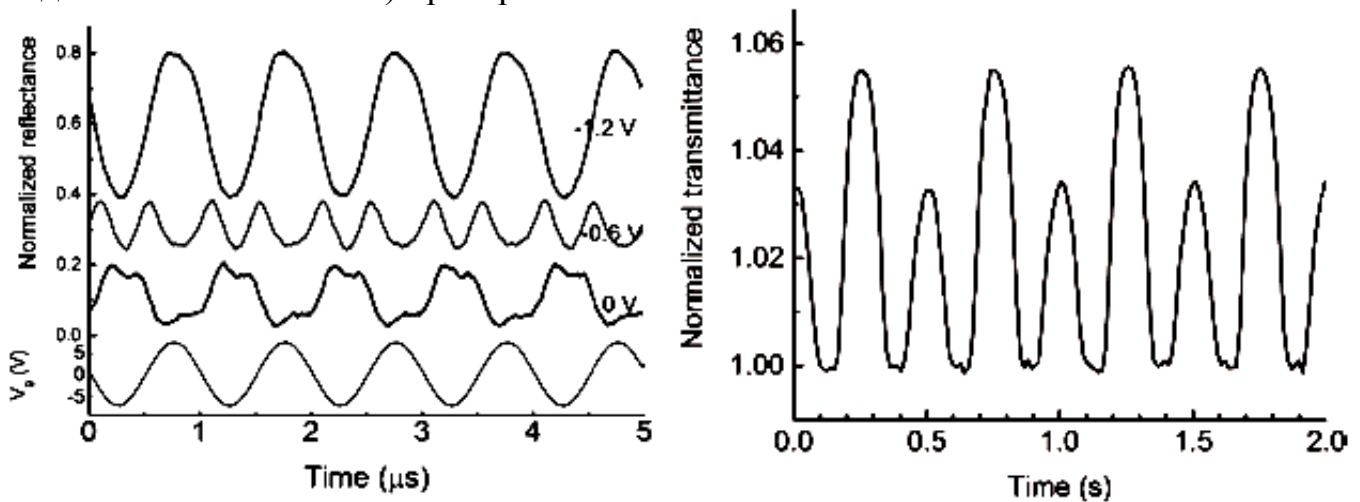
Рис. 5. Характеристики модулятора Фабрі-Перо: *a* – відносна зміна коефіцієнта пропускання пристрою, розробленого для роботи на довжині хвилі 1,1 мкм при різних електричних напругах на затворі відносно 0 В; *б* – відносна зміна коефіцієнта відбиття пристрою, розробленого для роботи на довжині хвилі 1,1 мкм при різних електричних напругах на затворі відносно 0 В

У режимі відбиття електромагнітного випромінювання глибина модуляції дорівнювала 13 %, тоді як у режимі проходження електромагнітного випромінювання глибина модуляції зростала до 30 %. Нарешті, пристрій на основі резонатора Фабрі-Перо, що працює на довжині хвилі біля 830 нм у режимі проходження електромагнітного випромінювання, діє як смуговий фільтр.

Вигляд високочастотної модуляції розробленого електрооптичного модулятора наведений на рисунку б на довжині електромагнітної хвилі 1571 нм. На



рис. 6 наведена модуляція пропускання білого світла (відфільтрованого резонансом на довжині хвилі 830 нм) пристроєм.



*в*

Рис. 6. Вигляд високочастотної модуляції розробленого електрооптичного модулятора: *a* – модуляція відбитого електромагнітного випромінювання на довжині хвилі 1571 нм. Синусоїдальна функція з частотою 1 МГц та пік-до-піку амплітудою від 16 В при різних значеннях електричної напруги зміщення на затворі; *б* – модуляція пропускання білого світла пристроєм. Електрична напруга синусоїдальної форми з частотою 2 Гц та амплітудою пік-до-піку 8 В прикладена до верхнього та нижнього затворів; *в* – модуляція прямокутним сигналом

Електрична напруга синусоїдальної форми з частотою 2 Гц та амплітудою 4 В прикладена до верхнього та нижнього затворів.

У **третьому розділі** описуються кроки при виготовленні експериментальних електрооптичних пристроїв на основі явища поверхневих плазмон-поляритонних збуджень. Плазмони – це квантовані колективні коливання електронів у металі. Поверхневі плазмон-поляритони на металевих поверхнях розділу середовищ

можуть бути збуджені падаючим випромінюванням при ретельно підібраних поляризації падаючого випромінювання та геометрії поверхні металу. Коли вектор напруженості магнітного поля  $H$  електромагнітної хвилі є нормальним до площині падіння світла, то електромагнітна хвиля називається ТМ-хвилею. Коли вектор інтенсивності електричного поля  $E$  електромагнітної хвилі орієнтований нормально до площини падіння світла, то ми маємо так звану ТЕ-хвилю. Взаємодія електромагнітної хвилі з середовищами може бути описана за допомогою рівнянь Максвелла. Використовуючи метод мікромеханічного відшарування отримані графенові моношарові флейки та флейки гексагонального нітриду бора. Для аналізу піків збудження різних зразків з покриттями з флейків графена застосовувався раманівський спектрометр. Визначаючи положення, ширину та інтенсивність піків раманівського спектра, з'ясуувалась якість зразків та кількості наявних дефектів у досліджуваних зразках.

Використовуючи технологію електронно-променевого напилення тонких плівок за допомогою системи Moorfield, техніку 'wet transfer' для перенесення графена на довільну підкладку, метод фотолітографії, застосовуючи систему Laser Writer для виготовлення мікрооптичних елементів та технологію Lift-off були виготовлені інтерферометричний резонатор Фабрі-Перо, ширококутовий електрооптичний модулятор на основі графена та вузькокутові електрооптичні модулятори Фабрі-Перо на основі графена (рис. 7).

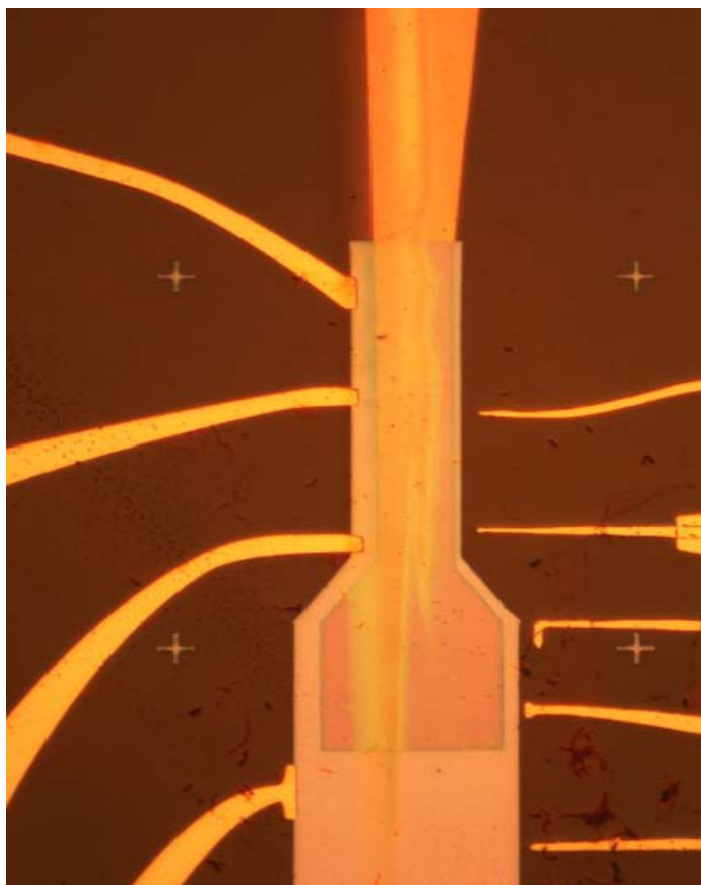


Рис. 7. Оптичне зображення вироблених електрооптичних модуляторів Фабрі-Перо на основі графена. Представлений зразок складається з двох електрооптичних модуляторів



В даний час існує кілька добре розроблених методів для виробництва графена та інших двомірних матеріалів. Це мікромеханічне відшарування, хімічне осадження парів, з рідкої фази і термічне відшарування, а також епітаксіальне вирощування на субстраті з карбїду кремнію. Мідь є таким металом, що переважно використовується в якості такої каталітичної підкладки, оскільки розчинність і дифузія атомів вуглецю у міді нижче порівняно з іншими матеріалами підкладок. При виконанні дисертаційної роботи було широко використано осадження металів та діелектриків методом випаровування електронно-променевим пучком, методи спектроскопічної еліпсометрії та інфрачервоної Фур'є спектроскопії.

У четвертому розділі наведені експериментальні та теоретичні результати проведених досліджень плазмонних гетероструктур та пристроїв на основі графена. Розроблена математична модель та проведено теоретичне моделювання плазмонних процесів.

Розглянемо поширення ТЕ-хвилі через багат шарове середовище, вважаючи що її вектори  $\mathbf{E}$  та  $\mathbf{H}$  мають компоненти у та  $z$  у площині падіння електромагнітної хвилі, де вісь  $z$  направлена нормально до поверхні середовища. Тоді, з рівнянь Максвелла можна отримати:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 E_x}{dy^2} + \frac{d^2 E_x}{dz^2} + n^2 k_0^2 E_x &= \frac{d(\ln \mu)}{dz} \frac{dE_x}{dz}; \\ H_y &= V(z) \exp(i(k_0 a y - \omega t)); \\ H_z &= W(z) \exp(i(k_0 a y - \omega t)), \end{aligned} \quad (1)$$

де  $n^2 = \epsilon \mu$  та  $k_0 = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ ,  $\omega$  – частота електромагнітної хвилі,  $t$  – час. Функції,  $V(z)$ ,

$W(z)$  залежать від матеріалів середовища та кута падіння випромінювання на поверхню металу.

Характеристичну матрицю поперечно-електричної ТЕ-хвилі отримаємо з розв'язку рівнянь Максвелла у вигляді

$$M_s(z) = \begin{pmatrix} \cos(k_0 n z \cos \Theta) & -\frac{i}{p} \sin(k_0 n z \cos \Theta) \\ -ip \sin(k_0 n z \cos \Theta) & \cos(k_0 n z \cos \Theta) \end{pmatrix}, \quad (2)$$

де  $k_0$  – хвильовий вектор фотона,  $n$  – коефіцієнт заломлення середовища,  $z$  – товщина середовища,  $\Theta$  – кут заломлення променя у середовищі,  $\epsilon_1, \mu_1$ , описують середовище, на яке електромагнітна хвиля спершу потрапляє, падаючи на багат шарову структуру,  $\epsilon_l, \mu_l$  – діелектрична та магнітна проникності останнього шару, з якого виходить промінь,  $\Theta_1$  – кут падіння електромагнітної хвилі,  $\Theta_l$  – кут проходження електромагнітної хвилі крізь багат шарову систему,  $p = \sqrt{\epsilon / \mu} \cos \theta$ .

Отримана характеристична матриця має важливе значення, оскільки з її допомогою можна описати поширення світла через багат шарову структуру та обчислити зміну фази, а також коефіцієнти відбиття та проходження світла.  $r_s$  та  $t_s$  – амплітуди відбитої та прохідної електромагнітної хвилі описуються формулами

$$\begin{aligned} r_s &= \frac{(m_{11} + m_{12}p_l)p_1 - (m_{21} + m_{22}p_l)}{(m_{11} + m_{12}p_l)p_1 + (m_{21} + m_{22}p_l)}; \\ t_s &= \frac{2p_1}{(m_{11} + m_{12}p_l)p_1 + (m_{21} + m_{22}p_l)}, \end{aligned} \quad (3)$$

де  $m_{11} = m_{22} = \cos\beta$ ,  $m_{12} = -i/p \sin\beta$ ,  $m_{21} = ip \sin\beta$ ,  $\beta = 2\pi/\lambda \cdot nz \cos\theta$ , де  $\beta$  характеризує зміну фази електромагнітної хвилі при проходженні крізь кожен шар багат шарової структури,  $\lambda$  – довжина хвилі світла,  $n$  – показник заломлення шару речовини,  $z$  – товщина шару,  $\Theta$  – кут рефракції,  $p_l = \sqrt{\varepsilon_l/\mu_l} \cos\theta_l$ ,  $p_l$  – хвильова провідність,  $l$  – номер шару речовини. Отже, амплітуди відбитої  $R_s$  та прохідної  $T_s$  електромагнітних хвиль можуть бути виражені як  $R_s = |r_s|^2$  та  $T_s = \frac{p_1}{p_l} |t_s|^2$ .

Для моделювання проходження поперечно-магнітної ТМ-хвилі крізь багат шарове середовище отримані схожі формули, у яких треба замінити параметри  $p_l$  на параметри  $q_l$ , де  $q_l = \sqrt{\mu_l/\varepsilon_l} \cos\theta_l$ ,  $q_l$  – хвильовий опір. Вираз параметра  $\Psi$ , що описує зміну коефіцієнтів відбиття електромагнітної хвилі визначається як  $\Psi = \text{atan}(r_p/r_s)$ .

Проведено також теоретичне моделювання плазмонних явищ у міді та сріблі захищених покриттям з графена. Застосування таких гарних для плазмоніки матеріалів як мідь або особливо срібло стримується їх швидким окисненням при контакті з повітрям. Ситуація ускладнюється тим, що ці метали у рідинах сприяють прискоренню хімічних реакцій, що приводять до корозії цих металів. Проте ці вузькі місця цих матеріалів можна подолати, використовуючи одну з неймовірних властивостей графена, а саме властивість непроникності, для створення захисних покриттів матеріалів плазмоніки. Забезпечуючи захист металів від корозії, їх можна використовувати як датчики та активні компоненти у плазмонних та оптоелектронних пристроях. Точність застосувань цих матеріалів при створенні нанорозмірних електрооптичних модуляторів забезпечувалася розробленим у дисертаційній роботі теоретичним моделювання плазмонних гетероструктур на основі міді та срібла.

Було також здійснено теоретичне моделювання плазмонних гетероструктур на основі графена. Моделювана багат шарова система складалася з діелектричної скляної підкладки з шарами хрому (Cr), міді (Cu) та графена, розташованих на її

поверхні. Для моделювання процесу окиснення додатковий шар оксиду міді був доданий до модельованої структури. Результат моделювання спектра для структури Glass@Cr (1.5 nm)@Cu (42.5 nm)@CuO (1 nm)@Graphene (0.335 nm), представлений на рис. 8.

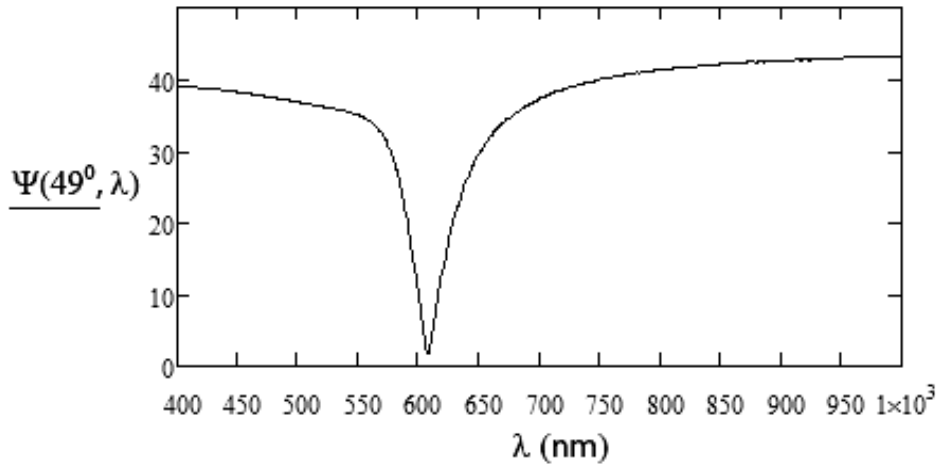


Рис. 8. Результати комп'ютерного моделювання оптичного спектра поверхневих плазмон-поляритонних збуджень для гетероструктури Glass @ Cr @ Cu @ CuO @ Graphene при куті падіння світла у  $49^\circ$

Результати моделювання збудження поверхневих плазмон-поляритонних хвиль у зразку міді захищеного графеном для гетероструктури Glass @ Cr @ Cu @ CuO @ Graphene, розміщеної в атмосферному середовищі, представлені на рис. 9.

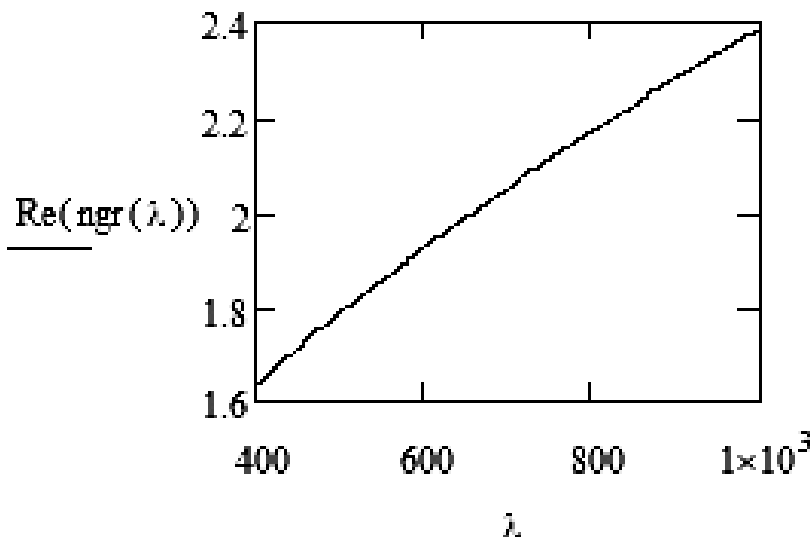


Рис. 9. Залежність реальної частини показника заломлення графена від довжини хвилі  $\lambda$  падаючого електромагнітного випромінювання для гетероструктури Glass @Cr @Cu @CuO @ Graphene

Описана методика виготовлення плазмонних пристроїв на основі графена та оптична схема для знаходження характеристичних параметрів виготовлених пристроїв. Досліджені явища плазмоніки, проведено їх вимірювання за методом

спектроскопічної еліпсометрії та їх теоретичне моделювання. Досліджений захист графеном плазмонних властивостей матеріалів біосенсоріки. Визначена чутливість поверхневого плазмонного резонансу плазмонних матеріалів захищених графеном.

Досліджено застосування захищеної графеном міді у плазмонних хвилеводах. Порівняння результатів експерименту та чисельного моделювання представлено на рис. 10.

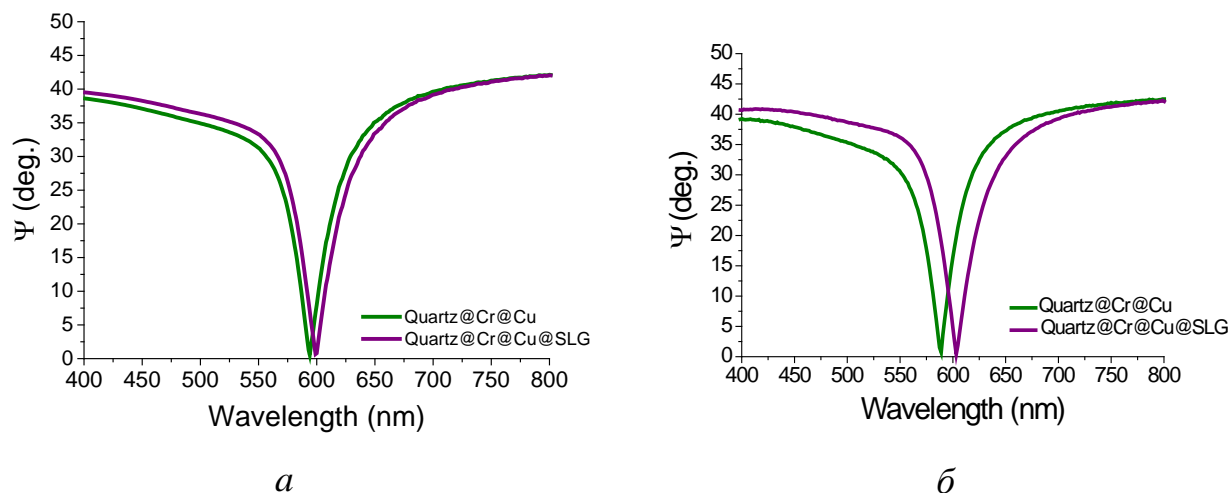


Рис. 10. Порівняння результатів моделювання *a)* та експериментальних *б)* даних для еліпсометричного параметра  $\Psi(\theta, \lambda)$ , що залежить від довжини електромагнітної хвилі збудження  $\lambda$  у зразках Cu, SLG, Cu@SLG оточених повітрям, при куті падіння променя світла у  $49^\circ$

У результаті моделювання знайдені значення таких параметрів як товщина плівки оксиду міді та кут падіння світла на зразок, при яких досягається мінімальне значення еліпсометричного параметра  $\Psi(\theta, \lambda)$ , що є показником виникнення явища плазмон-поляритонного резонансу.

За допомогою Woollam спектроскопічної еліпсометрії було виявлено залежність оптичних параметрів (коефіцієнтів рефракції, відбиття, проходження, а також коефіцієнтів екстинкції) від довжини хвилі зовнішнього електромагнітного випромінювання. Також у роботі вдалося створити модель і знайти відповідні та точні параметри для розрахунку оптичних констант та товщини різних металів та діелектриків для побудови нанорозмірних електрооптичних модуляторів, захищених графеном.

У **висновках** коротко викладені найбільш важливі отримані наукові та практичні результати дисертаційної роботи.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-прикладну задачу, яка має важливе наукове та практичне значення і полягає у дослідженні, моделюванні, розробці та виготовленні високоефективних, високопродуктивних широкосмугових, а також вузькосмугових електрооптичних наномодуляторів на основі графена та інших двовимірних наноматеріалів, а також в розробці математичних

моделей процесів збудження електромагнітних хвиль у шаруватих, гетерогенних та активних нанорозмірних середовищах, знаходження можливостей управління електрооптичними процесами у таких середовищах за допомогою зовнішніх електричних полів.

Отримано такі основні результати і висновки:

1. Досліджені і протестовані прості, ефективні і мало енерговитратні електрооптичні модулятори на основі графена, що працюють на довжинах електромагнітних хвиль ближнього інфрачервоного діапазону. Глибина модуляції у 30% була досягнута при довжинах електромагнітних хвиль  $\lambda = 1,5$  мкм, а також була показана принципова можливість модуляції електромагнітного випромінювання на довжині хвилі  $\lambda = 1$  мкм. При цьому на затвор гетероструктури графена досить прикласти електричну напругу тільки в декілька вольт.

2. Виявлений ефект суперконденсатора, який спостерігався у діелектрику діоксида гафнія з високим значенням діелектричної проникності, дозволив виготовити надзвичайно прості КМОП сумісні, телекомунікаційні електромодулятори зі значним коефіцієнтом модуляції, низьким енергоспоживанням та малим об'ємом резонатора. Цей ефект суперконденсатора є корисним при створенні нових радіотехнічних та оптоелектронних пристроїв.

3. Використання резонаторів з геометрією Фабрі-Перо, що складаються з металевих дзеркал та діелектриків діоксида гафнія, дозволило побудувати енергоефективні електрооптичні модулятори на основі графена, що працюють при малих електричних напругах у діапазоні електромагнітних хвиль наближеному до діапазону видимого світла.

4. У дисертації встановлена здатність покриття з графена захищати плівки з золота та срібла у гетероструктурах нанoeлектронних пристроїв від шкідливого впливу факторів навколишнього середовища та окиснення, та погіршення їх електрооптичних характеристик. Запропоновано також використання гексагонального нітриду бора у радіотехнічних пристроях у якості захисного покриття. Це значно здешевлює виготовлення радіотехнічних та оптоелектронних пристроїв.

5. Встановлена можливість управління зміщенням рівня Фермі при прикладанні невеликої електричної напруги до затвору у гетероструктурних пристроях для покращення їх електрооптичних характеристик.

Результати дисертаційної роботи можуть бути використані для фундаментальних досліджень шаруватих, гетерогенних і активних нанорозмірних середовищ, процесів електромагнітних збуджень в таких нанорозмірних матеріалах. Розроблені математичні моделі та проведені експериментальні дослідження процесів збудження у шаруватих, гетерогенних і активних нанорозмірних середовищах можуть бути використані для розробки перспективних енергоефективних електрооптичних наномодуляторів для створення удосконалених систем обробки сигналів, створення оптичних процесорів, розробки високочутливих сенсорів для біомедичних та технічних цілей, удосконалення систем міжсупутникового зв'язку, геоспостереження та навігації.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Опубліковано у наукових фахових виданнях:

1. Aznakayeva D. E., Rodriguez F. J., Marshall O. P., et. al., Graphene light modulators working at near-infrared wavelengths, *Optics Express*, 25 (9), pp. 10255–10260, 2017.
2. Rodriguez F. J., Aznakayeva D. E., Marshall O. P., et. al., Solid-state electrolyte gated graphene in optical modulators, *Advanced Materials*, 10.1002, 2017, pp. 1–6.
3. Aznakayev E. G., Aznakayeva D. E. Physical bases of optical microscopy, polarimetry, refractometry and electron microscopy, pp. 35–60. – In book: *Biomedical Engineering*: NAU Publ., Kyiv, 2017. – 392 p.
4. Aznakayev E. G., Aznakayeva D. E. Physical bases of thermography, spectrophotometry and spectroscopy, pp. 61–83. – In book: *Biomedical Engineering*: NAU Publ., Kyiv, 2017. – 392 p.
5. Ansell D., Thackray B., Aznakayeva D. E., et. al., Hybrid graphene plasmonic waveguide modulators. – In book: *Synthesis and Photonics of Nanoscale Materials XIII*, San Francisco, California, USA: SPIE, 2016, pp. 97370B-1–97370B-13.
6. Aznakayeva D. E., Rodriguez F., Marshall O., et. al., Graphene-based electro-optical modulator operating at telecommunication wavelength range. – In book: *Smart Materials & Structures*, Philadelphia, Pennsylvania, USA: SPIE, 2016, p. 53. (DOI:10.4172/2169-0022.01.034).
7. Aznakayeva D. E., Rodriguez F., Marshall O., et. al., Graphene-based electro-optical modulator operating at telecommunication wavelength range. – Proc. of 3rd Annual Intern. Conf. on Optoelectronics, Photonics & Applied Physics, Singapore, 2016, pp. 20–23.
8. Aznakayev E. G., Aznakayeva D. E., Melnikov D. E.: Electroluminescence Modulation Effect in Nanocomposites from Ferroelectric Materials: Electronics and Nanotechnology. – In book: *Electronics and Nanotechnology “ELNANO 2014”*: IEEE, Kiev, Ukraine, 2014, pp. 105–109. (DOI: 10.1109/ELNANO.2014. 6873947).
9. Aznakayev E. G., Aznakayeva D. E.: Excitation Processes Modeling in Two-Layer Graphene. – In book: *Electronics and Nanotechnology “ELNANO 2013”*: IEEE, Kiev, Ukraine, 2013, pp. 195–199. (DOI: 10.1109/ELNANO.2013. 6552098).
10. Нищенко М. М., Михайлова Г. Ю., Азнакаева Д. Э., и др. Влияние циклической деформации на электропроводность массива углеродных нанотрубок, *Металлофизика и новейшие технологии*, 2011, т. 33, № 10, с. 1307–1314.
11. Азнакаева Д. Э., Нищенко М. М., Михайлова Г. Ю. и др. Аномалии электросопротивления ориентированных углеродных нанотрубок при циклической деформации, *Металлофизика и новейшие технологии*, 2011, т. 33, №9, с. 1209–1216.
12. Нищенко М. М., Приходько Г. П., Шевченко М. Я., Азнакаева Д. Е. та ін. Електричні і термоелектричні властивості композиту  $\text{LaNi}_5$  з вуглецевими нанотрубками, *Наукоємні технології, Національний авіац. ун-тет*, 2011, № 3/4 (11–12), с. 93–98. DOI: 10.18372/2310-5461.11.5183.

та додатково відображено у публікаціях:

13. Aznakayeva D. E., Yakovenko I. A., Aznakayev E. G. Passive Acoustic Graphene Nanosensor Modeling. – In book: Radar Methods and Systems Workshop: IEEE, Kiev, 2016, pp. 91–94. (DOI: 10.1109/RMSW.2016.7778558).

14. Aznakayeva D. E., Yakovenko I. A., Aznakayev E. G. Numerical Calculation of Passive Acoustic Graphene Nanosensor Parameters. – In book: Radar Methods and Systems Workshop.: IEEE, Kiev, 2016, pp. 95–98. (DOI: 10.1109/RMSW.2016.7778559).

15. Aznakayev E. G., Aznakayeva D. E. Classification, Identification and Detection of Biological Agents with Graphene Nanosensor. – In book: Microwaves, Radar and Remote Sensing “MRRS-2014”: IEEE, Kiev, 2014, pp. 107–110. (DOI: 10.1109/MRRS.2014.6956676).

опубліковано в матеріалах конференцій:

16. Borodii T. V., Aznakayeva D. E., Aznakayev E. G. Passive Acoustic Graphene Nanosensor Construction. – Proc. of the 6th Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS-2017), Kiev, 2017, pp. 176–180. (DOI: 10.1109/MRRS.2017.8075057).

17. Азнакаєва Д. Е. Використання електрооптичних модуляторів в радіотехнічних та навігаційних системах. – Матеріали міжнарод. наук.-практ. конф. молод. учених і студентів. «Політ. Сучасні проблеми науки. 2018», Національний авіац. ун-тет, Київ, 2018, с. 49–50.

18. Bidnyi N. S., Aznakayev E. G., Aznakayeva D. E., Borodii T. V. Object Detection with Passive Acoustic Graphene Nanosensor. – Proc. of the 6th Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS-2017), Kiev, 2017, pp. 181–184. (DOI: 10.1109/MRRS.2017.8075058).

19. Aznakayeva D. E., Melnikov D. E. Electroluminescence modulation effects in ferroelectric based nanocomposites. – Poster Presentation at Summer School on nanoScience@Surfaces, Cavendish Laboratory, University of Cambridge, Cambridge, UK, No. P38, 2016.

20. Aznakayeva D. E., Aznakayev E. G., Yakovenko I. A. Graphene Nanosensor Construction for Environmental and Biological Application. – Intern. 7th Symposium on Carbon and Related Nanomaterials Carbonhagen 2016, Abstract No. 36, Copenhagen, Denmark, 2016.

21. Aznakayeva D. E., Mihaylova G. J., Nischenko M. M. Experimental Investigation of Carbon Nanotubes Composites' Mechanical, Electrical and Optical Properties. – Proc. Intern. Conf. Carbonhagen 2012, Copenhagen, Denmark, 25–26 June, 2012, p. 43.

22. Азнакаев Э. Г., Азнакаева Д. Э. Детектирование биологических агентов с помощью наносенсора на графене. – Материалы V междунар. конф. «Математическая биология и биоинформатика», Пушино, 2014, с. 51–52.

23. Aznakayeva D. E: Optical methods for electronic processes investigation. – Тези XV Міжнар. наук.-техн. конф. “ПОЛІТ–2015. Сучасні проблеми науки”, Національний авіац. ун-т, Київ, 2015, с. 142.

24. Михайлова Г. Ю., Нищенко М. М., Сидорченко И. М., ..., Азнакаева Д. Э. и др. Влияние радиационного облучения на термо-э.д.с. и электропроводность массива многослойных углеродных нанотрубок. – Сборник научн. трудов VI Международ. научн. конф. «Функциональная база нанoeлектроники», НАН Украины, Харьковський національний ун-тет. радиоелектроники, Харьков, 2013, с. 32–35.

25. Азнакаєва Д. Е., Шпакович А. О. Поглинання інфрачервоного випромінювання наноккомпозитом політетрафторетилен з вуглецевими нанотрубками, LaNi<sub>5</sub>, AlLi. – Матеріали наук.-техн. конф. студентів та молод. учених, «Наукоємні технології», Національний авіац. ун-тет, 2012, с. 114.

26. Aznakayeva D. E.: Nanomaterials for nanoscience and nanoelectronics. – Тези IX Міжнар. наук.-техн. конф. “ПОЛІТ–2009. Сучасні проблеми науки”, Національний авіац. ун-т, Київ, 2009, с. 194.

### АНОТАЦІЯ

**Азнакаєва Д. Е. Дослідження і моделювання нанорозмірних модуляторів.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи. – Національний авіаційний університет, Київ, 2018.

У дисертаційній роботі представлені нові результати в області оптоелектронних додатків для побудови нанорозмірних електрооптичних модуляторів для радіотехнічних пристроїв. Новизна роботи полягає у дослідженні, моделюванні та виготовленні високоефективних, високопродуктивних ширококутових, а також вузькосмугових електрооптичних наномодуляторів на основі графена та інших двовимірних наноматеріалів. Досягнуто модуляцію світла від ближнього інфрачервоного до видимого діапазону довжини хвиль з надзвичайно низькими електричними напругами на затворі. Розроблені у дисертаційній роботі електрооптичні наномодулятори досягли глибини модуляції в режимі передачі 30% на довжині хвилі випромінювання у 1,1 мкм. Новизна дисертаційної роботи полягає також у створенні нової технології для побудови захисного графенового бар'єру зразків міді та срібла для захисту їх плазмонних характеристик. Експериментально та теоретично встановлено, що застосування моно- або двошарового графена захищає мідь та срібло від окиснення та деградації їх плазмонних властивостей.

**Ключові слова:** нанорозмірні електрооптичні модулятори, електромагнітне випромінювання, графен, спектри, гетероструктури.

### АННОТАЦИЯ

**Азнакаева Д. Э. Исследование и моделирование наноразмерных модуляторов.** – Рукопись.

Дисертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 05.12.17 – радиотехнические и телевизионные системы. – Национальный авиационный университет, Киев, 2018.



В диссертационной работе представлены новые результаты в области оптоэлектронных приложений для построения наноразмерных электрооптических модуляторов для радиотехнических устройств. Новизна работы заключается в исследовании, моделировании и изготовлении высокоэффективных, высокопроизводительных широкополосных, а также узкополосных электрооптических наномодуляторов на основе графена и других двумерных наноматериалов. Достигнута модуляция света от ближнего инфракрасного до видимого диапазона длин волн при использовании чрезвычайно низких электрических напряжений на затворе. Разработанные в диссертационной работе электрооптические наномодуляторы достигли глубины модуляции 30% в режиме прохождения света на длине волны излучения в 1,1 мкм. Новизна диссертационной работы состоит также в создании новой технологии для построения защитного графенового барьера образцов меди и серебра для защиты их плазмонных характеристик. Экспериментально и теоретически установлено, что применение моно- или двухслойного графена защищает медь и серебро от окисления и деградации их плазмонных свойств.

**Ключевые слова:** наноразмерные электрооптические модуляторы, электромагнитное излучение, графен, спектры, гетероструктуры.

#### ANNOTATION

**Aznakayeva D. E. Research and modeling of nanoscale modulators.** – Manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 05.12.17 – Radiotechnical and television systems. – National Aviation University, Kyiv, 2018.

In the dissertation new results in the area of optoelectronics application for nanosized electro optical modulators construction for radiotechnical systems are presented. The novelty is research, modeling and manufacturing of highly effective broadband and narrow-band electro optical nanomodulators based on graphene and other two-dimensional nanomaterials are provided. Modulation of light from the near-infrared to visible range of wavelengths with extremely low electrical voltages on the gate was achieved. The developed electro optical nanomodulators was achieved the modulation depth in the transmission mode up to 30% at the radiation wavelength in 1.1 micrometers. New technology for construction of protective graphene barrier of copper and silver samples to protect their plasmon characteristics is developed. Experimentally and theoretically established that by using of single-layer and double-layer graphene as protected cover provide protection of copper and silver from oxidation and deterioration of their electric and optical characteristics.

**Key words:** nanosized electro optical modulators, electromagnetic radiation, graphene, spectra, heterostructures.

Підп. до друку 03.08.2018. Формат 60x84/16. Папір офс.  
Офс. друк. Ум. друк. арк. 1,39. Обл.-вид. арк. 1,5.  
Тираж 100 пр. Замовлення № 100-1.

Видавець і виготівник  
Національний авіаційний університет  
03680. Київ – 58, проспект Космонавта Комарова, 1

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 977 від 05.07.2002