

ВІДГУК
офіційного опонента на дисертаційну роботу
Щербіна Костянтина Володимировича
«Підвищення нелінійно - оптичного відгуку фоторефрактивних
напівпровідників в інфрачервоній області спектра»,
представлену на здобуття наукового ступеня доктора фізико-
математичних наук за спеціальністю 01.04.05 – оптика, лазерна фізика

Дисертаційна робота К. В. Щербіна присвячена дослідженням фоторефрактивних напівпровідникових бінарних кристалів у інфрачервоній (ІЧ) області спектру в якості динамічних голографічних середовищ з метою підвищення їх основних характеристик, а також розробці методів практичного використання оптимізованих матеріалів.

Протягом кількох останніх десятиліть фоторефрактивні матеріали інтенсивно досліджувалися в якості ефективних середовищ динамічної голографії, потенційно придатних для реалізації низки практичних завдань, зокрема керування параметрами лазерного випромінювання та складних оптичних полів, в тому числі для підсилення, обробки зображень, фазового спряження, корекції хвильових фронтів та інших актуальних технічних задач. Активні роботи у даній області стимулювали розвиток технології отримання нелінійно-оптичних кристалічних матеріалів з контрольованими параметрами, а також забезпечили значний прогрес у розвитку нових методів керування параметрами лазерного випромінювання на основі принципів динамічної голографії. Об'єктом досліджень у даній роботі були бінарні напівпровідники типу CdTe та GaAs, які вже довгий час залишаються невичерпними базовими технологічними матеріалами для різноманітних застосувань, тому будь-які нові наукові дані щодо цих матеріалів є важливими.

Фоторефрактивний ефект, котрий за своєю природою є комплексним, поєднує низку фізичних явищ, в першу чергу фотопровідність та лінійний електрооптичний ефект, тому ці дослідження та аналіз їх результатів дає

інформацію щодо домішкових станів у забороненій зоні кристалів, динаміки їх фотоіндукованої перезарядки, дифузії, транспорту, локалізації фотозбуджених носіїв заряду тощо. Все це робить дослідження фоторефрактивного ефекту чутливим інструментом для поглибленого вивчення електронних процесів у кристалах, при цьому суто науковий аспект подібних досліджень полягає у отриманні інформації про фундаментальні механізми фотоіндукованих електронних процесів на основі розвинутих теоретичних моделей фоторефрактивного ефекту. Обидва ці аспекти - прикладний та фундаментальний - представлені у даній дисертаційній роботі.

Слід наголосити на те, що в роботі досліджувалися матеріали, які є фоточутливими у ближньому ІЧ діапазоні. З одного боку, це є важливим оскільки число таких матеріалів є дуже обмеженим; з іншого боку, значна частина областей застосувань (телекомунікації, оптична діагностика, фотоніка тощо) використовують лазерне випромінювання саме цього діапазону, що робить особливо цінними результати даного дослідження.

Таким чином, все вищезгадане визначає безсумнівну **актуальність** тематики даного дисертаційного дослідження.

Основною метою даної дисертаційної роботи автор визначив підвищення фоторефрактивної ефективності матеріалів на основі телуриду кадмію. Але фактично зміст дисертаційної роботи виходить далеко за межі цієї вузької задачі, оскільки її вирішення потребувало низки додаткових досліджень, зокрема використання альтернативних та додаткових експериментальних методик (оптичне поглинання, фотохромний ефект, фото-ЕПР та нестационарна фото-ЕРС, оптичне детектування магнітного резонансу тощо) для детальної характеристики монокристалічних зразків. При дослідженні взаємодій лазерних променів на основі фоторефрактивного ефекту було використано різні оптичні схеми, а також випробувано різноманітні методи зовнішнього впливу (фонове освітлення, зміна температури, прикладення електричного поля і т. п.) з метою підвищення фоторефрактивної ефективності кристалів. У результаті отримано

декілька рекордних, у порівнянні з існуючими аналогами, технічних параметрів активних середовищ та реалізованих на їх основі схем, таких як коефіцієнти підсилення, параметри чутливості динамічних інтерферометрів, та деяких інших. Це переконливо свідчить про значні перспективи використання оптимізованих фоторефрактивних матеріалів, і таким чином про досягнення поставленої мети дисертаційного дослідження.

Крім вдосконалення монокристалічних матеріалів автором апробовано їх використання у гібридних системах з використанням напівпровідників (CdTe, GaAs) та рідких кристалів, у яких також отримано високі характеристики у порівнянні з описаними в літературі аналогами.

Слід відзначити, що дана робота виконувалася в рамках як затверджених тем науково-дослідних робіт Інституту фізики НАНУ, так і низки міжнародних проектів. Технологічна частина роботи (вирощування легованих монокристалів телуриду кадмію) виконувалася у активній співпраці з спеціалістами з Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, і проведені автором фізичні дослідження стимулювали та забезпечували цілеспрямоване і послідовне покращення фоторефрактивних параметрів даних кристалів.

Дисертаційна робота викладена на 283 сторінках, і складається з вступу, семи розділів, висновків, додатку та переліку літературних джерел.

У вступі обґрунтовано вибір теми роботи, визначено об'єкт, предмет та мету дослідження, основні завдання та методи їх вирішення, а також сформульовані автором наукову новизну і практичне значення, особистий внесок, наукові публікації, та інші формальні дані, згідно стандартних вимог до структури дисертаційної роботи.

У першому (оглядовому) розділі дисертації коротко описано основи теоретичних моделей, які застосовуються для кількісного опису фоторефрактивного ефекту, базові матеріальні параметри та основні експериментальні методики, що використовуються для його вивчення. На цій основі визначено можливі шляхи та методи керування фоторефрактивними характеристиками

кристалічних матеріалів, які складають основне завдання даного дисертаційного дослідження.

Другий розділ дисертації присвячено узагальненню попередніх досліджень та обґрунтуванню необхідності і напрямків подальших робіт. У цьому розділі приведені експериментальні результати вимірювань параметрів двоховильової взаємодії, одержані на початковому етапі досліджень, які дозволили виявити основні особливості фоторефрактивного ефекту в телуриді кадмію, зокрема легovanому Ge і Sn, в ІЧ діапазоні. Виявлено фотоіндуковані зміни оптичного поглинання у цих зразках при низьких температурах, та запропонована модель фотостимульованої перезарядки домішкових центрів,

В третьому розділі описано результати роботи щодо підвищення фоторефрактивного відгуку досліджуваних напівпровідників при формуванні відбиваючих голограм. Це було обумовлено необхідністю одержання фотоіндукованих ґраток з високою просторовою частотою, що необхідно для підвищення ефективності двопучкового енергообміну. Наголошено, що ця частина роботи виконувалася у координації з технологічними роботами (ЧНУ), спрямованими на досягненні ефективності шляхом модифікації умов вирощування та ступеню легування кристалів.

В четвертому розділі наведені результати досліджень кристалів CdTe:Ge методом спектроскопії нестационарної фото-ЕРС. Отримані результати суттєво доповнили дані, отримані у даних кристалах голографічними методами. Добра кореляція між цими результатами підтвердила запропоновану базову модель фотостимульованих процесів за участі двох типів електронних рівнів у забороненій зоні та відповідно присутності двох внесків, що відрізняються характерними часами, у динаміці досліджуваних ефектів.

У п'ятому розділі описано результати досліджень впливу зовнішнього електричного поля (постійного та змінного) на процеси формування просторового заряду у різних легованих напівпровідниках CdTe, а також GaAs. Цей метод використано в першу чергу для підвищення фотореф-

рактивного відгуку, що й було досягнуто; зокрема, отримані рекордні для напівпровідників значення коефіцієнта двоххвильової взаємодії в кристалах легованих германієм при амплітуді змінного поля 8.8 кВ/см. Підвищення коефіцієнта взаємодії дозволило реалізувати голографічну схему подвійного фазообертаючого дзеркала. Крім того, в даному розділі описано експерименти по генерації хвиль просторового заряду, які вдалося спостерігати за рахунок їх взаємодії з фоторефрактивною ґраткою та формування просторових субгармонік. Ці додаткові зарядові хвилі були виявлені шляхом дифракції лазерних променів, а також безпосередньо візуалізовані у поляризованому світлі.

Шостий розділ присвячено дослідженню гібридних комірок на основі рідких кристалів (РК) з напівпровідниковими підкладками, в яких реалізується формування змінного показника заломлення в шарі РК викликане фотоіндукованим об'ємним зарядом на поверхні фоторефрактивного кристалу. Новим є використання інфрачервоного випромінювання і відповідно ІЧ-чутливого матеріалу в ролі підкладки. В роботі реалізовано такі схеми на основі як телуриду кадмію, так і арсеніду галію, де реалізовано двоххвильову взаємодію для лазерного випромінювання з довжиною хвилі 1.06 мкм. Вивчено залежності параметрів комірок (підсилення, роздільна здатність) як від прикладеної змінної напруги, так і від її частоти. При цьому шляхом оптимізації досягнуто сімнадцятикратне підсилення інтенсивності сигнального променя, що значно перевищує результати, досягнуті в інших типах РК-гібридів.

Сьомий розділ включає результати досліджень адаптивних динамічних інтерферометрів на основі фоторефрактивних напівпровідників, що є одним з найбільш перспективних практичних застосувань даних матеріалів. Реалізовано такі пристрої на основі CdTe на лазерній довжині хвилі 1.55 мкм. Досліджено частотні та амплітудні характеристики пристроїв, показано що кристал легований германієм в присутності зовнішнього поля демонструє найвищі параметри. Апробовано схему інтерферометра з ступінчатою фазовою

модуляцією одного з променів, що забезпечує найвищі параметри як щодо частотного відгуку (частоти зрізу), так і чутливості щодо малих збурень.

Висновки до роботи підсумовують основні результати.

До **найбільш важливих результатів** дисертаційної роботи, на мою думку, слід віднести наступні.

1. В результаті використання комплексу методів, як голографічних, так і інших (фотоіндуковане поглинання, фото-ЕПР, нестационарна фото-ЕРС, магнітооптика) запропоновано модельні енергетичні схеми фотоіндукованої перезарядки дефектних та домішкових центрів у легованих кристалах телуриду кадмію. На цій основі пояснено відмінності у динаміці фоторефрактивного відклику кристалів, легованих германієм та оловом. Оптимізовано хімічні склади цих кристалів та отримані оцінки матеріальних параметрів кристалів, що визначають фоторефрактивні властивості.

2. Вперше в напівпровіднику отримано та досліджено генерацію просторових субгармонік за рахунок взаємодії фоторефрактивних ґраток і хвиль просторового заряду. Побудовано експериментальні діаграми існування субгармонік різної кратності, здійснено безпосередню візуалізацію просторового розподілу поля, створеного хвилями просторового заряду в напівпровіднику.

3. Досліджено різні способи підвищення фоторефрактивних характеристик кристалів телуриду кадмію шляхом оптимізації зовнішніх умов (електричне поле, освітлення, температура), на цій основі досягнуто найвищі у порівнянні з відомими параметри.

Отримані в процесі виконання дисертаційної роботи результати мають і важливе **практичне значення**, в першу чергу для завдань дистанційного лазерного зондування та динамічної інтерферометрії в ІЧ діапазоні спектру. Серед таких найважливіших результатів можна виділити наступні.

1. Реалізовано метод перетворення типу фоторефрактивного відгуку з нелокального на локальний за допомогою ступінчастої фазової модуляції однієї з записуючих хвиль. Запропоновано новий тип адаптивного

інтерферометра, на основі зустрічної двохвильової взаємодії в кристалах CdTe:Ge, який демонструє найвищі характеристики серед всіх відомих аналогічних пристроїв на довжині хвилі 1.55 мкм.

2. Реалізовано низку прототипів для можливих застосувань оптимізованих фоторефрактивних напівпровідникових кристалів, в тому числі гібридні РК комірки з суттєво покращеними властивостями, а також обмежувачі потужності лазерного ІЧ випромінювання та оптичні перемикачі каналів на основі подвійно фазообертаючих дзеркал.

Особливість даної дисертаційної роботи полягає в тому, що вона поєднує нові фізичні дослідження з практичною спрямованістю на вдосконалення характеристик нелінійних матеріалів та їх застосуванням для актуальних задач лазерної оптики та оптоелектроніки. При її виконанні дисертантом отримано низку нових і важливих результатів, наукова новизна, цінність та достовірність яких не викликає сумніву.

До дисертаційної роботи можна зробити наступні **зауваження**.

1. В тексті роботи у більшості випадків не приводяться розміри (товщини) експериментальних зразків телуриду кадмію, які важливі в першу чергу у співвідношенні з діаметрами лазерних пучків. Очевидно, що міра перекриття взаємодіючих променів при значних кутах між променями впливає на виміряні значення коефіцієнта двохвильової взаємодії, що не обговорюється при описі голографічного експерименту. Імовірно це може бути причиною того, що, як зауважено у розділі 5, виміряні коефіцієнти енергообміну виявляються недооціненими при реалізації схем фазового спряження.

2. Автором стверджується досягнення оптимізованих з точки зору фоторефрактивної якості концентрацій легуючих домішок у кристалах телуриду кадмію, проте ці значення не приводяться. Це було б важливо для порівняння як з іншими легованими фоторефрактивними матеріалами, так і з оцінками ефективних модельних параметрів. Крім того, оскільки низка різних фізичних досліджень виконана на одних і тих же зразках, з точки зору читача

дисертаційної роботи було б корисно привести (наприклад у додатку) зведену таблицю їх основних параметрів.

3. У дисертаційній роботі розділ 3 містить лише 9 сторінок, при цьому наведений у ньому опис експерименту (стор. 125) значною мірою повторює описану вище експериментальну методику. Було б логічно його скоротити та об'єднати попереднім розділом. Також було б доцільно об'єднати окремі висновки (наприклад 4 і 5, 6 і 7), та дещо скоротити у висновках перелік другорядних результатів (які деталізовані у висновках до кожного розділу) і при цьому виділити найбільш пріоритетні та значимі.

4. Дисертаційна робота написана хорошою науковою мовою, проте у тексті є окремі описки, русизми та стилістично невдалі вирази. Наприклад, декілька разів вжито «начальний» замість «початковий» (стор. 72, 90, 96), «полоси» замість «смуги» (стор. 77), «фазове обертання» замість «обернення» (стор. 163, 164, 167), «функція Лоренцу» замість «Лоренца» (стор. 60, 159), «кмітливі методи» (стор. 238) тощо.

Звичайно ж, всі ці зауваження не мають принципового характеру, жодним чином не стосуються значного наукового доробку автора, і не впливають на загальне позитивне враження від дисертаційної роботи. В цілому текст дисертації написаний логічно і послідовно, якісно ілюстрований. При викладі матеріалу в кожному окремому розділі описано як мотивацію до проведення даного виду досліджень, так і їх детальне обговорення, а також проаналізовано співвідношення результатів з іншими власними та літературними даними.

Автореферат повною мірою відображає матеріал, викладений в тексті дисертації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у високо-рейтингових міжнародних і вітчизняних наукових журналах та у розділі колективної монографії, і були широко представлені на наукових конференціях. За результатами роботи отримано міжнародний патент (США, 2012).

Достовірність отриманих в дисертації результатів забезпечувалась використанням комплексу сучасних експериментальних методів дослідження та їх аналізу на основі наявних теоретичних моделей, а також несуперечністю отриманих результатів з опублікованими у світовій науковій періодиці даними.

Вважаю, що за актуальністю теми, обсягом, науковою новизною, практичною цінністю отриманих результатів і висновків, а також кількістю та якістю наукових публікацій дисертаційна робота Щербіна К. В. «Підвищення нелінійно - оптичного відгуку фоторефрактивних напівпровідників в інфрачервоній області спектра» відповідає усім вимогам МОН України, які ставляться до докторських дисертацій, а її автор Щербін Костянтин Володимирович повністю заслуговує присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.05 – оптика, лазерна фізика.

Професор кафедри фізики напівпровідників
Ужгородського національного університету,
завідувач відділу НДІ фізики і хімії твердого тіла УжНУ,
доктор фіз.-мат. наук, професор

О. О. Грабар

Підпис О. О. Грабара підтверджую:

Вчений секретар УжНУ

О. О. Мельник