

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Щербіна Костянтина Володимировича

“Підвищення нелінійно-оптичного відгуку фоторефрактивних напівпровідників в інфрачервоній області спектра”,

подану на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук
за спеціальністю 01.04.05 – оптика, лазерна фізика

Дисертація К. В. Щербіна присвячена пошуку шляхів збільшення ефективності нелінійно-оптичної взаємодії в фоторефрактивних напівпровідниках та в органічно-неорганічних гібридах на їх основі в інфрачервоному діапазоні спектра та експериментальній демонстрації такого підвищення.

Актуальність теми дисертаційної роботи. У теперішній час зростає зацікавленість до оптичних приладів здатних працювати в інфрачервоній області спектра. Пов'язано це з бурхливим розвитком телекомунікаційних систем, які налаштовані саме на інфрачервоний діапазон і потребують комутаторів, фазово-обертаючих дзеркал, елементів для здійснення логічних та математичних операцій із зображеннями та інших компонентів, які можуть бути реалізовані на основі динамічної голографії. Додатковою перевагою використання інфрачервоного світла з довжиною хвилі більше 1400 нм є його безпечність для людського ока. Всі ці фактори породжують підвищену увагу до розвитку пристроїв на основі динамічної голографії в інфрачервоній області спектра.

Запис динамічних голограм може базуватись на різних механізмах серед яких теплові ґратки показника заломлення при нагріванні середовища в областях з більшою інтенсивністю світла, електрооптичний та фотопружний ефекти та ін. Особливо слід виділити фоторефрактивний ефект, який притаманний нецентросиметричним фотопровідникам. Цей механізм не потребує значних інтенсивностей світла, і тому може бути використаний з лазерними діодами та

іншими малопотужними джерелами світла. Важливою властивістю фоторефрактивного ефекту є нелокальний відгук, при якому просторова модуляція показника заломлення зсунута на чверть просторового періоду відносно інтерференційного поля, що його утворює. Така особливість забезпечує направлену перекачку енергії між пучками, які записують ґратку, що дозволяє легко здійснювати підсилення оптичних сигналів та спрощує реалізацію і використання інших схем, серед яких різні схеми обернення хвильового фронту. Тому фоторефрактивні динамічні голограми перспективні для використання в пристроях обробки і передачі оптичної інформації, а фоторефрактивні кристали є природними кандидатами для таких застосувань.

Проте класичні фоторефрактивні сегнетоелектрики з великими коефіцієнтами взаємодії, такі як ніобат літію чи тітанат барію, здебільшого нечутливі в інфрачервоній області спектра. Чутливими є фоторефрактивні напівпровідники, такі як арсенід галію та телурид кадмію. До того ж напівпровідникові кристали мають додаткову перевагу, якою є їх значно більша швидкодія порівняно з сегнетоелектриками. Але невеликі електрооптичні коефіцієнти напівпровідників зумовлюють менші коефіцієнти взаємодії. Більш того, сталі взаємодії завжди зменшені в інфрачервоному діапазоні, адже вони обернено пропорційні довжині хвилі.

Тому особливо актуальною стає проблема підвищення нелінійно-оптичного відгуку фоторефрактивних напівпровідників в інфрачервоній області спектра. На вирішення цієї проблеми і спрямовані всебічні дослідження, проведені в даній дисертаційній роботі.

Слід зазначити, що дисертаційна робота виконувалася **в рамках планів науково-дослідних робіт** відділу оптичної квантової електроніки Інституту фізики НАН України.

Дисертація складається з вступу, семи розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатку (список публікацій за темою дисертації).

У вступі обґрунтовано актуальність тематики досліджень, сформульовано мету і завдання роботи, визначено об'єкт, предмет і методи досліджень, показана наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, визначено особистий внесок здобувача, наведені дані про апробацію роботи та про публікації, окреслено структуру та обсяг дисертації, зазначено її зв'язок з науковими програмами, темами і грантами.

В першому розділі коротко описано суть фоторефрактивного ефекту та основних фізичних процесів, що зумовлюють запис динамічних голограм в фоторефрактивних кристалах. Відомі моделі формування просторового заряду проаналізовані з метою визначення можливих шляхів підвищення нелінійно-оптичного відгуку напівпровідників в інфрачервоній області спектра.

У другому розділі проаналізовано результати попередніх досліджень фоторефрактивних напівпровідників та зазначено переваги CdTe і, зокрема, CdTe:Ge. Представлено результати комплексних досліджень CdTe:Ge і CdTe:Sn, які дозволили ідентифікувати фоторефрактивні центри в цих напівпровідниках та визначити енергії їх активації. Продемонстровано підвищення фоторефрактивного відгуку при оптичному перезаселенні рівнів у забороненій зоні CdTe:Ge.

В третьому розділі в співпраці з фахівцями з синтезу фоторефрактивних напівпровідників з Чернівецького національного університету ім. Ю. Федьковича продемонстровано можливість відтворюваного синтезу кристалів CdTe:Ge з високою концентрацією пасток, необхідною для ефективного запису ґраток на відбивання. Отримані найбільші для напівпровідників коефіцієнти взаємодії в дифузійному режимі при зустрічній двопучковій взаємодії на двох важливих довжинах хвиль 1064 нм і 1550 нм.

В четвертому розділі приведено результати досліджень нестационарної фотоелектрорушійної сили в кристалах CdTe:Ge, які розширили уявлення про процеси переносу заряду в цьому напівпровіднику. Аналіз отриманих даних разом з даними фоторефрактивних досліджень показали, що просторовий заряд

утворюється при фотогенерації вільних носіїв заряду одного знаку (дірок для кристалів, що досліджувались) з центрів двох типів в CdTe:Ge і подальшому захопленні носіїв на ці пастки.

В п'ятому розділі представлено дослідження по збільшенню нелінійно-оптичного відгуку напівпровідників при застосуванні зовнішнього електричного поля. Коефіцієнти взаємодії, отримані для кристалів CdTe з використанням як постійного, так і змінного поля, знаходяться серед найкращих значень, відомих для різних напівпровідників при подібних полях. Вперше при двопучковій взаємодії в фоторефрактивному напівпровіднику отримано генерацію просторових субгармонік, яка раніше спостерігалась лише в кристалах типу силікосиленіту. Експериментальні результати підтвердили теоретичну модель, що пов'язує просторові субгармоніки даного типу з генерацією слабо затухаючих хвиль просторового заряду. Запропоновано і вперше реалізовано поляриметричну методику для візуалізації розподілу поля, створеного хвилею просторового заряду.

В шостому розділі наведені результати досліджень органічно-неорганічних гібридів. Поєднання в гібридних комірках чутливості напівпровідників в інфрачервоній області спектра з великими нелінійностями рідинних кристалів зробили можливим запис ефективних динамічних голограм в інфрачервоному діапазоні. У фоторефрактивних гібридах з підкладками з CdTe на довжині хвилі 1064 нм отримані коефіцієнти підсилення, що на порядок перевищують коефіцієнти, відомі для попутної взаємодії в напівпровідниках в дифузійному режимі. В гібридах іншого типу, рідинно-кристалічних вентилях світла, отримано стаціонарне підсилення сигнальної хвилі з кратністю 17. Це значення майже вдвічі перевищує підсилення в будь-яких подібних гібридах, відомі для будь-яких довжинах хвиль навіть у видимому діапазоні.

В сьомому розділі наведено успішні приклади розробки і вдосконалення оптичних пристроїв на основі динамічних ґраток в напівпровідниках з підвищеним нелінійно-оптичним відгуком в інфрачервоній області спектра. Серед

них обмежувач потужності інфрачервоного випромінення на основі рідинно-кристалічного вентиля світла з підкладкою з GaAs, суто оптичний перемикач оптичних каналів зв'язку на основі подвійних обертаючих дзеркал в CdTe, однопроменевий датчик вібрацій спекл полів в інфрачервоному діапазоні на основі фото електрорушійної сили в CdTe, адаптивний інтерферометр на динамічних ґратках в CdTe:Ge з покращеним частотним відгуком, адаптивний інтерферометр на основі зустрічної двопучкової взаємодії в CdTe.

Найбільш вагомими результатами дисертаційної роботи, на мою думку, є наступні:

1. В роботі визначено, що два центри, кожен з яких може перебувати в двох зарядових станах, приймають участь у формуванні просторового заряду в кристалах CdTe:Ge. За допомогою комплексних досліджень один з центрів ідентифікований як Ge на місці Cd. Для обох центрів визначені положення відповідних енергетичних рівнів у забороненій зоні CdTe:Ge.
2. Розуміння процесів перерозподілу заряду між різними центрами в CdTe:Ge дозволили запропонувати і реалізувати методику підвищення коефіцієнтів фоторефрактивної взаємодії в цьому кристалі за допомогою зміни відносних концентрацій різних зарядових станів домішкових і дефектних центрів під дією додаткового опромінення з правильно підібраною довжиною хвилі.
3. Запропоновано і вперше реалізовано фоторефрактивний запис в новому фоторефрактивному напівпровіднику, CdTe з домішкою олова, неперервним випроміненням в інфрачервоній області спектра.
4. Продемонстровано запис динамічних голограм в інфрачервоній області спектра в фоторефрактивних рідинно-кристалічних гібридах на основі CdTe.
5. Реалізовано запис динамічних голограм в інфрачервоному діапазоні в органічно-неорганічних гібридах типу рідинно-кристалічних вентилів світла на

основі GaAs. Експериментально підтверджено локальний відгук у шарі рідинного кристалу такої комірки.

Результати дисертаційної роботи мають важливе *практичне значення*. Зокрема необхідно виділити наступне:

1. В CdTe:Ge при зустрічній двопучковій взаємодії отримані найбільші для всіх напівпровідників коефіцієнти взаємодії на двох важливих довжинах хвиль 1064 нм і 1550 нм. Ці коефіцієнти набагато перевищують всі відомі значення для об'ємних напівпровідників.
2. Сімнадцятикратне підсилення слабкого пучка, досягнуте в рідинно-кристалічному вентилі світла на основі GaAs на довжині хвилі 1064 нм, майже в два рази перевищує такі величини для подібних гібридів, отримані на будь-яких довжинах хвиль.
3. Реалізовано обмежувач потужності інфрачервоного когерентного випромінювання на основі рідинно-кристалічного вентиля світла.
4. Запропоновано і продемонстровано нову конфігурацію адаптивного інтерферометра на зустрічній двопучковій взаємодії в дифузійному режимі, в якому лінійний режим вимірювань малих зміщень забезпечується зовнішньою ступінчастою фазовою модуляцією однієї з хвиль, що інтерферують в кристалі.
5. Покращено частотний відгук адаптивного інтерферометра на основі двохвильової взаємодії в постійному полі завдяки незначному нагріванню основного елементу – кристала CdTe:Ge.

Підсумовуючи вищесказане, треба зазначити, що здобувачем отримано низку нових і цікавих результатів, *наукова новизна* яких не викликає сумніву.

Достовірність отриманих в дисертації результатів забезпечена комплексністю досліджень з використанням різних сучасних експериментальних методик та узгодженістю результатів з відомими теоретичними моделями і літературними даними.

Дисертація виконана на високому науковому рівні, містить оригінальні результати, які *опубліковані* в 1 розділі в колективній монографії, 24 статтях у фахових міжнародних журналах 22 з яких віднесено до першого та другого квартилів Q1-Q2 за класифікацією SCImago Journal and Country Rank, та представлені на численних міжнародних конференціях.

Автореферат в повній мірі відображає зміст та структуру дисертації.

В той же час робота не позбавлена й певних *недоліків* (сортування нижче по мірі появи в тексті рукопису, а не важливості):

- На сторінці 57 автор пише: «Пучки, що записували ґратку, спеціально не розширювались. Їх *поперековий* розподіл інтенсивності відповідав розподілу Гауса ...». Слово поперековий слід замінити на поперечний.
- На сторінці 127 говориться «Суцільні лінії на Рис. 3.2 показують результат наближення виразу (2.19) до експериментальних даних ...». Можливо, краще писати апроксимація експериментальних даних формулою (2.19).
- Параграф 3.3 (стор 130) має назву **3.3. Висновки до розділу**. В ньому мова, скоріше, йде про результати, а не висновки. Наприклад, в якості першого висновку наведено наступне: «Спільно із спеціалістами з росту кристалів з ЧНУ продемонстрована можливість відтворюваного синтезу кристалів CdTe:Ge з високою ефективною концентрацією пасток»
або
«В кристалах CdTe:Ge отримано найбільший для всіх напівпровідників в дифузійному режимі запису ґратки експоненціальний коефіцієнт підсилення в двопучковій взаємодії, який перевищує раніш відомі значення більш ніж в 2,5 рази на $\lambda = 1,064$ мкм та в 1,5 рази на $\lambda = 1,55$ мкм.»
- Обговорюючи можливість генерації субгармонік на стор.174 автор каже, що «для ефективної генерації ХПЗ і субгармонік в ФРК необхідний великий добуток $\mu\tau$. Ця величина має розмірність $\text{см}^2/\text{В}$ (див рис 5.19). Говорити про велике значення розмірної величини здається не зовсім коректним.

- В 5му розділі, зокрема, обговорюється генерація субгармонік у зразку N90. Хотілось би у висновках до цього розділу побачити чому саме генерація субгармонік має місце у зразку N90? Чому саме обрано цей зразок? Які в нього специфічні фізичні параметри, що дозволили отримати субгармоніки?
- На сторінці 201 автор пише «До того ж, ця ґратка буде **приєднана** до ґратки заряду ...». На мій погляд термін «приєднана ґратка» є не вдалим.
- У 6му розділі **Фоторефрактивні рідинно-кристалічні гібриди** досліджується РК BL006 який знаходився між двома фоторефрактивними або між фоторефрактивним і скляним вікнами. Здається, доречним навести результати вимірів, коли РК знаходиться між скляними підкладками. Чи впливає ІЧ опромінення на провідність РК?

Ці зауваження не є принциповими і не знижують наукової цінності дисертаційної роботи Щербіна К. В. Отримані оригінальні результати суттєво розширюють уявлення про фізичні процеси, що відбуваються при запису динамічних голограм у фоторефрактивних напівпровідниках і стимулюють продовження досліджень в цьому напрямку.

На підставі вищевикладеного, вважаю, що дисертаційна робота Щербіна К. В. є завершеним науковим дослідженням, яке в сукупності розв'язує важливу наукову проблему підвищення нелінійно-оптичного відгуку фоторефрактивних напівпровідників в інфрачервоній області спектра. За актуальністю, новизною отриманих результатів, обсягом проведених досліджень, кількістю і рівнем публікацій, представлена дисертаційна робота повністю відповідає всім вимогам пп. 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567 (зі змінами внесеними постановами Кабінету Міністрів України №656, від 19.08.2015 р., №1159 від 30.12.2015 р., №567 від 27.07.2016 р., №943 від 20.11.2019 р., та №607 від 15.07.2020 р.), які висуваються до докторських дисертацій, а її автор, Щербін

Костянтин Володимирович, безумовно заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.05 – оптика, лазерна фізика.

Офіційний опонент

доктор фізико-математичних наук, професор,

завідувач кафедри теоретичної фізики

Київського національного університету

імені Тараса Шевченка

В. Ю. Решетняк

Підпис В. Ю. Решетняка засвідчую: