

**ІНСТИТУТ ФІЗИКИ
НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ**

ЩЕРБІН Костянтин Володимирович

УДК 535.4, 535.34

**ПІДВИЩЕННЯ НЕЛІНІЙНО-ОПТИЧНОГО ВІДГУКУ
ФОТОРЕФРАКТИВНИХ НАПІВПРОВІДНИКІВ В ІНФРАЧЕРВОНІЙ
ОБЛАСТІ СПЕКТРА**

01.04.05 – оптика, лазерна фізика
природничі науки

АВТОРЕФЕРАТ

Дисертації на здобуття наукового ступеня доктора
фізико-математичних наук

КИЇВ – 2021

Дисертація є рукописом.

Робота виконана в Інституті фізики НАН України

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
член-кореспондент НАН України
СИЗОВ Федір Федорович
Інститут фізики напівпровідників
ім. В. Є. Лашкарьова НАН України,
Керівник Напрямку “ТГц- і ІЧ-функціональної
напівпровідникової мікро- та нанофотоелектроніки”,
завідувач відділу Фізики і технології низьковимірних
систем

доктор фізико-математичних наук, професор
РЕШЕТНЯК Віктор Юрійович
Київський Національний Університет
ім. Тараса Шевченка, Фізичний факультет
завідувач кафедри теоретичної фізики

доктор фізико-математичних наук, професор
ГРАБАР Олександр Олексійович
Ужгородський Національний Університет,
Фізичний факультет
професор кафедри Фізики напівпровідників,
завідувач відділу НДІ Фізики і хімії твердого тіла
ДВНЗ “Ужгородський національний університет”
МОН України

Захист відбудеться “ 16 ” вересня 2021 р. о 14:30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.159.01 при Інституті фізики НАН України за адресою: 03028, Київ, проспект Науки, 46.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту фізики НАН України.

Автореферат розісланий “ 7 ” серпня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Чумак О.О.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Динамічна голографія відкрила нові можливості для комутації оптичних каналів зв'язку, корекції спотворень оптичних пучків при їх розповсюдженні, для обробки оптичної інформації, здійснення математичних і логічних операцій із зображеннями тощо [1]. Відповідні пристрої стають особливо цікавими у зв'язку зі стрімким розвитком телекомунікаційних систем і використанням телекомунікаційних компонент в оптичних приладах. Досить дослідженими є динамічні ґратки на основі фоторефрактивного ефекту, і багато застосувань були продемонстровані на фоторефрактивних кристалах (ФРК) [2]. Отже, ФРК виглядають природними кандидатами для використання в телекомунікаційних системах. Проте телекомунікаційні системи налаштовані на інфрачервоний (ІЧ) діапазон спектра, де класичні сегнетоелектричні ФРК з великими константами взаємодії у видимій області здебільшого нечутливі. Деякі, спеціально леговані ($\text{BaTiO}_3\text{:Rh}$, $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6\text{:Te}$), чутливі, але досить повільні. Придатними до ІЧ запису є швидкі фоторефрактивні напівпровідники, такі як CdTe , GaAs та InP . Але внаслідок невеликих електрооптичних коефіцієнтів їм притаманні і менші коефіцієнти взаємодії. До того ж сталі взаємодії завжди менші в ІЧ області спектра, оскільки вони обернено пропорційні довжині хвилі. Тому вирішення проблеми підвищення нелінійно-оптичного відгуку фоторефрактивних напівпровідників в ІЧ діапазоні є нагальною задачею. В дисертаційній роботі ця проблема вирішується кількома способами.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами. Дисертаційна робота виконана у відділі оптичної квантової електроніки Інституту фізики НАН України в рамках наступних наукових тем і міжнародних грантів: “Нелінійна лазерна динаміка оптичних вихорів, фоторефрактивних взаємодій та біосистем” Національної академії наук України (В/40 номер держреєстрації 01198U002138), “Фізична оптика когерентних світлових полів, що створені за допомогою багатохвильових взаємодій в нелінійних середовищах і біооб'єктах” Національної академії наук України (В/66 номер держреєстрації 0101U000352), “Структура складних світлових полів та світлоіндуковані процеси в конденсованому стані” Національної академії наук України (В/107 номер держреєстрації 0104U003218), “Формування та аналіз сингулярних оптичних полів та світлоіндукованих структур у фоторефрактивних, рідкокристалічних, нанокompозитних та біоорганічних середовищах” Національної академії наук України (В/160 номер держреєстрації 0112U002610), “Керування регулярними та сингулярними структурами оптичних полів у просторі та фоточутливих середовищах” Національної академії наук України (В/182 номер держреєстрації 0117U002615), проект фонду CRDF “Optimization of Photorefractive Cadmium Telluride for Laser Ultrasonic Receivers” (UP2-536), EOARD Special Project “Study of Fast Dynamics of Photorefractive Crystals” (SPC-96-4058), проект УНТЦ “Elaboration and Investigation of New Highly Effective Nonlinear Optics Radiation-

Resistant Materials for the Creation on its Base Fast Devices for Laser Beam Parameter Control” (№ 348), INTAS Fellowship grant (№ YSF 99-4048), проект INTAS “Optical critical phenomena” (№ 96-0954), проект Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) “New Lasermethods in Information and Documentation Technology” (№ 522-4001 01BS 614/3), проект EOARD/УНТЦ “Photorefractive two-beam coupling in the infrared” (EOARD #118006, УНТЦ №P585).

Метою роботи є збільшення коефіцієнтів нелінійно-оптичної взаємодії фоторефрактивних напівпровідників в ІЧ області спектра до граничних значень, зумовлених електрооптичними характеристиками; демонстрація використання напівпровідників зі збільшеним нелінійно-оптичним відгуком в нових пристроях та покращення характеристик відомих схем на основі динамічних голограм в ІЧ діапазоні.

Завдання роботи. Для досягнення поставленої мети були виконані наступні завдання.

Вибір найбільш перспективних напівпровідників для підвищення їх нелінійно-оптичного відгуку в ІЧ області спектра на основі електрооптичних характеристик матеріалів і аналізу експериментальних даних, відомих на початок роботи.

Ідентифікація і детальна характеристика фоторефрактивних центрів у перспективних напівпровідниках із залученням різноманітних фізичних методів; визначення енергій оптичної активації центрів і з’ясування їх ролі у формуванні просторового заряду; дослідження супутніх процесів перерозподілу заряду між різними центрами і пошук можливостей стороннього впливу на цей перерозподіл з метою збільшення поля просторового заряду.

Пошук нових фоторефрактивних напівпровідників та домішок, які забезпечують фоторефрактивний запис в ІЧ діапазоні.

Підвищення коефіцієнтів взаємодії в напівпровідниках при дифузійному механізмі запису ґраток, оптимізація запису при зустрічній взаємодії, для якої дифузійне поле є найбільшим на заданій довжині хвилі. Оптимізація відомих методів підвищення фоторефрактивного відгуку при дрейфовому механізмі запису ґратки в перспективних напівпровідниках.

Запис динамічних голограм ІЧ світлом в гібридних пристроях, які поєднують чутливість напівпровідників в ІЧ спектральному діапазоні, з рідинними кристалами, нечутливими до ІЧ світла, але здатними до створення значних модуляцій показника заломлення.

Експериментальна демонстрація нових та покращення характеристик відомих практичних застосувань з використанням напівпровідників зі збільшеним нелінійно-оптичним відгуком в ІЧ області спектра.

Об’єктом дослідження є номінально чисті та леговані фоторефрактивні напівпровідники, серед яких CdTe, CdMnTe, CdZnTe, CdTe:Ge, CdTe:Sn, CdTe:V, CdTe:Ti, CdTe:Cr, CdTe:Fe, CdTe:Ta; нелегований GaAs (GaAs:EL2) та

GaAs:Cr; гібридні рідинно-кристалічні комірки з напівпровідниковими підкладками, виготовленими з CdTe або GaAs.

Предметом дослідження є нелінійно-оптичні взаємодії в фоторефрактивних напівпровідниках в ІЧ області спектра.

Методи дослідження. В роботі використовувались нелінійно-оптичні методи досліджень, а саме: вироджена та невироджена по частоті двопучкова взаємодія, зворотна чотирехвильова взаємодія; спектроскопія лінійного та нелінійного (індукованого світлом) поглинання, магнітний круговий дихроїзм, електронний парамагнітний резонанс (ЕПР) та фото-ЕПР, оптичне детектування магнітного резонансу; дослідження нестаціонарної фото-електрорушійної сили, яка виникає при коливаннях положення інтерференційної картини відносно квазі-стаціонарної ґратки; поляриметричні методики.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що в роботі вперше:

Визначено, що два центри, кожен в двох можливих зарядових станах, беруть участь у формуванні просторового заряду в кристалах CdTe:Ge. Один з центрів ідентифікований як Ge на місці Cd в кристалічній ґратці CdTe. Для обох центрів встановлені енергії оптичної активації. Запропонована схема енергетичних рівнів у забороненій зоні CdTe:Ge.

Продемонстровано підвищення коефіцієнтів фоторефрактивної взаємодії в CdTe:Ge з використанням оптичного керування зміною відносних концентрацій різних зарядових станів домішкових і дефектних центрів в CdTe:Ge під дією опромінення з правильно підбраною довжиною хвилі.

Дослідження фоторефрактивного відгуку та фото-електрорушійної сили довели, що фотогенерація носіїв заряду одного знаку (дірок) з центрів двох типів в CdTe:Ge та їх перерозподіл на цих центрах зумовлює складний процес формування просторового заряду на $\lambda = 1,064$ мкм; на великих періодах ґратки дві складові суттєво (на два порядки) розділені по часу релаксації. З'ясовано, що повільна складова пов'язана з просторовим перерозподілом зарядів (дірок) по центрам, які визначені в CdTe:Ge як $X^{0/-}$, а швидка компонента – по центрам $Ge^{0/+}$.

Запропоновано використання домішки олова для забезпечення фоторефрактивного відгуку CdTe. Реалізовано фоторефрактивний запис в кристалах CdTe:Sn неперервним випроміненням з $\lambda = 1,064$ мкм.

Встановлено, що лише один центр, домішковий центр Sn, важливий для формування просторового заряду в CdTe:Sn. Визначені енергії оптичної активації двох зарядових станів $Sn^{0/+}$. З'ясовано, що близькість цих енергій обумовлює двополярну фотопровідність CdTe:Sn, наслідком якої є відносно малі коефіцієнти взаємодії. Підвищення фоторефрактивного відгуку можливе завдяки спеціальній компенсації неосновних носіїв заряду, наприклад, при додатковому легуванні.

Спільно з фахівцями з синтезу кристалів з Чернівецького національного університету ім. Юрія Федьковича продемонстровано, що в кристалах CdTe:Ge може формуватись висока концентрація пасток, необхідна для створення значного просторового заряду при дифузійному записі на малих періодах, що забезпечує великі значення констант зв'язку при зустрічній нелінійно-оптичній взаємодії.

Отримана генерація просторових субгармонік в напівпровідниковому кристалі (CdTe:Ge).

За допомогою поляриметричної методики візуалізовано просторовий розподіл поля, створеного хвилею просторового заряду, яка формується на пастках в напівпровіднику в зовнішньому електричному полі.

Продemonстровано запис динамічних голограм в ІЧ області спектра в гібридних фоторефрактивних рідинно-кристалічних комірках на основі CdTe. Коефіцієнт підсилення при двопучковій взаємодії в шарі рідинного кристалу на порядок перевищує такі коефіцієнти для ґраток на пропускання в напівпровідниках.

Реалізовано запис динамічних голограм в ІЧ діапазоні в гібридних рідинно-кристалічних комірках типу рідинно-кристалічних вентилів світла на основі GaAs. Експериментально підтверджено локальний нелінійно-оптичний відгук в шарі рідинного кристалу такої комірки.

Практичне значення отриманих результатів пов'язане з використанням фоторефрактивних напівпровідників та пристроїв на їх основі зі збільшеними коефіцієнтами нелінійно-оптичної взаємодії, серед яких треба виділити наступне.

За допомогою запропонованої методики оптичного керування перерозподілом зарядів між фоторефрактивними центрами в CdTe:Ge коефіцієнт підсилення при двопучковій взаємодії Γ збільшено вдвічі для $\lambda = 1,064$ мкм, і майже втричі для $\lambda = 1,32$ мкм. На довжині хвилі $\lambda = 1,064$ мкм досягнуте “чисте” підсилення, яке втричі перевищує лінійні втрати на поглинання і відбивання. Зазначимо, що $\Gamma = 1,5 \text{ см}^{-1}$ є найбільшим для всіх напівпровідників при попутній двопучковій взаємодії в дифузійному режимі для $\lambda > 0,93$ мкм.

При зустрічній двопучковій взаємодії в CdTe:Ge досягнуті найбільші для всіх напівпровідників коефіцієнти підсилення; $\Gamma = 2,8 \text{ см}^{-1}$, отриманий для $\lambda = 1,064$ мкм, в 2,5 разів перевищує будь-які відомі значення для напівпровідників на цій довжині хвилі, а $\Gamma = 1,28 \text{ см}^{-1}$ – майже в 1,5 рази для $\lambda = 1,55$ мкм.

Кратність підсилення слабкого пучка $G = 17$, досягнута в рідинно-кристалічному вентилі світла на довжині хвилі $\lambda = 1,064$ мкм, майже в два рази перевищує всі відомі значення для подібних гібридних комірок, отримані на будь-яких довжинах хвиль.

Запропоновано і продемонстровано адаптивний інтерферометр на зустрічній двопучковій взаємодії в дифузійному режимі, чутливість якого щодо вимірювань малих зміщень забезпечує зовнішня ступінчаста модуляція фази

однієї зі світлових хвиль, яка стрибком зсуває інтерференційну картину на $\pi/2$, забезпечуючи потрібний локальний відгук нелінійно-оптичної взаємодії.

Покращено частотний відгук адаптивного інтерферометра на основі двохвильової взаємодії на довжині хвилі $\lambda = 1,55$ мкм за рахунок незначного нагрівання і температурної стабілізації кристала CdTe:Ge. За результатами досліджень зареєстровано патент.

Реалізовано прототип суто оптичного перемикача оптичних каналів зв'язку на основі подвійних обертаючих дзеркал в напівпровідникових кристалах.

Продемонстровано роботу однопроменевого датчику вібрацій спекл-полів в ІЧ діапазоні спектра з можливістю самокалібрування на основі нестационарної фото-електрорушійної сили в CdTe.

Реалізовано обмежувач потужності лазерного ІЧ випромінювання на основі рідинно-кристалічного вентиля світла.

Особистий внесок здобувача. Всі наукові результати, положення і висновки, що виносяться на захист, отримані здобувачем особисто.

Публікації [1,14,15,30] є одноосібними роботами здобувача.

Внесок у роботи, опубліковані в співавторстві є таким. В роботах [2,17,23,33,38,40,42-47] автор поставив задачу, провів експериментальні дослідження, аналіз даних, теоретичні розрахунки, сформулював висновки. Тексти статей підготовлено разом зі співавторами. В роботі [3] автор брав участь в аналізі та інтерпретації результатів експериментів, вносив корективи і пропозиції щодо тексту статті. В роботі [4] автор провів дослідження напівпровідникового CdTe, відповідні аналіз та інтерпретацію отриманих даних. В роботах [5-7,31,35,41] автор спільно зі співавторами брав участь у проведенні експериментів, аналізі їх результатів та в підготовці статей. В роботах [8,13,27,34] автор поставив задачу досліджень, провів фоторефрактивні експерименти та брав участь у решті експериментів, проаналізував та інтерпретував результати, підготував тексти статей до друку. В роботі [9] автору належить ідея фоторефрактивного запису в кристалах CdTe:Sn; він провів усі експерименти з неперервним випромінюванням, обробив та інтерпретував отримані дані. В роботах [10,18-21,24,25,28,29,32,39] автор поставив задачу досліджень, керував проведенням експериментів, обробкою їх результатів, сформулював висновки та підготував тексти статей. В роботах [11,36] автор провів експериментальні дослідження та інтерпретував їх результати, брав участь у підготовці статей. В роботі [12] автор провів попередні експерименти, йому належить ідея пояснення експериментальних результатів, брав участь в підготовці статті. В роботах [16,22,37] автор провів експериментальні дослідження, обробив та інтерпретував їх результати, сформулював висновки, підготував тексти статей. В патенті [26] автору належить ідея покращення частотного відгуку адаптивного інтерферометра та її експериментальне підтвердження.

Апробація матеріалів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи представлені та обговорені на наукових семінарах та підсумкових конференціях Інституту фізики НАН України (ПНК 2000, 2004, 2009, 2012), а також на таких міжнародних конференціях: SPIE Photonics West, OPTO 2019, San Francisco, 2-7 February 2019; Photorefractive Photonics and beyond PR'19, Gérardmer, France, 18-21 June 2019; SPIE Photonics West, OPTO 2016, San Francisco, 13-18 February 2016; NICE OPTICS 2016, the 1st International Conference on Optics, Photonics & Materials, Nice, France, 26-28 October 2016; Photorefractive Photonics 2015, Villars, Switzerland, 16-19 June 2015; International conference on photorefractive effects, materials and devices PR'13, Winchester, United Kingdom, 4-6 September 2013; Topical Meeting Photorefractive Materials, Effects, and Devices PR'09 – Control of Light and Matter, Bad Honnef, Germany, 11-14 June 2009; Conference on Lasers and Electro-Optics CLEO-03, Baltimore, USA, 1-6 June 2003; International Conference on Photorefractive Effects, Materials, and Devices, La Colle sur Loup, France, 17-23 June 2003; SPIE Annual Meeting 2003, San Diego, USA, 3-8 August 2003; Conference on Lasers and Electro-Optics CLEO-02, Long Beach, USA, 19-22 May 2002; 19th Congress of the International Commission for Optics: Optics for the Quality of Life, Florence, Italy, 25-30 August 2002; E-MRS Fall Meeting 2002, Symposium G: Solid Solutions of the II-IV Compounds – Growth, Characterization and Applications, Zakopane, Poland, 14-18 October 2002; Conference on Lasers and Electro-Optics CLEO-01, Baltimore, USA, 6-10 May 2001; International Conference on Photorefractive Effects, Materials, and Devices, Delavan, Wisconsin, USA, 8-12 July 2001; The Fourth International Conference on Correlation Optics CorrOpt'99, Chernivtsy, Ukraine, 11-14 May 1999; Conference on Lasers and Electro-Optics CLEO-99, Baltimore, USA, 23-26 May 1999; Advances in Photorefractive Materials, Effects and Devices, Elsinore, Denmark, 27-30 June 1999; 18th Congress of the International Commission for Optics, San Francisco, USA, 2-6 August 1999; Physical Problems in Material Science of Semiconductors PPMSS'99, Chernivtsy, Ukraine, 7-11 September 1999; European Conference on Lasers and Electro-Optics CLEO-Europe 98, Glasgow, Scotland, UK, 14-18 September 1998; Topical Meeting on Photorefractive Materials, Effects and Devices, Chiba, Japan, 11-13 June 1997.

Публікації. Результати досліджень опубліковано в 47 друкованих роботах, серед яких 1 розділ в колективній монографії, 24 статті у фахових міжнародних журналах 22 з яких віднесено до першого та другого квартилів Q1-Q2 за класифікацією SCImago Journal and Country Rank, 1 зареєстрований патент і 22 роботи у матеріалах конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, семи розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатку (список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів). Загальний обсяг дисертації – 283 сторінки. Робота містить 108 рисунків, 6 таблиць та 204 бібліографічних джерела.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, 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 ФРК. Відомі моделі формування просторового заряду у ФРК проаналізовані з метою визначення можливих шляхів підвищення нелінійно-оптичного відгуку напівпровідників в ІЧ діапазоні спектра.

ФРК – фотопровідники. При створенні в кристалі інтерференційної картини світловими хвилями, що перетинаються в його об'ємі, більше вільних носіїв заряду генерується в світлих смугах. Під дією дифузії вони переносяться і в темні області, де захоплюються на пастки. Так формується ґратка просторового заряду. Оскільки ФРК електрооптичні, то поле просторового заряду $E_{sc}(x)$ внаслідок лінійного електрооптичного ефекту модулює в просторі показник заломлення $\Delta n(x)$. Саме ця модуляція і є фоторефрактивною голограмою.

Описано двопучкову нелінійно-оптичну взаємодію та підкреслено її основну особливість – нелокальність. Ґратка показника заломлення виявляється зсунутою на чверть просторового періоду відносно інтерференційного поля. Це зумовлює унікальну властивість – направлений енергообмін між пучками, що записують ґратку [3,4]: один з променів підсилюється, черпаючи енергію від іншого.

Якщо два пучки, сигнальний і накачки, з інтенсивностями I_{s0} , I_{p0} на вході в кристал та I_s , I_p після його проходження, відповідно, записують ґратку, то у наближенні потужної накачки ($I_p = I_{p0}$, $I_{p0} \gg I_{s0}$) вихідна інтенсивність сигнального пучка дорівнює [4]

$$I_s = I_{s0} \exp(\Gamma d), \quad (1)$$

де d – довжина взаємодії, а Γ – експоненціальний коефіцієнт підсилення. Цей коефіцієнт нелінійно-оптичної взаємодії залежить від амплітуди модуляції показника заломлення Δn

$$\Gamma = \frac{1}{m} \frac{4\pi \Delta n}{\lambda \cos \theta'}, \quad (2)$$

де m – контраст інтерференційної картини, λ – довжина хвилі, а θ' – половина кута між пучками всередині кристалу. Модуляція показника заломлення зумовлена лінійним електрооптичним ефектом і становить

$$\Delta n = -\frac{1}{2} n^3 r_{\text{eff}} E_{SC}, \quad (3)$$

де n – показник заломлення середовища в незбудженому стані, r_{eff} – ефективний електрооптичний коефіцієнт, а E_{SC} – поле просторового заряду. E_{SC} зручно описується за допомогою характерних полів [2,5,6]

$$E_{SC} = m \frac{E_q (E_D - iE_0)}{E_q + E_D - iE_0} \frac{\sigma_{Ph}}{\sigma_D + \sigma_{Ph}} \xi, \quad (4)$$

де E_0 – зовнішнє електричне поле, яке може бути прикладено вздовж вектора ґратки, а

$$E_D = K \frac{k_B T}{e}, \quad E_q = \frac{e N_E}{K \epsilon \epsilon_0} \quad (5)$$

– так звані дифузійне поле і граничне поле насичення пасток. Тут K – просторова частота ґратки, k_B – стала Больцмана, T – абсолютна температура, e – заряд електрона, ϵ – відносна діелектрична проникність, ϵ_0 – діелектрична проникність вакууму, N_E – ефективна концентрація пасток. Коефіцієнт ξ враховує внесок в провідність неосновних носіїв заряду, $|\xi| \leq 1$. Множником $\sigma_{Ph}/(\sigma_D + \sigma_{Ph})$ (σ_{Ph} – фотопровідність, σ_D – темнова провідність) враховано залежність поля просторового заряду від інтенсивності світла.

Для достатньо великої інтенсивності фотопровідність значно переважає темнову, і згаданий множник дорівнює одиниці. Для суто дифузійного механізму запису ($E_0 = 0$) поле просторового заряду набуває вигляду [2,6]

$$E_{SC} = m \frac{E_D E_q}{E_D + E_q} \xi. \quad (6)$$

Що стосується іншої важливої характеристики *динамічної* ґратки, часу її релаксації, то він визначається не лише діелектричним (максвелівським) часом релаксації середовища τ_{di} , але і просторовою частотою ґратки та характерними довжинами переносу заряду – довжиною дифузії L_D , дрейфу L_E і дебаєвського екранування l_S

$$L_D = \sqrt{\frac{k_B T}{e}} \mu \tau, \quad L_E = \mu \tau E_0, \quad l_S = 2\pi \sqrt{\frac{\epsilon \epsilon_0 k_B T}{e^2 N_E}}, \quad (7)$$

де μ – рухливість, а τ – час життя вільних носіїв заряду. Для дифузійного механізму запису

$$\tau_{SC} = \tau_{di} \frac{1 + K^2 L_D^2}{1 + K^2 (l_S / 2\pi)^2}. \quad (8)$$

Наведені вирази не лише ілюструють зв'язок поля просторового заряду і нелінійно-оптичний відгук ФРК, але і показують, що дослідження оптичної взаємодії дає можливість визначити деякі характеристики матеріалу як твердого тіла. Це використано в дисертаційній роботі для оцінки характерних значень довжини переносу заряду, ефективної концентрації пасток, добутку рухливості і часу життя вільних носіїв заряду, сталої фотопровідності тощо.

В розділі також проведено стисле порівняння характеристик трьох основних груп ФРК – широкозонних сегнетоелектриків (таких як BaTiO_3 , LiNbO_3 , $\text{Sr}_{1-x}\text{Ba}_x\text{Nb}_2\text{O}_6$), кубічних оксидів типу силікосиленіту ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ та $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$) і нецентросиметричних напівпровідників (таких як GaAs , CdTe та InP). Підкреслено, що напівпровідники вигідно вирізняються серед інших ФРК швидкістю і чутливістю до ІЧ світла.

Добре відомі наведені вище вирази (2-6) показують, що амплітуда модуляції показника заломлення і стала взаємодії залежать від середнього показника заломлення, електрооптичного коефіцієнта та поля просторового заряду. І якщо на поле просторового заряду можна впливати різними способами, то показник заломлення та електрооптичний коефіцієнт притаманні певному матеріалу. Саме тому вкрай важливим є його правильний вибір. І саме тому науковцями з Інституту фізики НАН України ще в 1977 році було запропоновано CdTe для швидкої динамічної голографії [7] як матеріал з найбільшим для всіх напівпровідників електрооптичним коефіцієнтом.

Для обраного матеріалу із заданими значеннями n і r_{eff} надалі покращувати можна лише поле просторового заряду. Одним з поширених способів є прикладання зовнішнього електричного поля. Інколи використання високої напруги викликає перегрів ФРК, створює інженерні труднощі або є небажаним з якихось інших причин. Тоді корисними стають інші методи, серед яких – це збільшення ефективної концентрації пасток, зменшення ступеню двополярності провідності, оптимізація геометрії оптичної взаємодії, використання напівпровідникових кристалів у фоторефрактивних рідинно-кристалічних (РК) гібридах тощо. Різні способи такого покращення досліджено і продемонстровано в дисертаційній роботі.

У другому розділі коротко наведено результати попередніх досліджень фоторефрактивних напівпровідників. Зазначено, що на початок даної роботи найбільші для всіх напівпровідників коефіцієнти взаємодії при дифузійному записі були отримані в CdTe . А серед CdTe найкращі результати показали кристали з домішкою Ge , про що свідчать дані, наведені для порівняння в Таблиці 1. Тому природно, що перші зусилля нашої роботи були спрямовані на кристали CdTe:Ge .

Всі кристали CdTe , досліджені в дисертації, були синтезовані в трьох різних лабораторіях Чернівецького національного університету ім. Юрія Федьковича: О. Е. Панчуком та П. М. Фочуком (Хімічний факультет), І. М. Раренком та З. І. Захарук (Фізичний факультет) і А. В. Савицьким та К. С. Уляницьким (також Фізичний факультет). Слід зазначити, що тісна і

довгострокова співпраця з фахівцями з вирощування кристалів сприяла дослідженню великої кількості зразків з різними домішками, синтезованими дещо модифікованими методами тощо. Без такого широкого вибору кристалів неможливо було б узагальнити висновки щодо властивостей фоторефрактивних центрів в CdTe.

Таблиця 1. Коефіцієнти взаємодії Γ напівпровідників при дифузійному записі, отримані до/поза даної роботи

	λ (нм)	r_{41} (пм/В)	$n^3 r_{41}$ (пм/В)	Γ (см ⁻¹)	посилання
GaAs	1064	1,43	60	0,4	[8]
GaAs	1550	1,43	54	0,18	[9]
InP	1064	1,34	47	0,24	[10]
CdTe:V	1550	6,1	125	0,88	[11]
CdTe:V	1064	6,1	137	0,7	[12]
CdTe:Ge	1064	6,1	137	1,1	[13]
CdTe:Ti	1064	6,1	137	0,61	[14]

Хоча на початку нашої роботи деякі зразки CdTe:Ge демонстрували найбільші сталі взаємодії, водночас спостерігався розкид властивостей від зразка до зразка. Деякі результати не вкладались у просту модель фоторефрактивного ефекту з одним типом носіїв заряду і одним типом пасток [5]. А найбільші для напівпровідників коефіцієнти взаємодії все одно залишались меншими теоретичних, розрахованих для табличного значення електрооптичного коефіцієнту. Для з'ясування причин таких розбіжностей були проведені комплексні дослідження кристалів CdTe:Ge з використанням виродженої та невиродженої по частоті двопучкової фоторефрактивної взаємодії, спектроскопії лінійного і нелінійного (наведеного світлом) поглинання, магнітного кругового дихроїзму, оптичного детектування магнітного резонансу, ЕПР та фото-ЕПР.

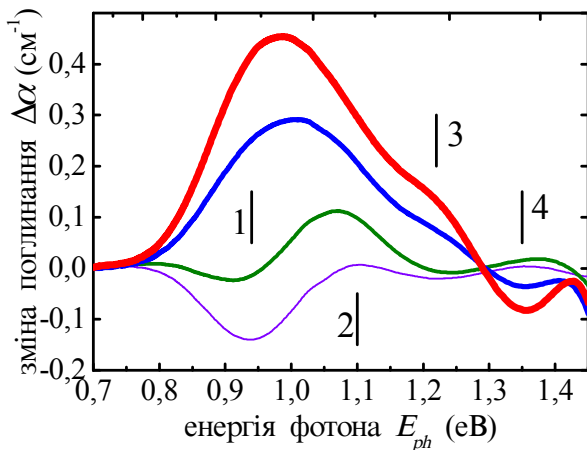


Рис. 1. Спектри змін поглинання після

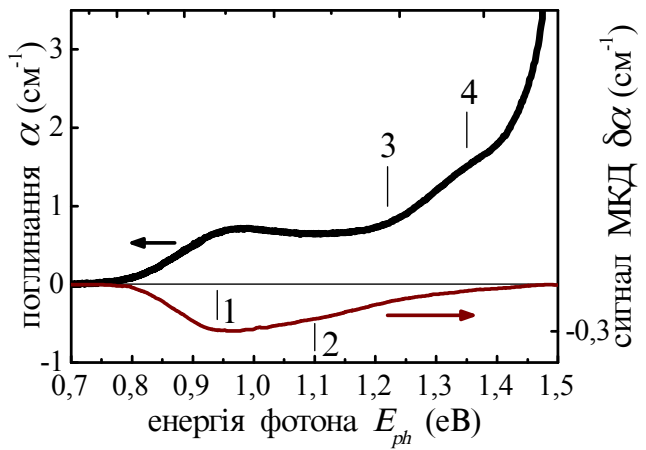


Рис. 2. Тонша лінія – спектр

послідовного освітлення кристалу CdTe:Ge світлом з енергією кванта 0,8 eV, 1,2 eV, 1,3 eV та 1,5 eV від тонкої до товстої лінії. $T = 97$ К. Цифри 1-4 позначають смуги поглинання.

магнітного кругового дихроїзму $\delta\alpha$, $T = 1,4$ К, $B = 2,5$ Тл; товстої лінії – спектр поглинання, $T = 4,3$ К. Цифри 1-4 позначають смуги поглинання.

Аналіз спектрів нелінійного поглинання показав, що чотири смуги поглинання, позначені на Рис. 1 цифрами, присутні у всіх зразках CdTe:Ge з різною відносною вагою. Їх центри знаходяться при таких значеннях: 1 – 0,94 eV, 2 – 1,1 eV, 3 – 1,22 eV, 4 – 1,35 eV. Спільне дослідження спектрів лінійного поглинання і магнітного кругового дихроїзму (Рис. 2) дозволило пов'язати смуги 1 і 2 з парамагнітними центрами, а 3 і 4 з діамагнітними. Оптичне детектування магнітного резонансу виявило, що смуга 1 відповідає Ge на місці кадмію (Ge^+), а смуга 2 – остаточно неідентифікованому центру X в парамагнітному стані. Для обох центрів визначені енергії оптичної активації. Запропонована схема енергетичних рівнів у забороненій зоні CdTe:Ge, представлена на Рис. 3.

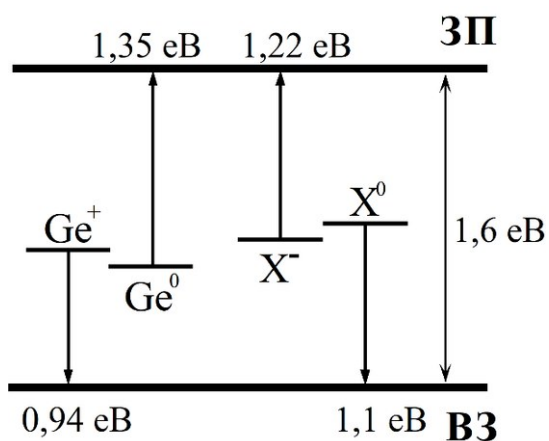


Рис. 3. Схема енергетичних рівнів у забороненій зоні CdTe:Ge; ЗП – зона провідності, ВЗ – валентна зона.

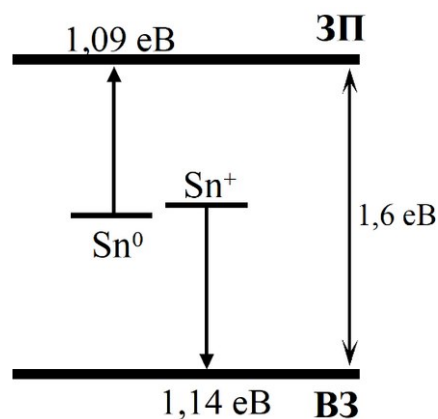


Рис. 4. Схема енергетичних рівнів у забороненій зоні CdTe:Sn.

На різних довжинах хвиль відбувається фотогенерація електронів чи дірок, або обох типів носіїв одночасно. Ґратка, створена основними носіями заряду, може частково компенсуватись іншими. Два центри, виявлені в ході досліджень, можуть входити в різні зразки CdTe:Ge з різними відносними концентраціями та з різними співвідношеннями двох зарядових станів. Тому і основні носії заряду на певній довжині хвилі, і ступінь двополярої провідності в різних кристалах можуть відрізнятись. Все це зумовлює розбіжність фоторефрактивних властивостей CdTe:Ge для різних зразків, яка спостерігалась в експериментах.

Водночас наявність чотирьох смуг поглинання з добре розділеними по спектру положеннями максимумів робить можливим збільшення коефіцієнтів взаємодії завдяки оптимізації довжини хвилі при її налаштуванні на ділянку

спектра, якій відповідає провідність, найбільш наближена до монополярної. В кількох зразках CdTe:Ge для світла з $\lambda = 870$ нм досягнуто коефіцієнт підсилення $\Gamma = 1,7 \text{ см}^{-1}$, який, хоч і отримано майже на межі видимого та ІЧ діапазонів, але є найбільшим для напівпровідників при запису ґраток на пропускання в дифузійному режимі.

Як уже зазначалось, в роботі досліджувались кристали CdTe з різними домішками. До початку роботи було відомо, що домішка олова створює рівень біля середини забороненої зони CdTe:Sn, тобто, є перспективною фоторефрактивною домішкою. В дисертації запропоновано і вперше продемонстровано запис фоторефрактивних голограм в CdTe:Sn неперервним випроміненням з $\lambda = 1,064$ мкм. Кристали з оловом мають певні переваги: вони швидкі і потребують невеликої інтенсивності світла для запису. Але коефіцієнти оптичної взаємодії виявились меншими ніж в CdTe:Ge.

Для з'ясування причини менших сталих зв'язку були проведені комплексні дослідження, подібні до тих, що застосовувались для CdTe:Ge. Результати дозволили ідентифікувати фоторефрактивний центр $\text{Sn}^{0/+}$. З'ясовано, що лише він важливий для формування просторового заряду в CdTe:Sn. Визначено енергії оптичної активації обох зарядових станів $\text{Sn}^{0/+}$. Запропоновано модель енергетичних рівнів у забороненій зоні CdTe:Sn, яку показано на Рис. 4.

Енергії активації двох зарядових станів Sn близькі. Відповідні смуги поглинання значно перекриваються, внаслідок чого одночасно генеруються і електрони, і дірки. Це зумовлює суттєву двополярну фотопровідність і часткову компенсацію основної ґратки вторинними носіями заряду. В результаті в CdTe:Sn спостерігаються зменшені коефіцієнти взаємодії. Пригнічення фотопровідності неосновними носіями заряду істотно підвищить фоторефрактивний відгук кристалів CdTe:Sn. Досягти цього можна спеціальною компенсацією вторинних носіїв додатковою домішкою та/або модифікацією процедури росту.

Що стосується CdTe:Ge, то можливість перезаселення різних центрів під дією опромінення відкриває шлях до оптичного керування підсиленням фоторефрактивного запису. На Рис. 5 показано початковий спектр CdTe:Ge після охолодження зразка до $T = 97 \text{ К}$ і спектр після опромінення світлом з довжиною хвилі 1,064 мкм. Поглинання для більших довжин хвиль помітно зростає. Тобто, відбувається заселення певного рівня, що збільшує загальну кількість фотопереходів при опроміненні в довгохвильовому діапазоні спектра. Отже, збільшується внесок основних носіїв заряду у фотопровідність, і можна очікувати зростання фоторефрактивного відгуку на більших довжинах хвиль.

Гіпотезу було перевірено експериментально. Збільшення відгуку було отримане при запису ґраток світлом з $\lambda = 1,32$ мкм в присутності опромінення з $\lambda = 1,064$ мкм. На Рис. 6 показано залежності коефіцієнта підсилення Γ від інтенсивності світла, що записує ґратку ($\lambda = 1,32$ мкм), в присутності додаткового опромінення різної інтенсивності ($\lambda = 1,064$ мкм).

Використовуючи цю методику, коефіцієнт підсилення Γ було збільшено в 2,5 рази.

Продемонстровано, що методика працює і в протилежному напрямку – при взаємній заміні довжин хвиль запису і додаткового освітлення. Опромінення з довжиною хвилі $\lambda = 1,32$ мкм підсилює фоторефрактивний відгук для світла з $\lambda = 1,064$ мкм. На цій довжині хвилі досягнуто “чисте” підсилення, тобто підсилення, що перевищує всі лінійні втрати в кристалі. Коефіцієнт підсилення $\Gamma = 1,5 \text{ см}^{-1}$ для $\lambda = 1,064$ мкм, отриманий з підсвіткою ($\lambda = 1,32$ мкм) оптимальної інтенсивності, близький до граничних величин для попутної взаємодії в CdTe і перевищує всі відомі на сьогодні значення для ґраток на пропускання в напівпровідниках без застосування зовнішніх полів для $\lambda > 0,93$ мкм.

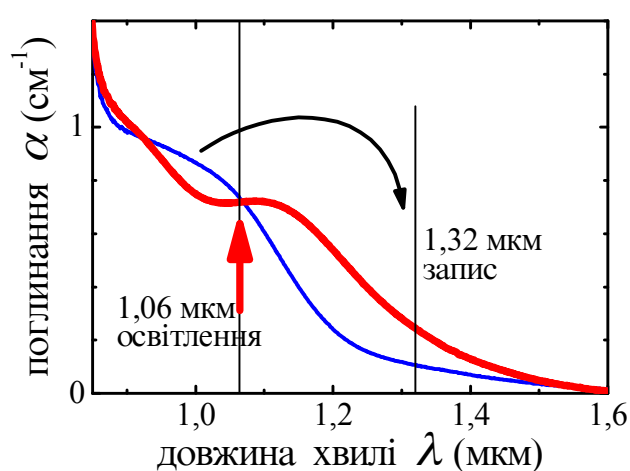


Рис. 5. Спектри поглинання CdTe:Ge; тонша лінія – початковий спектр, товстіша лінія – після освітлення світлом з $\lambda = 1,064$ мкм. $T = 97$ К.

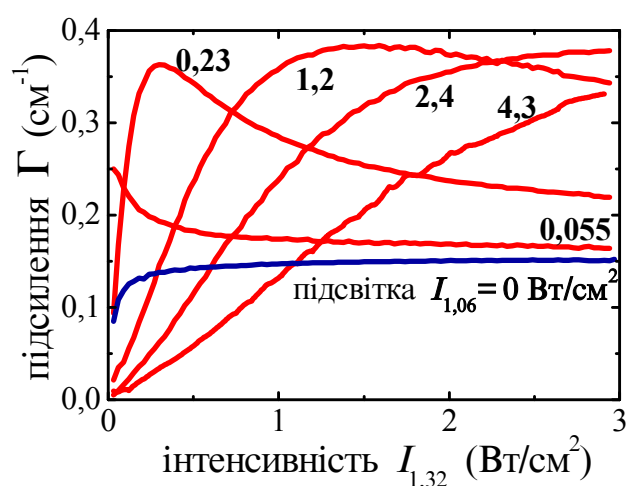


Рис. 6. Залежності Γ від інтенсивності світла, що записує ґратку на $\lambda = 1,32$ мкм, з підсвіткою на $\lambda = 1,064$ мкм. Цифри позначають інтенсивність підсвіткі у Вт/см^2 .

Проведені в роботі дослідження фоторефрактивних центрів в CdTe:Ge показали і основні фізичні процеси, залучені до збільшення фоторефрактивного відгуку при додатковому опроміненні світлом з правильно підбраною довжиною хвилі. Встановлено, що при запису ґратки світлом з $\lambda = 1,064$ мкм основні носії заряду – електрони, а для $\lambda = 1,32$ мкм – дірки. Збільшення поглинання на довжині хвилі $\lambda = 1,32$ мкм (0,94 eV) при опроміненні світлом з $\lambda = 1,064$ мкм (див. Рис. 5) означає збільшення концентрації стану Ge^+ з енергією активації 0,94 eV (див. Рис. 3), саме який постачає основні носії заряду для запису ґратки з $\lambda = 1,32$ мкм. А позитивний ефект освітлення з $\lambda = 1,32$ мкм, полягає в зменшенні концентрації стану Ge^+ , який при запису світлом з $\lambda = 1,064$ мкм є джерелом вторинних носіїв заряду. Отже, в обох випадках додаткове опромінення зменшує негативний внесок у фотопровідність

вторинних носіїв заряду і пригнічує створену ними часткову компенсацію основної ґратки.

В третьому розділі продемонстровано підвищення фоторефрактивного відгуку напівпровідників при запису ґраток на відбивання в дифузійному режимі. Дифузійне поле зростає з ростом просторової частоти. А для створення великого поля просторового заряду на великих частотах потрібна велика густина пасток, що добре ілюструють вирази (5,6). Найбільша просторова частота відповідає зустрічній двопучковій взаємодії. Тому і найбільші коефіцієнти підсилення при дифузійному механізмі запису можна отримати в цій геометрії.

В роботі спільно зі спеціалістами з росту фоторефрактивних напівпровідників з Чернівецького національного університету проведено цілеспрямований пошук кристалів з великою концентрацією пасток, при якій гарантувався б ефективний запис ґраток на відбивання. На першому етапі були протестовані наявні кристали, з яких були відібрані зразки з найбільшим коефіцієнтом підсилення на $\lambda = 1,064$ мкм і $\lambda = 1,55$ мкм. Інформація про відібрані зразки надавалась спеціалістам з росту. Науковці з Чернівецького національного університету уточнювали деталі синтезу, визначали можливі модифікації і синтезували нові кристали з використанням вдосконаленої технології. З нових кристалів в Інституті фізики відбирались кристали з покращеними фоторефрактивними властивостями. Технології, використані для цих кристалів, цілеспрямовано модифікувались далі, в Києві знову відбирались кращі зразки і т.д. Таким чином спільно з науковцями із Чернівецького національного університету були отримані вдосконалені кристали CdTe:Ge з покращеними фоторефрактивними властивостями. Подальші дослідження показали відтворюваність розробленої методики синтезу.

В розділі представлено результати дослідження фоторефрактивних властивостей кристалів, синтезованих на Фізичному факультеті Чернівецького національного університету за участі І. М. Раренка та З. І. Захарук модифікованим методом Бріджмена. На Рис. 7 точками показано експериментальні залежності коефіцієнта підсилення від просторового періоду ґратки Λ для довжин хвиль $\lambda = 1,064$ мкм (а) і $\lambda = 1,55$ мкм (б). Лінії відповідають розрахункам згідно виразу (6) з $N_E \approx 2,4 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ та $\xi = 0,66$ для $\lambda = 1,064$ мкм і з $N_E \approx 1,1 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ та $\xi = 0,7$ для $\lambda = 1,55$ мкм. Штриховка позначає найбільші коефіцієнти підсилення Γ , отримані в інших роботах.

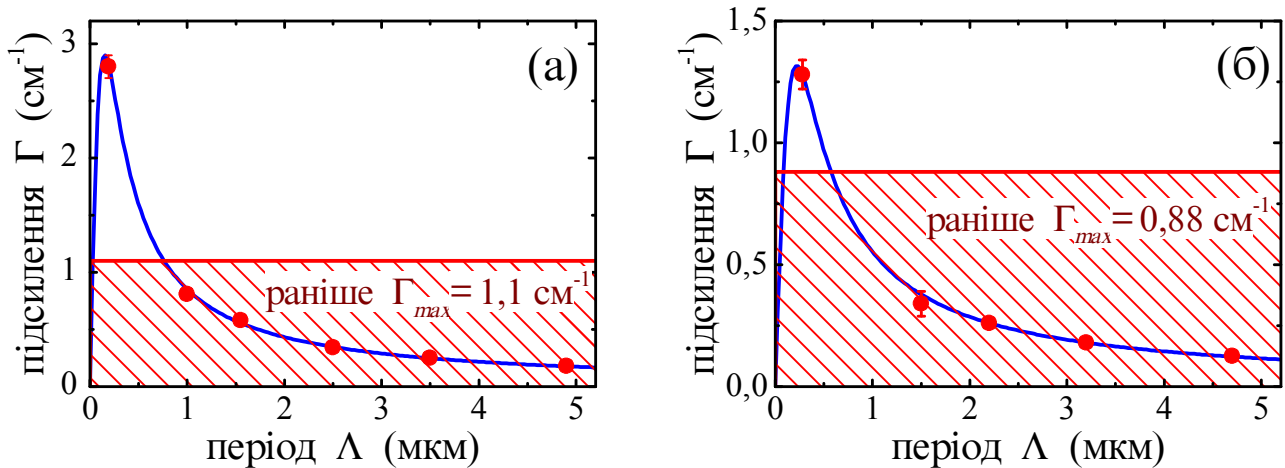


Рис. 7. Залежності коефіцієнту підсилення від просторового періоду ґратки для (а) – $\lambda = 1,064$ мкм, (б) – $\lambda = 1,55$ мкм; точки – експериментальні дані, лінії – розрахунки згідно (6). Штриховка окреслює найбільші коефіцієнти Γ , отримані в інших роботах.

Отже, спільно зі спеціалістами з росту кристалів з Чернівецького національного університету в роботі продемонстрована можливість відтворюваного синтезу кристалів CdTe:Ge з високою концентрацією пасток, необхідною для ефективного запису ґраток на відбивання. Досягнуті коефіцієнти підсилення на двох важливих довжинах хвиль $\lambda = 1,064$ мкм і $\lambda = 1,55$ мкм є найбільшими для всіх напівпровідників при дифузійному механізмі запису і суттєво перевищують відомі – в 2,5 рази на $\lambda = 1,064$ мкм і майже в 1,5 рази на $\lambda = 1,55$ мкм.

Результати досліджень фоторефрактивних властивостей кристалів дозволили зробити оцінки для довжини екранування Дебая, ефективної концентрації пасток, ступеню двополярної фотопровідності, співвідношення ефективних темної провідності і константи фотопровідності. Показана висока однорідність гарних фоторефрактивних властивостей по об'єму зразка.

В четвертому розділі наведені результати дослідження нестационарної фотоелектрорушійної сили (ФЕРС) в кристалах CdTe:Ge, які розширили розуміння процесів формування просторового заряду в цьому напівпровіднику. Якщо світлове поле, що утворює ґратку просторового заряду, коливається у просторі навколо цієї квазістационарної ґратки, то відповідно зміщуються і області фотогенерації вільних носіїв заряду. Максимуми фотогенерації виявляються зсунутими відносно максимумів поля, створюючи нестационарний струм у короткозамкненому зразку. Цей фотострум використовують для характеристики процесів формування просторового заряду і в деяких практичних застосуваннях [15].

Важливою є різниця залежності струму ФЕРС як функції просторового періоду від подібної залежності поля просторового заряду. Якщо поле просторового заряду максимально на періодах ґратки в околі довжини

екранування Дебая, як це впливає з виразів (5-7), то максимум струму ФЕРС i^ω досягається, коли $\Lambda = 2\pi L_D$ [15]:

$$E_{sc} \propto \frac{\Lambda}{\Lambda^2 + l_s^2}, \quad i^\omega \propto \frac{\Lambda}{\Lambda^2 + 4\pi^2 L_D^2} \quad (9)$$

Зважаючи на те, що в напівпровідниках $4\pi L_D \gg l_s$, вивчення властивостей ФЕРС значно розширює можливості характеристики ФРК в діапазон великих просторових періодів.

Були проведені дослідження ФЕРС в кристалах CdTe:Ge з використанням інтерференційної методики. Дві світлові хвилі з $\lambda = 1,064$ мкм інтерферували всередині зразка. В одну з них вносились фазова модуляція $\Delta\varphi \cos(2\pi f t)$ з невеликою амплітудою $\Delta\varphi = 0,1$ рад і частотою f . Внаслідок виникнення нестационарної ФЕРС в короткозамкнутому зразку виникав струм. На Рис. 8а точками показано експериментальний спектр струму ФЕРС для просторового періоду $\Lambda = 3,3$ мкм при інтенсивності $I = 160$ мВт/см².

Для простої моделі формування просторового заряду з одним типом пасток залежність має вигляд частотного відгуку фільтра високих частот

$$i^\omega = i_0^\omega \frac{2\pi f \tau_{sc}}{\sqrt{1 + (2\pi f \tau_{sc})^2}} \quad (10)$$

Експериментальні дані не описуються простою моделлю, а в околі $f = 1$ кГц чітко простежується злам. Суцільна лінія на Рис. 8а – результат наближення суми двох виразів (10) зі сталими часу $\tau_{sc1} = 1,1$ мс та $\tau_{sc2} = 12$ мкс і з майже рівними амплітудами $i_{01}^\omega = 16$ нА та $i_{02}^\omega = 14,5$ нА. Подібний розклад на дві компоненти показує, що два процеси з двома різними характерними часами беруть участь у формуванні загального просторового заряду в CdTe:Ge.

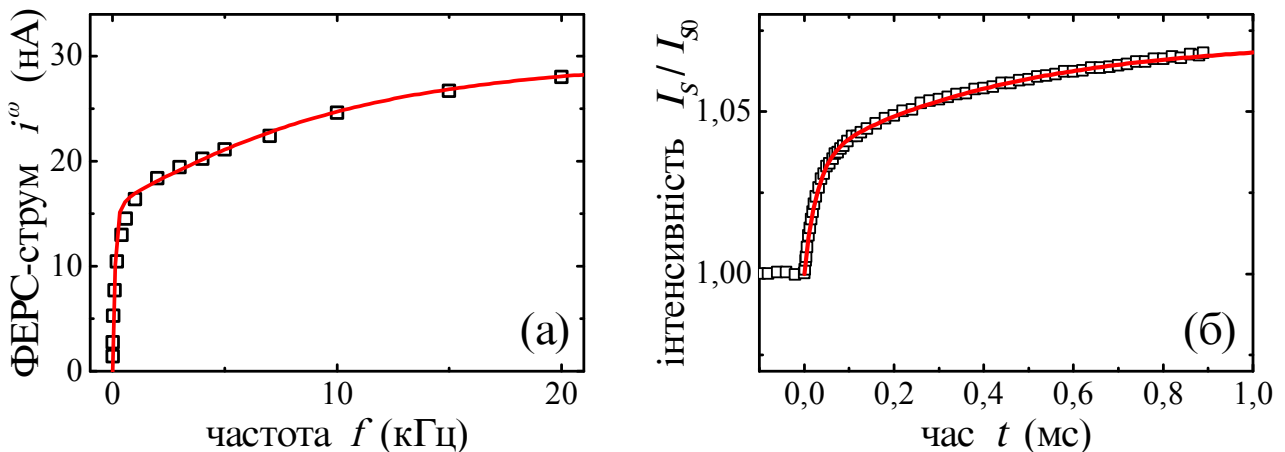


Рис. 8. (а) – частотна залежність струму ФЕРС, точки – експеримент, лінія – наближення суми двох теоретичних спектрів (10) до експериментальних даних з $\tau_{sc1} = 1,1$ мс і $\tau_{sc2} = 12$ мкс; (б) – зміни інтенсивності сигнального пучка в часі при двопучковій взаємодії, точки – експеримент, суцільна лінія – розрахунок

згідно (11) з $\tau_{sc1} = 0,45$ мс і $\tau_{sc2} = 28$ мкс. В обох експериментах $\Lambda = 3,3$ мкм, $I = 160$ мВт/см².

Для з'ясування природи складної форми спектра ФЕРС-струму було досліджено динаміку зміни інтенсивності сигнального променю при двопучковій взаємодії майже в тих самих умовах. Експериментальні результати представлено на Рис. 8б точками. Видно, що зростання інтенсивності сигнального променю в часі не однократно експоненціальне, а приращення інтенсивності ΔI_S можна представити сумою двох експонент у вигляді

$$\Delta I_S(t) = \Delta I_{S1}(1 - \exp(-t/\tau_{SC1})) + \Delta I_{S2}(1 - \exp(-t/\tau_{SC2})). \quad (11)$$

Лінія на Рис. 8б – наближення виразу (11) до експериментальних даних зі сталими часу $\tau_{sc1} = 0,45$ мс і $\tau_{sc2} = 28$ мкс. Ці величини досить близькі до відповідних часів, визначених для спектрів ФЕРС-струму. Відносно невелика розбіжність пояснюється різними орієнтаціями зразка та іншими неконтрольованими змінами експериментальних умов.

Додаткові експерименти і аналіз отриманих даних показали, що фотогенерація вільних носіїв заряду одного знаку (дірок для кристалів, що досліджувались) з пасток двох типів в CdTe:Ge і подальше їх захоплення на ці пастки зумовлює складний процес формування просторового заряду на $\lambda = 1,06$ мкм. Дві складові суттєво (на два порядки) розділені за часом релаксації в широкому діапазоні просторових періодів ґратки. Обидві складові добре описуються окремо, кожна в рамках простої моделі формування просторового заряду з одним центром захоплення. Це свідчить, що формування складових відбувається на різних центрах, заряд між якими при записі майже не перерозподіляється.

Обидві складові загальної ґратки пов'язані з просторовим перерозподілом дірок, повільна – по центрах, які визначені в CdTe:Ge як $X^{0/-}$, а швидка – по центрами $Ge^{0/+}$. Збільшення відносної концентрації зарядового стану Ge^+ має значно прискорити швидкодію CdTe:Ge на довжині хвилі $\lambda = 1,064$ мкм.

Дослідження залежностей частотного відгуку і амплітуди струму ФЕРС від інтенсивності і просторового періоду ґратки дозволили оцінити ефективні довжини дифузійного переносу, добуток рухливості на час життя носіїв заряду, константи фотопровідності та темнові провідності, які відповідають швидкому і повільному процесам формування ґратки просторового заряду.

В п'ятому розділі досліджується вплив зовнішнього електричного поля на формування поля просторового заряду і нелінійно-оптичний відгук напівпровідників. Використання зовнішнього поля є одним з поширених методів підвищення фоторефрактивного відгуку [2,6]. В роботі вплив поля досліджувався для різних напівпровідників, серед яких був CdTe з різними домішками, тверді розчини CdMnTe та CdZnTe, а також GaAs:EL2 та GaAs:Cr. Найцікавіші результати були отримані для CdTe:Ge. Використання змінного

поля різної форми і частоти дозволило отримати коефіцієнти підсилення при двопучковій взаємодії $\Gamma = 6,3 \text{ см}^{-3}$ для амплітуди поля $E_0 = 8,8 \text{ кВ/см}$. Ця стала взаємодії знаходиться серед найкращих значень, досягнутих в напівпровідниках при подібних полях.

Використання як змінного, так і постійного поля дозволило отримати в CdTe:Ge генерацію в схемі подвійного обертаючого дзеркала. Цей результат не лише цікавий з практичної точки зору, але й засвідчує, що досягнута константа зв'язку значно перевищує порогове значення $\Gamma d = 4$ [16], адже сумарне підсилення, крім забезпечення генерації, компенсує всі лінійні втрати на відбивання і поглинання. Це додатково підтверджує, що CdTe:Ge демонструє коефіцієнти фоторефрактивної взаємодії, що є одними з найкращих в полі.

В роботі досліджувались і інші ефекти, пов'язані з зовнішнім електричним полем. В матеріалах з великим добутком рухливості на час життя вільних носіїв заряду в зовнішньому полі можуть виникати хвилі перезарядки пасток [17] або, як їх називають в сучасній літературі, – хвилі просторового заряду (ХПЗ, space-charge waves) [18]. ХПЗ – це слабо затухаючі власні коливання просторового заряду, який формується на пастках.

Як і хвиля будь-якої природи, ХПЗ характеризується хвильовим вектором $\mathbf{k}$, власною частотою ω_k , коефіцієнтом затухання γ_k і добротністю $Q_k = \omega_k / \gamma_k$. Зазначимо, що ω_k мала і порівняна з оберненим часом релаксації просторового заряду. Добротність залежить від зовнішнього поля E_0 і характерних полів, які описують процеси переносу заряду в заданому матеріалі [18]

$$Q_k = \left(\frac{|E_0|}{|E_q|} + \frac{|E_M|}{|E_0|} + \frac{|E_D|}{|E_0|} \right)^{-1}, \quad (12)$$

де E_D і E_q введені раніше, а так зване дрейфове поле $E_M = (K\mu\tau)^{-1}$.

Якщо поле просторового заряду плавно росте зі збільшенням амплітуди зовнішнього поля (див. (4)), то добротність ХПЗ має резонансний характер і може суттєво зростати при певному полі E_0 . Коли резонанс вузький, а добротність у максимумі велика, то можуть спостерігатись резонансні явища, пов'язані з генерацією ХПЗ.

Одним з таких резонансних явищ у ФРК є генерація просторових субгармонік. Виникає вона, якщо в кристалі світлом записується ґратка з вектором $\mathbf{K}$ і одночасно генерується ХПЗ з хвильовим вектором $\mathbf{k}$ дробовим до вектора ґратки: $\mathbf{k} = \mathbf{K}/2, \mathbf{K}/3, \mathbf{K}/4 \dots$. У такому разі основна ґратка стає нестійкою до виникнення ґраток з векторами $\mathbf{K}/2, \mathbf{K}/3, \mathbf{K}/4$, і спостерігається дифракція на цих ґратках, тобто генерація просторових субгармонік. В експериментальних дослідженнях два пучки записують ґратку в ФРК в присутності зовнішнього поля, як це показано на Рис. 9. А поза кристалом виникає додатковий промінь, який є результатом дифракції на ґратці з вектором, дробовим до вектора основної ґратки ($\mathbf{K}/2, \mathbf{K}/3, \mathbf{K}/4 \dots$). Якщо виникнення гармонік, тобто, вищих порядків дифракції на ґратках $2\mathbf{K}, 3\mathbf{K}$,

4К..., часто спостерігається в нелінійній оптиці, то генерація субгармонік – незвичне явище.

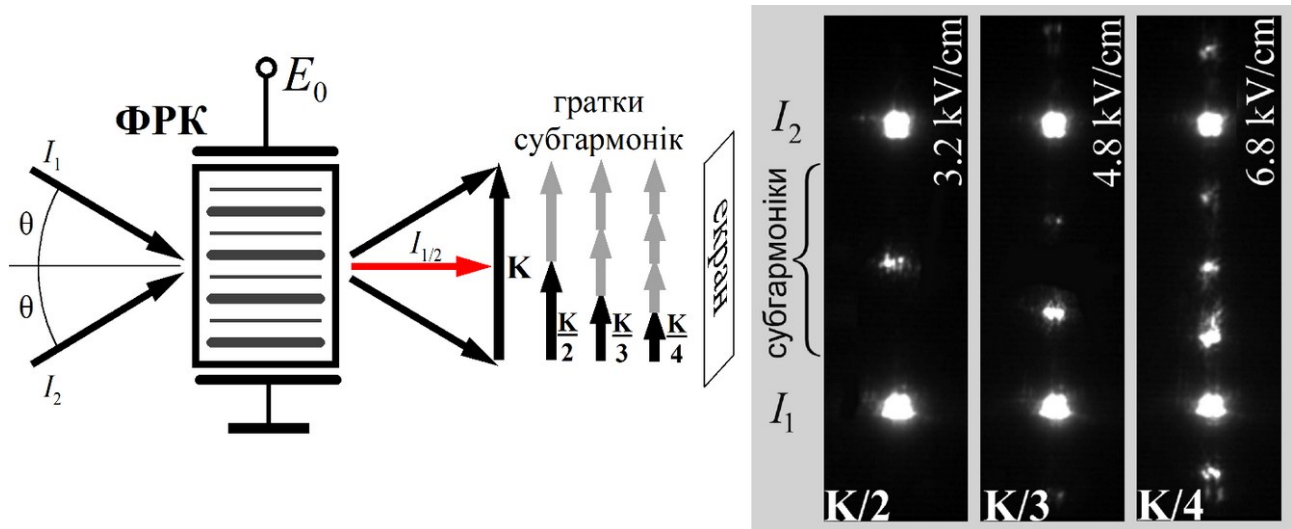


Рис. 9. Схема генерації просторових субгармонік у ФРК і фотографії з екрану за кристалом CdTe:Ge при генерації субгармонік різної кратності в полі різної амплітуди.

Сучасна теорія пов'язує генерацію субгармонік з ХПЗ [18]. І хоча ХПЗ були передбачені саме для напівпровідників, проте протягом довгого часу просторові субгармоніки спостерігались лише в силенітах. В напівпровіднику їх генерація вперше отримана в нашій роботі. Фотографії на Рис. 9 показують зображення з екрану, встановленому за кристалом CdTe:Ge, при генерації субгармонік. Субгармоніки різної кратності виникають при різних амплітудах поля у формі меандру, яке прикладено до кристала.

Побудовані експериментальні діаграми існування субгармонік по полю і просторовому періоду ґратки, показані точками на Рис. 10. Суцільні лінії – розрахунки згідно теорії ХПЗ (вираз (12)). Узгодженість експериментальних даних і теорії підтверджує достовірність останньої.

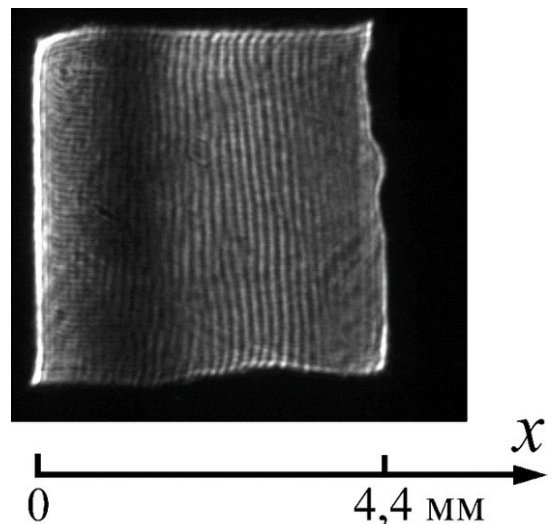
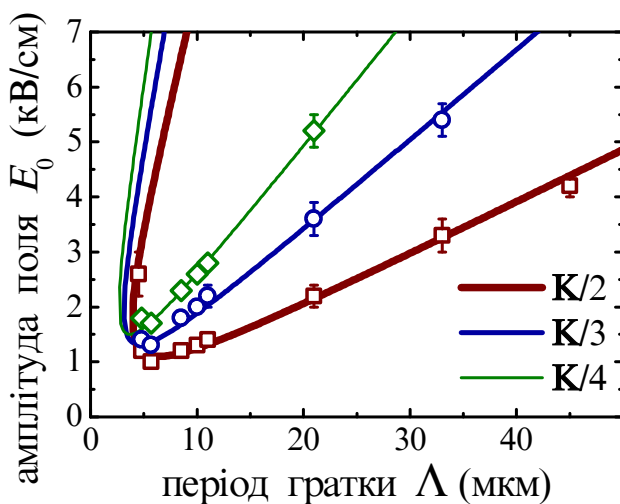


Рис. 10. Области існування просторових субгармонік по періоду основної ґратки і амплітуді поля; точки – експериментальні дані, лінії – розрахунок згідно теорії.

Рис. 11. Візуалізований розподіл поля ХПЗ в CdTe:Ge, $E_0 = 6,4$ кВ/см, $\lambda = 1,064$ мкм.

ФРК є електрооптичними кристалами за означенням. Будь-який просторовий розподіл поля в них зумовлює відповідний розподіл показника заломлення. А розподіл Δn можна візуалізувати за допомогою поляриметрії, як це робиться в просторових модуляторах світла. Отже, можна візуалізувати і поле, створене ХПЗ. Для цього потрібно освітити кристал, прикласти до нього поле в певному напрямку і розмістити правильно зорієнтований зразок між правильно орієнтованими поляризатором і аналізатором. В роботі запропоновано і візуалізовано просторовий розподіл поля, яке створює ХПЗ в кристалі CdTe:Ge при його рівномірному освітленні світлом з $\lambda = 1,064$ мкм в присутності змінного поля у вигляді меандру. Зображення задньої грані кристалу, розміщеного між поляризатором і аналізатором, показано на Рис. 11 для амплітуди поля $E_0 = 6,4$ кВ/см. Вертикальні регулярні смуги з періодом біля 80 мкм відповідають просторовій модуляції поля всередині кристалу, і, по суті, є мапою ХПЗ. Така мапа не лише підтверджує генерацію ХПЗ, але й показує їх розподіл.

В шостому розділі наведені результати досліджень гібридних РК комірок. В таких комірках в фоточутливій підкладці створюється рушійна сила, яка впливає на РК, формуючи в ньому модуляцію показника заломлення з великою амплітудою. Поєднання напівпровідників, чутливих в ІЧ діапазоні спектра, і РК з великими оптичними нелінійностями в одній комірці дозволить створити гібридний пристрій з великими коефіцієнтами взаємодії в ІЧ області спектра.

Різновидом гібридів є так звані фоторефрактивні РК гібриди [19]. Вони складаються з шару РК, розташованого між двома фоторефрактивними або між фоторефрактивним і скляним вікном. Рушійною силою тут є поле просторового заряду, яке створюється світлом у підкладці. Поле входить в РК, як це схематично показано на Рис. 12а, і модулює орієнтацію РК молекул у просторі. Так створюється ґратка показника заломлення в шарі РК.

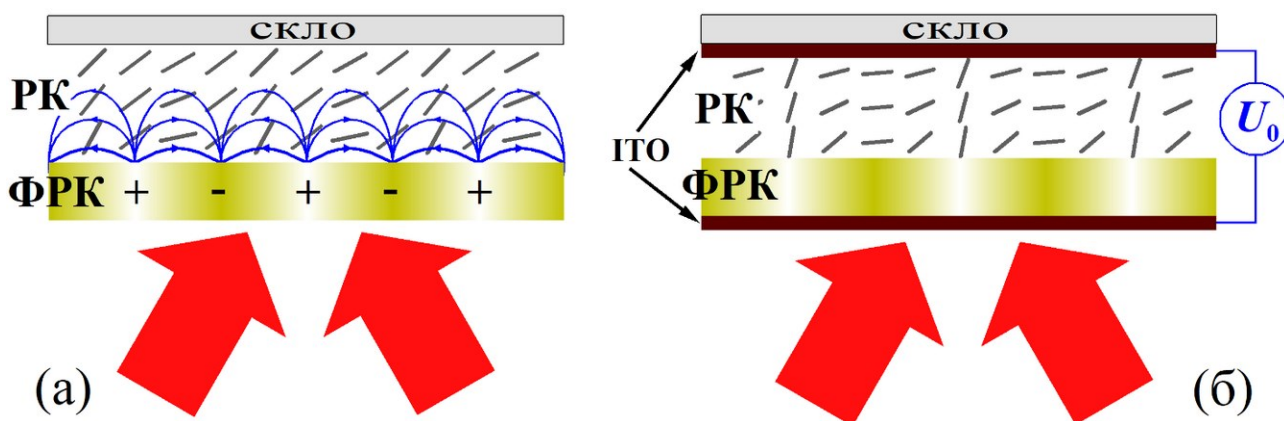


Рис. 12. Схеми фоторефрактивного РК гібриду – (а) і РКВС – (б).

Раніше фоторефрактивні РК гібриди були відомі лише у видимій області спектра. Нами вперше запропоновано використовувати напівпровідники для створення гібридів, чутливих до ІЧ випромінювання. В роботі продемонстровано фоторефрактивний РК гібрид на основі кристалів CdTe. Досліджено двопучкову взаємодію для $\lambda = 1,064$ мкм. Отриманий у шарі РК коефіцієнт підсилення $\Gamma = 16 \text{ см}^{-1}$ на порядок перевищує сталі взаємодії для напівпровідників при запису ґраток на пропускання в дифузійному режимі.

Іншим типом гібридних пристроїв є рідинно-кристалічний вентилювальний пристрій світла (РКВС) [20]. Така комірка складається з фотопровідної підкладки і шару РК, як показано на Рис. 12б. До комірки крізь прозорі електроди прикладається напруга таким чином, що вона проходить крізь підкладку і шар РК. Коли опір підкладки під дією нерівномірного освітлення модулюється в просторі, то відповідно модулюється і напруга крізь РК. В результаті у шарі РК просторово модулюється директор і створюється ґратка показника заломлення.

Нами вперше продемонстровано запис динамічних голограм в РКВС в ІЧ області спектра. Вочевидь ґратка провідності, створена світлом у підкладці, локальна. Ґратка Δn у шарі РК “причеплена” до цієї ґратки провідності. Тобто, ґратка Δn є локальною заданою ґраткою по відношенню до інтерференційного поля в підкладці. На такій ґратці можливе стаціонарне підсилення пучка світла внаслідок дифракції світла від потужного променю до слабкого. Таке підсилення було продемонстровано нами для РКВС з GaAs підкладкою на довжині хвилі $\lambda = 1,064$ мкм.

РКВС складається з кількох шарів, кожен з яких має активний і реактивний опір. Еквівалентна електрична схема включає щонайменше два РС-коливальних контура, з’єднаних послідовно. Відповідно, виникають резонанси напруги в різних шарах комірки та резонанси в підсиленні пучка світла. На Рис. 13а показано залежність підсилення $G = I_S/I_{S0}$ від частоти прикладеної напруги з амплітудою $U_0 = 10 \text{ В}$ для комірки з товщиною РК $d = 16 \text{ мкм}$ і ґратки з просторовою частотою $N = 1 \text{ пл/мм}$, записаної на $\lambda = 1,064 \text{ мкм}$. Найбільше підсилення $G = 11$ отримано на резонансній частоті $f = 200 \text{ кГц}$.

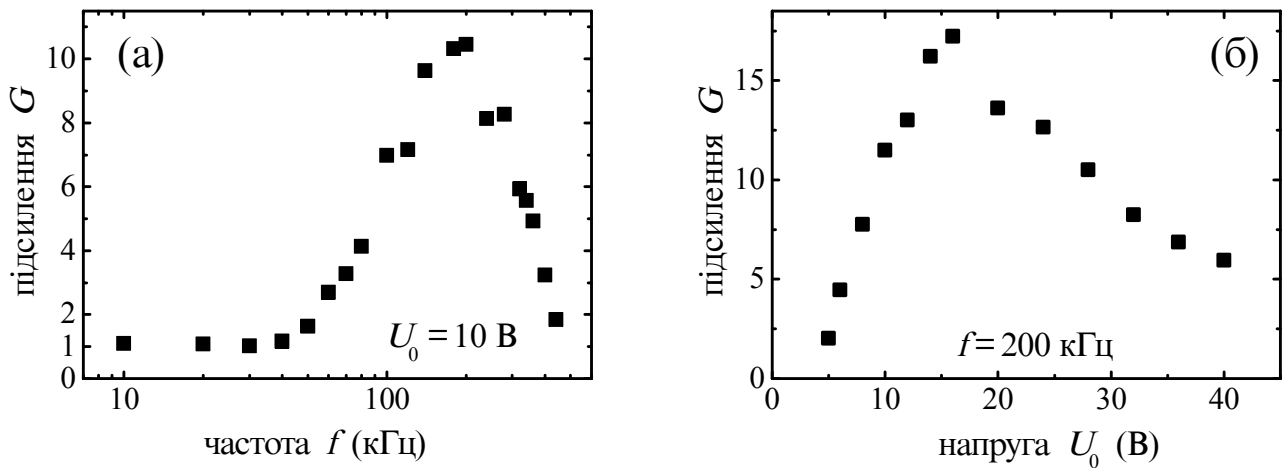


Рис. 13. Підсилення сигнального пучка як функція: (а) – частоти прикладеної напруги з амплітудою $U_0 = 10$ В і (б) – амплітуди прикладеної напруги з частотою $f = 200$ кГц; $\lambda = 1,064$ мкм, $N = 1$ пл/мм, $d = 16$ мкм.

Зовнішня напруга змінює орієнтацію молекул РК, утворюючи ефективний переднахил. Оптимальний ефективний переднахил для формування найбільшої модуляції Δn близький до 45° . Така умова задає резонанс підсилення по амплітуді поля. Він показаний на Рис. 13б. Максимальна досягнута кратність підсилення $G = 17$ майже вдвічі перевищує підсилення в будь-яких РКВС на будь-яких довжинах хвиль.

В розділі також експериментально продемонстровано локальний тип відгуку РКВС, показана можливість збільшення підсилення, змінюючи нахил комірки та використовуючи зовнішню ступінчасту фазову модуляцію однієї з хвиль, що записують ґратку. Досліджено роздільну здатність комірок з різною товщиною шару РК і експериментально підтверджено, що РКВС з тоншим шаром РК забезпечують кращу роздільну здатність, а комірки з товщим шаром РК – більше підсилення.

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

РКВС на основі напівпровідника з високою дифракційною ефективністю можна використати як обмежувач потужності ІЧ світла. При запису висококонтрастної ґратки в РКВС на основі GaAs пучками, близькими по інтенсивності, дифракційна ефективність зростає. Про це свідчить поява трьох вищих порядків дифракції позаду комірки. Дифракція світла в напрямку цих додаткових променів зумовлює значне виснаження накачки і зменшення її інтенсивності поза РКВС. Експериментально продемонстровано зменшення інтенсивності пучка накачки більше ніж в три рази після початку запису ґратки, що можна використати для динамічного обмеження потужності світла.

Подвійне обертаюче дзеркало дає можливість самоузгодження зв'язків між каналами передачі оптичної інформації. В роботі продемонстровано прототип суто оптичного перемикача каналів зв'язку (2×1) на основі подвійних

обертаючих дзеркал в кристалах CdTe:Ge. Перемикач може перекомутувати один з двох каналів чи обидва канали разом на третій, а третій на перший, другий чи на обидва. Передача оптичної інформації дозволена в обох напрямках одночасно. Тут оптичне керування комутаціями здійснюється за допомогою додаткових променів.

Продemonстровано однопроменевий датчик вібрацій спекл полів в ІЧ діапазоні спектра на основі ФЕРС в CdTe. Подібний датчик має дві переваги. По-перше, він однопроменевий, що значно спрощує прилад. Для створення поля просторового заряду використовується спекл поле, сформоване при відбиванні від шорсткої поверхні, де опорна хвиля вже не потрібна. По-друге, датчик має максимум вихідного сигналу для певної амплітуди коливань і тому здатен до самокалібрування по амплітуді вібрацій.

Одним з важливіших застосувань фоторефрактивних напівпровідників є використання їх в адаптивних інтерферометрах. Адаптивний інтерферометр – це інтерферометр, в якому замість напівпрозорого дзеркала дільником світла є динамічна голограма. Завдяки використанню голограми адаптивний інтерферометр здатен обробляти спекл-поля, відбиті в реальних умовах від шорстких поверхонь. А завдяки тому, що голограма динамічна, інтерферометр компенсує зовнішні нестабільності і турбулентності, характерні часи яких більші за час релаксації кристала.

На Рис. 14а схематично показано адаптивний інтерферометр на основі двохвильової взаємодії. Динамічна ґратка записується в кристалі CdTe на довжині хвилі $\lambda = 1,55$ мкм. Для створення необхідного локального відгуку до кристалу прикладено постійне поле. Електрооптичний модулятор вносить в одну з хвиль фазову модуляцію $\varphi(t) = \Delta\varphi \sin(2\pi ft)$, що імітує малі зміщення, які необхідно вимірювати.

Однією з важливих характеристик адаптивного інтерферометра є його частотний відгук. На Рис. 14б він показаний для температури $T = 298$ К порожніми квадратами. На низьких частотах ґратка відслідковує коливання інтерференційної картини, і сигнал відсікається. Нестабільності саме з такими характерними частотами $f < 1$ кГц і потрібно компенсувати, тоді як корисний сигнал лежить в області $f > 1$ МГц, де чутливість інтерферометра максимальна. Залежність на Рис. 14б показує область компенсації інтерферометра, яка знаходиться зліва від частотних характеристик. В роботі продемонстровано, що адаптивні інтерферометри на основі CdTe:Ge в постійному електричному полі мають найкращу комбінацію чутливості і швидкодії в ІЧ діапазоні спектра. Дещо підвищений відгук, який спостерігається на низьких частотах, зумовлений повільною компонентою ґратки, яка пов'язана з мілкими пастками. Небажаний вплив мілких пасток подавлено, а швидкодію істотно підвищено незначним нагріванням та термостабілізацією кристала при температурі, дещо вищій, ніж кімнатна (див. Рис. 14б).

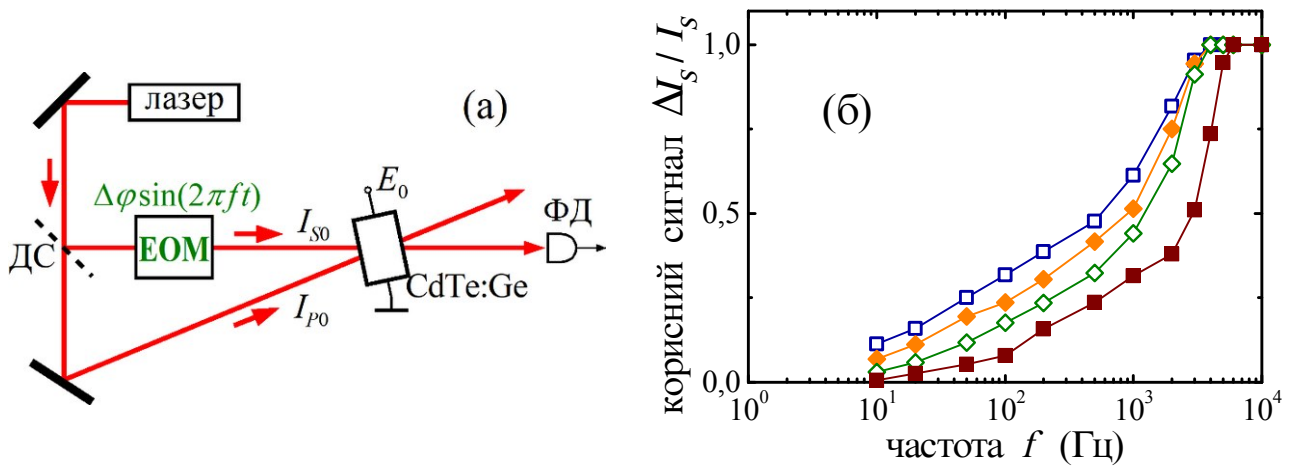


Рис. 14. (а) – адаптивний інтерферометр на основі двохвильової взаємодії в CdTe:Ge. (б) – нормована амплітуда модуляції інтенсивності на виході адаптивного інтерферометра від частоти фазової модуляції на вході для температур кристала $T = 298$ К ($\square$), $T = 302$ К ($\diamond$), $T = 305$ К ($\bullet$) і $T = 313$ К ($\blacksquare$); $\lambda = 1,55$ мкм, $\Lambda = 40$ мкм, $I = 80$ мВт/см², $E_0 = 8$ кВ/см.

В дисертаційній роботі отримане значне збільшення коефіцієнта підсилення при зустрічній взаємодії в CdTe:Ge в дифузійному режимі. Здавалося б, що кристали з такими даними можна використовувати в адаптивних інтерферометрах. Але при дифузійному записі формується нелокальна ґратка (зсунута на $\pi/2$ в просторі відносно інтерференційного поля), а адаптивний інтерферометр для забезпечення максимальної чутливості потребує локальну ґратку. Зазвичай для створення локального відгуку використовується постійне зовнішнє поле. Нами запропоновано і реалізовано адаптивний інтерферометр на основі двопучкової взаємодії, в якому потрібний локальний відгук створюється ступінчастою фазовою модуляцією на $\pi/2$ одного з пучків, що записують ґратку. Схематично його показано на Рис. 15а.

При раптовій зміні фази одного з пучків на $\pi/2$ інтерференційна картина “перестрибує” на чверть просторового періоду. Ґратка на час, порівняний з часом релаксації, стає локальною відносно нового положення смуг, як того потребує інтерферометр для вимірювань малих зміщень. В експерименті для тестування чутливості схеми електрооптичний модулятор, крім додавання до фази значення $\pi/2$, формує ще й високочастотну модуляцію, як це показано на верхній залежності Рис. 15б. Інтенсивність сигнального пучка на виході показана нижчою кривою. Після стрибка фази на $\pi/2$ модуляція інтенсивності різко зростає. Потім ґратка поступово перезаписується на новому місці, і корисний сигнал знову спадає майже до нуля. Але часу релаксації цілком достатньо для проведення вимірів.

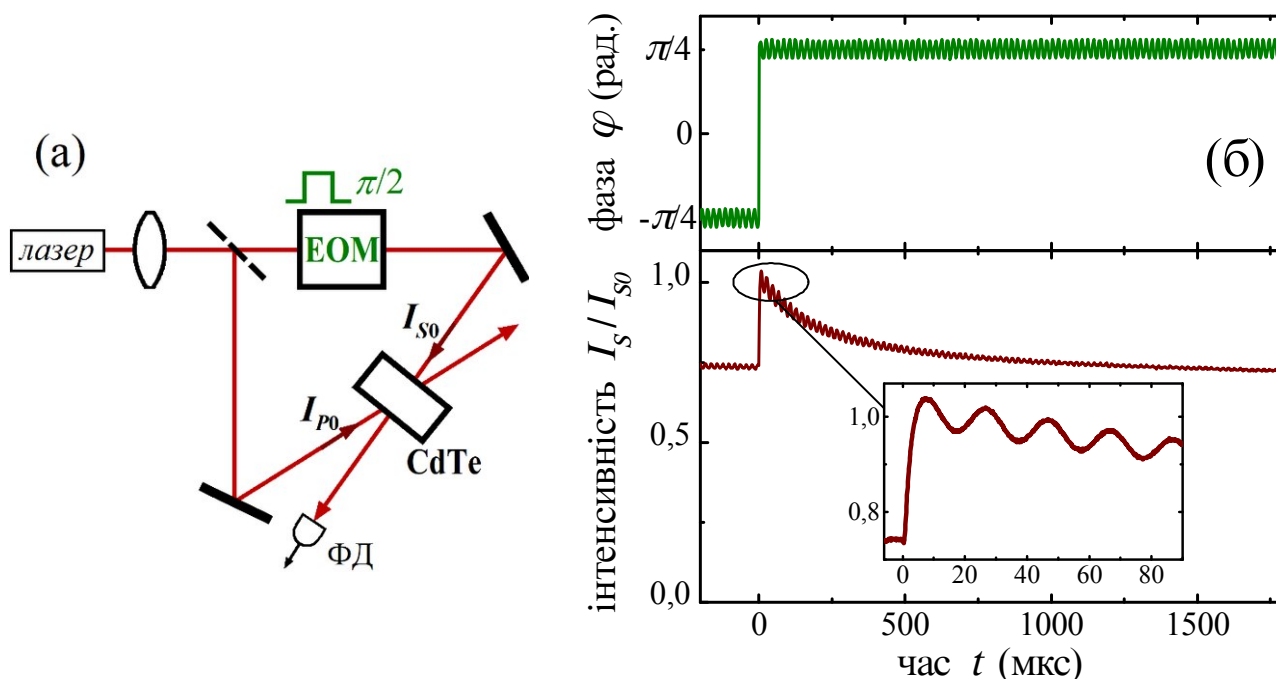


Рис. 15. (а) – адаптивний інтерферометр на основі зустрічної двопучкової взаємодії в CdTe:Ge зі ступінчастою фазовою модуляцією. (б) – модуляція фази на вході і нормована інтенсивність на виході інтерферометра. $\lambda = 1,55$ мкм, $I = 12,6$ Вт/см².

Дослідження запропонованого адаптивного інтерферометра показали, що він демонструє найкращу чутливість для детектування малих зміщень і найкращий частотний відгук серед усіх відомих пристроїв без використання зовнішнього поля на довжини хвилі $\lambda = 1,55$ мкм.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена вирішенню проблеми збільшення нелінійно-оптичного відгуку напівпровідникових кристалів та гібридних елементів на їх основі в ІЧ області спектра. Під час досліджень отримано найбільші для напівпровідників коефіцієнти взаємодії, ідентифіковані домішкові центри в перспективних напівпровідниках, реалізовано запис динамічних голограм в нових матеріалах і пристроях, продемонстровані нові та покращені характеристики відомих застосувань. В результаті досліджень були отримані такі наукові і практичні результати.

1. Два центри, кожен з яких знаходиться в CdTe:Ge в двох зарядових станах, беруть участь у формуванні просторового заряду. Один із центрів – це Ge, що замінив Cd в кристалічній ґратці CdTe. Для обох типів центрів знайдені енергії оптичної активації кожного з двох зарядових станів. Запропонована схема енергетичних рівнів у забороненій зоні CdTe:Ge.

2. Наявність чотирьох рівнів у забороненій зоні CdTe:Ge з різними енергіями активації і, відповідно, з різним положенням спектральних

максимумів смуг поглинання, робить можливим підвищення фоторефрактивного відгуку завдяки налаштуванню довжини хвилі запису ґратки на ділянку спектра, для якої фотопровідність найбільш наближена до монополярної.

3. Суттєві зміни поглинання кристалів CdTe:Ge, індуковані світлом, свідчать про перерозподіл зарядів між домішковими і дефектними центрами. Додаткове освітлення з оптимальною довжиною хвилі дозволяє заселяти рівні, задіяні для створення просторового заряду на заданій довжині хвилі. Оптичне керування перезаселенням рівнів у забороненій зоні CdTe:Ge дає можливість збільшити Γ вдвічі, для запису на довжині хвилі $\lambda = 1,06$ мкм, і майже втричі для $\lambda = 1,32$ мкм. Для $\lambda = 1,06$ мкм, досягнуте “чисте” підсилення, яке перевищує лінійні втрати. $\Gamma = 1,5 \text{ см}^{-1}$ є найбільшим для напівпровідників коефіцієнтом при дифузійному записі ґраток на пропускання на довжині хвилі $\lambda > 0,93$ мкм.

4. Олово запропоновано як фоторефрактивну домішку для CdTe. Реалізовано фоторефрактивний запис в кристалах CdTe:Sn неперервним випроміненням на довжині хвилі $\lambda = 1,064$ мкм.

5. Лише один центр, домішковий центр Sn, залучений до формування ґратки просторового заряду в CdTe:Sn. Визначені енергії оптичної активації для двох його зарядових станів (1,14 eV для Sn^+ та 1,09 eV для Sn^0). Близькість цих енергій зумовлює перекриття відповідних смуг поглинання, двополярну фотопровідність і відносно малі сталі взаємодії. Збільшення останніх можливе завдяки компенсації неосновних носіїв заряду шляхом додаткового легування чи післяростової обробки.

6. Спільно зі спеціалістами з росту кристалів з ЧНУ продемонстрована можливість відтворюваного синтезу кристалів CdTe:Ge з високою концентрацією пасток, достатньою для ефективного запису ґраток на відбивання. Оптимізовані кристали забезпечують високу фоторефрактивну нелінійність. При зустрічній двопучковій взаємодії досягнуті найбільші для всіх напівпровідників коефіцієнти підсилення. Значення $\Gamma = 2,8 \text{ см}^{-1}$ для $\lambda = 1,064$ мкм в 2,5 рази перевищує відомі коефіцієнти для напівпровідників на цій довжині хвилі, а $\Gamma = 1,28 \text{ см}^{-1}$ – майже в 1,5 рази для $\lambda = 1,55$ мкм.

7. Фотогенерація вільних носіїв заряду одного знаку на $\lambda = 1,064$ мкм (дірок для зразків, що досліджувались) з центрів двох типів в CdTe:Ge і подальший їх перерозподіл на цих центрах зумовлює складний процес формування просторового заряду, коли дві складові значно (на два порядки) розділені по часу релаксації в широкому діапазоні просторових періодів ґратки. Повільна складова пов'язана з просторовим перерозподілом заряду (дірок) на центрах, визначених в CdTe:Ge як $\text{X}^{0/-}$, а швидка компонента – на центрах $\text{Ge}^{0/+}$. Збільшення відносної концентрації Ge^+ має значно прискорити відгук CdTe:Ge на $\lambda = 1,064$ мкм.

8. Вперше в напівпровіднику отримано генерацію просторових субгармонік. Побудовано експериментальні діаграми існування субгармонік різної кратності

по амплітуді зовнішнього поля і просторовому періоду основної ґратки. Співставлення експериментальних діаграм з моделлю, що пов'язує субгармоніки даного типу з хвилями просторового заряду, підтвердило достовірність теоретичних припущень.

9. За допомогою поляриметричної методики здійснено безпосередню візуалізацію просторового розподілу поля, створеного хвилею просторового заряду в напівпровіднику.

10. Продemonстровано фоторефрактивний РК гібрид з напівпровідниковою підкладкою, чутливий в ІЧ області спектра, в якому поле просторового заряду, створене в напівпровіднику світлом, проникає в РК і модулює показник заломлення. Коефіцієнт підсилення $\Gamma = 16 \text{ см}^{-1}$, отриманий у шарі РК гібриду, на порядок перевищує відомі коефіцієнти для ґраток на пропускання у фоторефрактивних напівпровідниках без застосування зовнішніх полів.

11. Продemonстровано гібридну РК комірку типу РК вентиля світла на основі напівпровідникової підкладки, чутливу в ІЧ діапазоні. Експериментально підтверджено локальний тип відгуку. В комірці на основі GaAs отримано стаціонарне підсилення слабкого променя. Кратність підсилення $G = 17$ майже вдвічі перевищує всі відомі результати для будь-яких РК вентилів світла в будь-якому спектральному діапазоні.

12. Показано, що швидкодію динамічних голограм у кристалах CdTe:Ge в постійному електричному полі можна підвищити при незначному нагріванні і термостабілізації кристала завдяки пригніченню повільної компоненти ґратки, пов'язаної з мілкими пастками. Цю властивість використано для покращення частотного відгуку адаптивних інтерферометрів.

13. Запропоновано і реалізовано метод перетворення типу відгуку з нелокального на локальний і навпаки за допомогою ступінчастої фазової модуляції на $\pi/2$ однієї із записуючих хвиль. Метод використано для створення адаптивного інтерферометра нового типу. Такий інтерферометр на основі зустрічної взаємодії в кристалах CdTe:Ge демонструє найкращу чутливість для детектування малих зміщень і найкращий частотний відгук серед всіх відомих пристроїв без використання зовнішнього поля на довжині хвилі $\lambda = 1,55 \text{ мкм}$.

14. В роботі продemonстровано декілька прототипів можливих застосувань напівпровідників і пристроїв на їх основі з покращеним нелінійно-оптичним відгуком в ІЧ діапазоні спектра, серед яких обмежувач потужності ІЧ випромінювання на основі РК вентиля світла з напівпровідниковою підкладкою, суто оптичний перемикач каналів зв'язку на основі подвійних обертаючих дзеркал в напівпровідникових кристалах, однопроменевий датчик вібрацій спекл полів в ІЧ діапазоні спектра з можливістю самокалібрування на основі фотоелектрорушійної сили в CdTe.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] H. J. Eichler, P. Günter, and D. W. Pohl, *Laser-Induced Dynamic Gratings* (Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1986).
- [2] L. Solymar, D. J. Webb, and A. Grunnet-Jepsen, *The Physics and Applications of Photorefractive Materials*, Vol. 11 (Oxford University Press, Oxford, 1996).
- [3] D. L. Staebler and J. J. Amodei, *Coupled-wave Analysis of Holographic Storage in LiNbO₃*, J. Appl. Phys. **43**, 3 (1972).
- [4] N. V. Kukhtarev, V. B. Markov, S. G. Odulov, M. S. Soskin, and V. L. Vinetskii, *Holographic Storage in Electrooptic Crystals. II. Beam Coupling — Light Amplification*, Ferroelectrics **22**, 1 (1978).
- [5] N. V. Kukhtarev, V. B. Markov, S. G. Odulov, M. S. Soskin, and V. L. Vinetskii, *Holographic Storage in Electrooptic Crystals. I. Steady State*, Ferroelectrics **22**, 1 (1978).
- [6] M. P. Petrov, S. I. Stepanov, and A. V. Khomenko, *Photorefractive Crystals in Coherent Optical Systems*, Vol. 59 (Springer, Berlin, Heidelberg, 1991).
- [7] Н. В. Кухтарев, Г. А. Холодарь, В. Л. Винецкий, С. Г. Одулов, М. С. Соскин, *Способ динамического преобразования световых пучков*, Авторское свидетельство СССР №603276 (21 December 1977).
- [8] M. B. Klein, *Beam Coupling in Undoped GaAs at 1.06 Mm Using the Photorefractive Effect*, Opt. Lett. **9**, 8 (1984).
- [9] P. Delaye, L. A. de Montmorillon, H. J. von Bardeleben, and G. Roosen, *Photorefractive Wave Mixing in Undoped Liquid Encapsulated Czochralski GaAs at 1.5 Mm: Validation of Photorefractive Modeling*, Appl. Phys. Lett. **64**, 2640 (1994).
- [10] P. Delaye, A. Blouin, D. Drolet, L.-A. de Montmorillon, G. Roosen, and J.-P. Monchalin, *Detection of Ultrasonic Motion of a Scattering Surface by Photorefractive InP:Fe under an Applied Dc Field*, J. Opt. Soc. Am. B **14**, 1723 (1997).
- [11] A. Godard, G. Pauliat, G. Roosen, and É. Ducloux, *Relaxation of the Single-Mode Emission Conditions in Extended-Cavity Semiconductor Lasers with a Self-Organizing Photorefractive Filter*, Appl. Opt. **43**, 3543 (2004).
- [12] P. Delaye, L. A. de Montmorillon, I. Biaggio, J. C. Launay, and G. Roosen, *Wavelength Dependent Effective Trap Density in CdTe: Evidence for the Presence of Two Photorefractive Species*, Optics Communications **134**, 580 (1997).
- [13] K. Shcherbin, A. Shumeljuk, S. G. Odoulov, P. Fochuk, and G. A. Brost, *Relaxation of Photorefractive Gratings in Cadmium Telluride Crystals*, in Proc. SPIE **2795 Nonlinear Optics of Liquid and Photorefractive Crystals**, edited by G. V. Klimusheva and A. G. Iljin (Ai-Danil, Crimea, Ukraine, 1996), pp. 236–243.
- [14] Yu. P. Gnatenko, A. O. Borshch, N. Kukhtarev, T. Kukhtareva, I. O. Faryna, V. I. Volkov, P. M. Bukivskij, R. V. Gamernyk, V. I. Rudenko, S. Yu. Paranchych, and L. D. Paranchych, *Optical, Photoelectric, and Photorefractive Properties of Ti-Doped CdTe Crystals*, J. Appl. Phys. **94**, 8 (2003).

- [15] S. Stepanov, *Chapter 6 - Photo-Electromotive-Force Effect in Semiconductors*, in *Handbook of Advanced Electronic and Photonic Materials and Devices*, edited by H. Singh Nalwa (Academic Press, Burlington, 2001), pp. 205–272.
- [16] S. Weiss, S. Sternklar, and B. Fischer, *Double Phase-Conjugate Mirror: Analysis, Demonstration, and Applications*, Opt. Lett. **12**, 114 (1987).
- [17] Р. Ф. Казаринов, Р. А. Сурис, Б. И. Фукс, О “Термотоковой” Неустойчивости в Компенсированных Полупроводниках, ФТП **6**, 572 (1972).
- [18] B. I. Sturman, *Space-Charge Wave Effects in Photorefractive Materials*, in *Photorefractive Materials and Their Applications I: Basic Effects*, edited by P. Günter and J.-P. Huignard, Vol. 113 (Springer Science + Business Media, LLC, New York, NY, 2006), pp. 119–162.
- [19] N. V. Tabiryan and C. Umeton, *Surface-Activated Photorefractivity and Electro-Optic Phenomena in Liquid Crystals*, J. Opt. Soc. Am. B **15**, 1912 (1998).
- [20] P. Aubourg, J. P. Huignard, M. Hareng, and R. A. Mullen, *Liquid Crystal Light Valve Using Bulk Monocrystalline Bi₁₂SiO₂₀ as the Photoconductive Material*, Appl. Opt. **21**, 3706 (1982).

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Розділ в колективній монографії

1. K. Shcherbin, “Recent progress in semiconductor photorefractive crystals” in *Photorefractive materials and their applications II*, P. Günter and J.-P. Huignard eds. (Springer Science + Business Media, Inc., New York 2007).

Публікації у фахових наукових журналах

2. P. Mathey, G. Gadret, and K. Shcherbin, *Slow light with photorefractive four-wave mixing*, Phys. Rev. A **84**, 063802 (2011).
3. M. P. Petrov, V. V. Bryksin, K. Shcherbin, M. Lemmer, and M. Imlau, *Trap recharging wave mode with a linear dispersion law for space-charge waves in CdTe:Ge*, Phys. Rev. B **74**, 085202 (2006).
4. A. Shumelyuk, K. Shcherbin, S. Odoulov, B. Sturman, E. Podivilov, and K. Buse, *Slowing down of light in photorefractive crystals with beam intensity coupling reduced to zero*, Phys. Rev. Lett. **93**, 243604 (2004).
5. V. A. Kalinin, K. Shcherbin, L. Solimar, J. Takacs, and D. J. Webb, *Resonant two-wave mixing in photorefractive materials with the aid of dc and ac fields*, Opt. Lett. **22**, 1852-1854 (1997).
6. B. Briat, K. Shcherbin, B. Farid, and F. Ramaz, *Optical and magnetooptical study of photorefractive germanium-doped cadmium telluride*, Opt. Commun. **156**, 337-340 (1998).
7. B. Briat, F. Ramaz, B. Farid, K. Shcherbin, and H. J. von Bardeleben, *Spectroscopic characterization of photorefractive CdTe:Ge*, J. Cryst. Growth **197**, 724-728 (1999).

8. K. Shcherbin, S. Odoulov, F. Ramaz, B. Farid, B. Briat, H. J. von Bardeleben, P. Delaye, and G. Roosen, *Charge transfer in photorefractive CdTe:Ge at different wavelengths*, Opt. Mater. **18**, 151-154 (2001).
9. K. Shcherbin, V. Volkov, V. Rudenko, S. Odoulov, A. Borshch, Z. Zakharuk, and I. Rarenko, *Photorefractive Properties of CdTe:Sn*, phys. stat. sol. (a) **183**, 337-343 (2001).
10. K. Shcherbin, V. Danylyuk, Z. Zakharuk, I. Rarenko, M. B. Klein, *Photorefractive recording in ac-biased cadmium telluride*, J. Alloy. Comp. **371**, 191-194 (2004).
11. K. Shcherbin, S. Odoulov, I. Rarenko, and Z. Zakharuk, *Double phase conjugate mirror in germanium doped cadmium telluride*, Opt. Mater. **18**, 159-162 (2001).
12. G. Brost, J. Norman, S. Odoulov, K. Shcherbin, A. Shumelyuk, and V. Taranov, *Gain spectra of beam coupling in photorefractive semiconductor*, J. Opt. Soc. Am. B **15**, 2083-2091, (1998).
13. K. Shcherbin, S. Odoulov, F. Ramaz, D. R. Evans, and B. Briat, *Photosensitive center in CdTe:Sn: Photorefractive, spectroscopic, and magneto-optical studies*, J. Opt. Soc. Am. B **35**, 2036-2045 (2018).
14. K. Shcherbin, *High photorefractive gain at counterpropagating geometry in CdTe:Ge at 1.064 μm and 1.55 μm* , Appl. Opt. **48**, 371-374 (2009).
15. K. Shcherbin, *Spatial subharmonics in a photorefractive semiconductor*, Appl. Phys. B **71**, 123-127 (2000).
16. T. O. dos Santos, J. Frejlich, J. C. Launay, and K. Shcherbin, *Speckle photo electromotive force in CdTe:V and CdTe:Ge for measurement of vibration with large amplitude*, Appl. Phys. B **95**, 627-632 (2009).
17. T. O. dos Santos, J. Frejlich, and K. Shcherbin, *Photo electromotive force in CdTe:Ge: manifestation of two photorefractive centers*, Appl. Phys. B **99**, 701-707 (2010).
18. I. Gvozдовskyy, K. Shcherbin, D. R. Evans and G. Cook, *Infrared sensitive liquid crystal photorefractive hybrid cell with semiconductor substrates*, Appl. Phys. B **104**, 883-886 (2011).
19. K. Shcherbin, I. Gvozдовskyy, and D. R. Evans, *Infrared sensitive liquid crystal light valve with semiconductor substrate*, Appl. Opt. **55**, 1076-1081 (2016).
20. K. Shcherbin, I. Gvozдовskyy, and D. R. Evans, *Optimization of the liquid crystal light valve for signal beam amplification*, Opt. Mat. Express **6**, 3670-3675 (2016).
21. K. Shcherbin, I. Gvozдовskyy, and D. R. Evans, *Liquid crystal light valve with a semiconductor substrate for dynamic holography in the infrared*, J. Mol. Liq. **267**, 61-66 (2018).
22. K. Shcherbin and M.B. Klein, *Adaptive interferometers with no external field using reflection gratings in CdTe:Ge at 1550 nm*, Opt. Commun. **282**, 2580-2585 (2009).
23. K. Shcherbin, V. Danylyuk, and M. Klein, *Characteristics of two-wave mixing adaptive interferometer with CdTe:Ge at 1.06 and 1.55 μm and improved*

temporal adaptability with temperature control, Appl. Opt. **52**, 2729-2734 (2013).

24. K. Shcherbin, V. Danylyuk, and A. V. Khomenko, *Visualization of space-charge waves in photorefractive semiconductor using polarization technique*, Ukr. J. Phys. Opt. **7**, 164-170 (2006).
25. К. В. Щербін, В. М. Данилюк, С. Г. Одулов, *Вплив оптичної взаємодії на ефективність генерації просторових субгармонік*, УФЖ **47**, 644-649 (2002).

Патент

26. M. B. Klein and K. Shcherbin, "Optical homodyne interferometer," U.S. patent 8,149,421 (3 April 2012).

Публікації, що засвідчують апробацію роботи

27. K. Shcherbin, F. Ramaz, B. Farid, B. Briat, and H. J. von Bardeleben, "Photoinduced charge transfer processes in photorefractive CdTe:Ge", in *OSA Trends in Optics and Photonics vol. 27, Advances in Photorefractive Materials, Effects and Devices*, P. E. Andersen, P. M. Johansen, H. C. Pedersen, P. M. Petersen, and M. Saffman eds. (OSA, Washington, DC, 1999), pp. 54-58.
28. K. Shcherbin, S. Odoulov, and V. Danilyuk, "Spatial subharmonics in CdTe:Ge," in *OSA Trends in Optics and Photonics vol. 62, Photorefractive Effects, Materials, and Devices*, D. Nolte, G. Salamo, A. Siahmakoun, and S. Stepanov, eds. (OSA, Washington, DC, 2001), pp. 512-520.
29. M. B. Klein, K. Shcherbin, V. Danylyuk, "Photorefractive CdTe:Ge as a medium for laser ultrasonics detection," in *OSA Trends in Optics and Photonics vol. 87, Photorefractive Effects, Materials, and Devices*, P. Delaye, C. Denz, L. Mager, and G. Montemezzani, eds. (OSA, Washington, DC, 2003), pp. 483-489.
30. K Shcherbin, *Gain spectra in photorefractive CdTe:Ge with bipolar conductivity*, SPIE **3749**, 516-517 (1999).
31. A. V. Khomenko, K. Shcherbin, I. Rocha-Mendoza, and M. A. Garcia-Zarate, *Excitation of space-charge waves in ac-field biased CdTe:Ge under auxiliary illumination*, SPIE **4829**, 949-950 (2003).
32. K. Shcherbin, I. Gvozдовskyy, and D. R. Evans, *Dynamic gratings recording in liquid crystal light valve with semiconductor substrate*, Proc. SPIE **9771**, 97710U-1-6 (2016).
33. K. Shcherbin, M. B. Klein, and D. R. Evans, *Tailoring of amplification spectrum using dc-field for high-precision two-wave mixing adaptive interferometry with CdTe*, Proc. SPIE **10934**, 109341G-1-7 (2019).
34. K. Shcherbin, S. Odoulov, D. R. Evans, F. Ramaz, B. Briat, "Solid-state characterization of CdTe:Sn as a medium for adaptive interferometry," Proc. SPIE **10934**, 109341H-1-7 (2019).
35. D. J. Webb, K. Shcherbin, V. A. Kalinin, J. Takacs, and L. Solymar, *First experimental demonstration of a new technique for photorefractive grating enhancement*, Proc. Topical Meeting on Photorefractive Materials, Effects and Devices PR'97, Chiba, Japan, 1997, pp. 352-354.

36. S. Odoulov, K. Shcherbin, A. Shumelyuk, V. Taranov, G. Brost, and J. Norman, *Gain spectra of beam-coupling in photorefractive semi-insulating semiconductors*, Proc. Topical Meeting on Photorefractive Materials, Effects and Devices PR'97, Chiba, Japan, 1997, pp. 535-538.
37. T. O. dos Santos, J. Frejlich, J. C. Launay, and K. Shcherbin, *Speckle photo electromotive force in CdTe:V and CdTe:Ge for measurement of vibration with large amplitude*, Proc. Photorefractive Materials, Effects, and Devices – Control of light and Matter, PR'09, Bad Honnef, 2009 pp. 14-15.
38. K. Shcherbin, V. Danylyuk, and Marvin Klein, *Improved temporal adaptability of two-wave mixing interferometer with CdTe:Ge using temperature control*, Proc. International Conference on Photorefractive Effects, Materials and Devices – PR'13, Winchester, UK, 2013, p. 105.
39. K. Shcherbin, I. Gvozдовskyy, and D. R. Evans, *Infrared sensitive liquid crystal light valve with semiconductor substrate*, Proc. Photorefractive Photonics – PR'15, Villars, Switzerland, 2015, 3 pp.
40. M. B. Klein, D. R. Evans, and K. Shcherbin, *Two-wave mixing amplification spectrum and adaptive interferometry in CdTe under dc-bias*, in Proc. Photorefractive Photonics and beyond PR'19, Gerardmer, France, 2019, pp. 190-191.
41. F. Ramaz, B. Farid, B. Briat, and K. Shcherbin, *A Spectroscopic Study of Photorefractive CdTe:Ge*, Technical Digest, Conference on Lasers and Electro-Optics Europe CLEO/Europe-1998, Glasgow, UK, 1998, p. 297.
42. K. Shcherbin, S. Odoulov, and P. Poplavko, *Photorefractivity of CdTe:Ge at 1.06 and 1.32 μm* , Technical Digest, Conference on Lasers and Electro-Optics Europe CLEO/Europe-1998, Glasgow, UK, 1998, p. 297.
43. S. Odoulov, K. Shcherbin, B. Briat, F. Ramaz, and B. Farid, *Photorefraction in CdTe:Ge enhanced by auxiliary illumination*, OSA Technical Digest, Conference on Lasers and Electro-Optics CLEO-99, Baltimore, USA, 1999, p. 277.
44. S. Odoulov and K. Shcherbin, *Generation of spatial subharmonics in a photorefractive semiconductor*, OSA Technical Digest, Conference on Lasers and Electro-Optics CLEO-01, Baltimore, USA, 2001, p. 469.
45. K. Shcherbin, O. Shumelyuk, S. Odoulov, and E. Krätzig, *Spectrum of the photorefractive CdTe:Ge response in the near infrared*, OSA Technical Digest, Conference on Lasers and Electro-Optics CLEO-02, Long Beach, USA, 2002, pp. 208-209.
46. K. Shcherbin, S. Odoulov, A. Khomenko, I. Rocha-Mendoza, and M. Carcia-Zarate, *Resonant enhancement of photorefraction in CdTe via excitation of appropriate space-charge waves*, OSA Technical Digest, Conference on Lasers and Electro-Optics CLEO-02, Long Beach, USA, 2002, pp. 209-210.
47. M. B. Klein and K. Shcherbin, *Adaptive receivers for laser ultrasonics using photorefractive CdTe*, OSA Technical Digest, Conference on Lasers and Electro-Optics CLEO-03, Baltimore, USA, 2003, pp. CFK1-1-3.

АНОТАЦІЯ

Щербін К. В. Підвищення нелінійно-оптичного відгуку фоторефрактивних напівпровідників в інфрачервоній області спектра. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.05 – «оптика, лазерна фізика». – Інститут фізики НАН України, Київ, 2021.

В дисертаційній роботі вирішується проблема збільшення нелінійно-оптичного відгуку напівпровідникових кристалів та гібридних елементів на їх основі в інфрачервоній області спектра. За допомогою комплексних досліджень ідентифіковані фоторефрактивні центри в перспективних напівпровідниках, визначені енергії їх активації. Продemonстровано підвищення фоторефрактивного відгуку при оптичному перезаселенні рівнів у забороненій зоні CdTe:Ge. Отримані найбільші для напівпровідників коефіцієнти взаємодії в дифузійному режимі при зустрічній двопучковій взаємодії. Нестационарну фотоелектрорушійну силу використано для розширення характеристики процесів переносу заряду в фоторефрактивних напівпровідниках. Поєднання в гібридних комірках чутливості напівпровідників в інфрачервоній області спектра з великими нелінійностями рідинних кристалів зробили можливим запис ефективних динамічних голограм в інфрачервоному діапазоні. Вперше в фоторефрактивному напівпровіднику отримано генерацію просторових субгармонік. Продemonстровано нові і покращено характеристики вже існуючих пристроїв, в яких застосовано фоторефрактивні напівпровідники та гібридні елементи на їх основі з підвищеним відгуком в інфрачервоній області спектра.

Ключові слова: динамічна голографія, фоторефрактивний ефект, фоторефрактивний напівпровідник, двопучкова взаємодія, інфрачервона область спектра, гібридна рідинно-кристалічна комірка, адаптивний інтерферометр.

АННОТАЦИЯ

Щербин К. В. Повышение нелинейно-оптического отклика фоторефрактивных полупроводников в инфракрасной области спектра. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.05 – «оптика, лазерная физика». – Институт физики НАН Украины, Киев, 2021.

В диссертационной работе решается проблема повышения нелинейно-оптического отклика полупроводниковых кристаллов и гибридных элементов на их основе в инфракрасной области спектра. С помощью комплексных исследований идентифицированы фоторефрактивные центры в перспективных

полупроводниках, определены энергии их оптической активации. Продemonстрировано повышение фоторефрактивного отклика при оптическом перезаселении уровней в запрещенной зоне CdTe:Ge. Получены наибольшие для полупроводников коэффициенты взаимодействия в диффузионном режиме при встречном двухпучковом взаимодействии. Нестационарную фото-электродвижущую силу использовано для расширения характеристики процессов переноса заряда в фоторефрактивных полупроводниках. Объединение в гибридных ячейках чувствительности полупроводников в инфракрасной области спектра с большими нелинейностями жидких кристаллов сделали возможной запись эффективных динамических голограмм в этом диапазоне. Впервые в фоторефрактивном полупроводнике получена генерация пространственных субгармоник. Продemonстрированы новые и улучшены характеристики известных устройств, использующих фоторефрактивные полупроводники и гибридные элементы на их основе с увеличенным откликом в инфракрасной области спектра.

Ключевые слова: динамическая голография, фоторефрактивный эффект, фоторефрактивный полупроводник, двухпучковое взаимодействие, инфракрасная область спектра, гибридная жидкокристаллическая ячейка, адаптивный интерферометр.

SUMMARY

Shcherbin K. V. Enhancement of the nonlinear optical response of photorefractive semiconductors in the infrared spectral range. – Manuscript.

Thesis for the degree of doctor of physical and mathematical sciences, specialty 01.04.05 – optics, laser physics. – Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2021.

The thesis is addressing the actual problem of nonlinear optical response increase of photorefractive semiconductors and hybrid elements on their basis in the infrared spectral range. Analysis of the previous data shows certain advantages of CdTe and CdTe:Ge in particular. The complex study of this crystal is performed, that includes study of the photorefractive properties, optical absorption and light-induced absorption, magnetic circular dichroism, optical detection of magnetic resonance, electron paramagnetic resonance and photo electron paramagnetic resonance. It is found that two photorefractive centers participate in the space charge formation. Energy level diagram in the bandgap is proposed for CdTe:Ge. The technique of increase of the nonlinear optical response is proposed and demonstrated, which uses optical population of necessary levels in the bandgap. The largest coupling constants for all semiconductors in diffusion mode is achieved in CdTe for the transmission geometry using the technique. The targeted search of semiconductors with large effective trap density was performed together with crystal growers from Chernivtsy National University. As a result, the largest coupling constant for all semiconductors operated in diffusion mode is achieved in contra-directional two-beam coupling in

optimized crystals. Dynamic grating recording in a new photorefractive semiconductor, CdTe:Sn, is demonstrated for the first time. Tin photorefractive center is identified and characterized in the crystal using complex research. Optical excitation energies are evaluated for both charge states of the center. The study of nonstationary photo electromotive force allows for extended characterization of the space-charge formation in the photorefractive semiconductors. Two processes operating in two different time scales are associated with two different photorefractive species in CdTe:Ge. Combining in a single hybrid device the sensitivity of the semiconductors in the infrared with large nonlinearity of the liquid crystals (LC) allows for enhanced nonlinear optical response in the infrared. Two types of hybrids are demonstrated with semiconductor substrates – photorefractive-LC hybrid and LC light valve. The best coupling constants in the infrared for such devices are reported for both designs. The generation of spatial subharmonics is achieved in a photorefractive semiconductor for the first time. Experimental study confirms the theory, which links the phenomenon with the space-charge waves. The spatial distribution of the space-charge waves is mapped using polarimetric technique. Several applications of photorefractive semiconductors with enhanced nonlinear optical response in the infrared are demonstrated. The optical limiter for infrared light using LC light valve with semiconductor substrate, all optical interconnect based on double phase conjugate mirrors in semiconductor crystals, the self-calibrated single-beam device for measurement of a transverse vibration amplitude based on photo electromotive force in semiconductor, adaptive interferometer using contra-directional two-beam coupling in photorefractive semiconductor, two-wave mixing adaptive interferometer with improved frequency response are among them.

Keywords: dynamic holography, photorefractive effect, photorefractive semiconductor, two-beam coupling, infrared, hybrid liquid crystal cell, adaptive interferometer.