

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ФІЗИКИ**

ПАВЛОВА СВІТЛАНА ВОЛОДИМИРІВНА



УДК: 535:14:530.182
535.2:621.373.826

**ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЛАМЕНТАЦІЇ ТА СУПУТНІХ НЕЛІНІЙНО-
ОПТИЧНИХ ЯВИЩ У НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛАХ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОГО ДІАПАЗОНУ ДОВЖИН ХВИЛЬ**

01.04.05 – оптика, лазерна фізика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Інституті фізики Національної академії наук України

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Кадан Віктор Миколайович,
Інститут фізики НАН України
провідний науковий співробітник відділу фотонних процесів

Офіційні опоненти: професор, доктор фізико-математичних наук,
Єщенко Олег Анатолійович,
Київський національний університет
професор кафедри експериментальної фізики

кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Лимаренко Руслан Анатолійович,
Міжнародний центр «Інститут прикладної оптики»
НАН України, вчений секретар

Захист дисертації відбудеться « » 2021 року о на засіданні спеціалізованої Вченої ради Д.26.159.01 при Інституті фізики НАН України за адресою: 03028, Київ, проспект Науки, 46.

З дисертацією можна ознайомитися в науковій бібліотеці Інституту фізики НАН України.

Автореферат розіслано « » 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д.26.159.01



О.О. Чумак

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Фемтооптика матеріалів – один із загальновизнаних світових науково-технічних пріоритетів у оптичних дослідженнях і технологіях останніх років. Продовжується вивчення фундаментальних властивостей взаємодії ультракоротких надпотужних світлових імпульсів з матеріалами різного функціонального призначення і структурної організації, розвиваються нові технології прецизійної лазерної мікрообробки функціональних матеріалів, вдосконалюються сучасні лазерні фемтосекундні джерела. На перетині цих трьох напрямків і знаходиться тема дисертаційної роботи.

Однією з ознак розвитку сучасної лазерної техніки і технологій є перехід лазерних твердотільних джерел з довжини хвилі основної гармоніки 1.06 мкм, яка є небезпечною для зору оператора, до більш довгохвильових (1.5 мкм), для яких така небезпека менша. Крім цього, вираженою є тенденція до переходу від масивних монокристалічних чи скляних активних лазерних середовищ до більш сучасних – у формі оптичних волокон, легованих рідкісноземельними елементами (ербій, ітербій), які забезпечують ефективне випромінювання в області 1.5 мкм. Створені останнім часом волоконні лазерні джерела демонструють такі переваги: висока середня та пікова потужності, широкий діапазон довжин хвиль випромінювання, частоти повторення і тривалостей імпульсів, висока якість пучка, компактність джерела і надійність в експлуатації. Крім сказаного, необхідно вказати на можливість гнучкого керування параметрами відповідного лазерного випромінювання для конкретних технологічних задач.

Актуальною є і задача використання волоконних лазерних джерел для прецизійної мікрообробки матеріалів та продукування масивів елементів мікрооптики (мікрохвильоводи, мікролінзи, мікродзеркала, розгалужувачі світлових потоків тощо) в таких оптичних конструкційних матеріалах, як монокристалічний кремній, InP, оптичні халькогенідні стекла, кварц. Зокрема, гостро стоїть проблема створення в об'ємі монокристалічного кремнію якісних мікрохвильоводів та структур, що вкрай необхідно для розвитку кремнієвої оптоелектроніки.

Важливим і маловивченим на сьогоднішній день є питання кінетики та механізмів лазерного руйнування таких матеріалів у фемто- та наносекундному часових діапазонах. Значну увагу приділено вивченню нелінійних процесів просторово-часової трансформації потужних фемтосекундних лазерних імпульсів під час їхнього розповсюдження в середовищах різної природи та супроводжуваних явищ: утворенню філаментів та мультифіламентації, генерації вищих гармонік, зміні тривалості імпульсів тощо.

Отримання нових результатів у зазначених напрямках визначає актуальність теми досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконувалась у відділі фотонних процесів Інституту фізики НАН України, в університеті Бількент та компанії Fiberlast, м. Анкара, Туреччина за підтримки Національної академії наук України та Ради науково-технологічних досліджень Туреччини (Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) (114F256)), Українського державного фонду фундаментальних досліджень (проект F73/23805), а також Науково-технічного центру в Україні (проект 6174) .

Мета роботи: встановити основні властивості нестационарних нелінійних оптичних явищ у сучасних оптичних конструкційних матеріалах (с-Si, InP та халькогенідні напівпровідникові стекла) на довжинах хвиль ~ 1.55 мкм, а також розвинути технологію прецизійної мікрообробки таких матеріалів з використанням створених нових волоконних лазерних джерел фемтосекундних імпульсів випромінювання в телекомунікаційному діапазоні довжин хвиль ~ 1.55 мкм.

Основні завдання:

1) вивчити процеси нелінійної просторово-часової трансформації фс лазерних імпульсів в оптичних матеріалах телекомунікаційного діапазону, а також лазерного запису хвилеводів та інших структур в об'ємі вказаних матеріалів із застосуванням лазерного джерела з оптимізованими параметрами, створеного для розв'язання таких задач. Для цього було необхідно:

2) розробити фс ербій-ітербієвий волоконний лазер та дослідити механізми впливу нелінійних ефектів на його вихідні параметри;

3) дослідити закономірності неруйнівної взаємодії фс лазерного випромінювання з довжиною хвилі 1.55 мкм (утворення філаментів, процесів генерації гармонік, режимів локалізації та просторово-часової динаміки імпульсів) із актуальними оптичними матеріалами телекомунікаційного діапазону (с-Si, InP та халькогенідні напівпровідникові стекла);

4) визначити режими формування лазерно-індукованих хвилеводів та інших структур (вибір параметрів лазера, сканувальної та фокусувальної системи) в оптичних матеріалах лазерними фемтосекундними імпульсами на довжинах хвиль 1.55 мкм та 800 нм;

5) розробити комп'ютерну програму для обчислення просторового профілю лазерно-індукованої зміни показника заломлення матеріалу виходячи з дефокусованих мікроскопічних зображень.

Об'єкти досліджень: монокристали Si, InP та напівпровідникові функціональні стекла As_2S_3 , $65\text{GeS}_2\text{-}25\text{Ga}_2\text{S}_3\text{-}10\text{CsCl}$.

Предмет досліджень: нелінійні явища (філаментация, генерація гармонік, еволюція імпульсів та спектрів випромінювання), широкодіапазонна кінетика лазерного руйнування матеріалів, об'ємне просторове структурування та запис хвилеводів у прозорих матеріалах телекомунікаційного діапазону довжин хвиль.

Методи досліджень: фемтосекундна часороздільна мікроскопія, спектроскопія видимого та телекомунікаційного діапазонів, математичне моделювання процесів взаємодії фс лазерного випромінювання з оптичними матеріалами.

Наукова новизна полягає в таких отриманих результатах:

із застосуванням методів часороздільної мікроскопії встановлено вплив двофотонного поглинання на особливості просторово-часової трансформації фс лазерних імпульсів із довжиною хвилі 1.55 мкм під час поширення у c-Si, який проявляється у збільшенні тривалості осьової частини імпульсів;

спостережено явища філаментатії і мультифіламентатії фс лазерних імпульсів з $\lambda=1550$ нм в As_2S_3 ;

виявлено асиметричний характер розширення частотного спектру фс лазерних імпульсів із довжиною хвилі 1.55 мкм під час їхнього поширення у c-Si внаслідок внеску лазерно-індукованої плазми в процес фазової самомодуляції;

визначено умови та з їх використанням здійснено запис хвилеводів фс лазерними імпульсами з довжиною хвилі 1.55 мкм в об'ємі c-Si та просторових структур у стеклах As_2S_3 та $65\text{GeS}_2\text{-}25\text{Ga}_2\text{S}_3\text{-}10\text{CsCl}$ фс лазерними імпульсами; визначено просторові профілі лазерно-індукованої зміни показника заломлення хвилеводів у оптичних матеріалах;

показано, що при енергії лазерного випромінювання 1.8 мкДж у кристалічному InP можлива лише приповерхнева стала модифікація на глибині до 150 мкм на довжині хвилі 1550 нм.

Практичне значення одержаних результатів та рекомендації

1. Здійснені експериментальні дослідження і програмне моделювання зміни спектра та часової форми імпульсу у волокні, які дозволили визначити оптимальну довжину волокон, рівень вхідного сигналу та потужність накачування для кожного підсилювача, які можуть бути корисними розробникам волоконних фс лазерів для практичних застосувань в області обробки матеріалів.

2. Встановлення впливу двофотонного поглинання на просторово-часову трансформацію фс лазерного імпульсу під час поширення в c-Si, визначення розмірів області локалізації енергії лазерного випромінювання, параметрів лазерно-індукованого плазмового каналу важливі для розробки процесів і технологій лазерної обробки кремнію фс імпульсами великої інтенсивності.

3. Реалізовані в дисертаційній роботі процеси формування хвилеводів у об'ємі c-Si, глибокий запис протяжних структур у As_2S_3 , та приповерхнева модифікація в InP з використанням фс лазерного випромінювання на довжині

хвилі $\lambda=1.55$ мкм можуть відкрити новий шлях для виготовлення інтегрованих елементів електроніки, голограм, 3D запису в об'ємі матеріалу.

4. Розроблена програма обчислення зміни показника заломлення може використовуватися для швидкого визначення просторових профілів лазерно-індукованих змін показника заломлення на основі тіньограм, отриманих методом мікроскопії дефокусування.

5. Із застосуванням методів нелінійного підсилення та моделювання поширення імпульсів у нелінійному середовищі з дисперсією створено волоконний ербій-ітербієвий фс лазер з оптимізованими параметрами у порівнянні з існуючими на той час системами.

Особистий внесок здобувача

Представлені в дисертації та в наукових працях результати одержано за безпосередньої участі дисертантки на всіх етапах роботи. Відповідно до поставлених завдань, дисертантка разом з науковим керівником д.ф.-м.н. В.М. Каданом брала активну участь у проведенні експериментів та в теоретичному аналізі отриманих результатів, а саме: в дослідженнях нелінійної просторово-часової трансформації та особливостей взаємодії фс лазерного випромінювання з довжиною хвилі 1.55 мкм із c-Si та халькогенідному склі As_2S_3 , описаних в роботах [1, 2, 4, 6]. Дисертанткою виготовлено фс ербій-ітербієвий волоконний лазер та досягнуто найвищої енергії фс лазерного імпульсу (2 мкДж) з тривалістю 410 фс. Разом з доктором Павловим І.А. досліджено вплив нелінійних ефектів на вихідні параметри лазера; спільно з доктором Н. Kalausoglu проведено програмне моделювання поширення імпульсів у нелінійному середовищі з дисперсією. Здобувачем спільно з іншими авторами підготовлено матеріали для публікації [3]. У представленій роботі [5] експериментальну частину виконано дисертанткою разом з Павловим І.А. Зокрема доведено можливість формування об'ємних хвилеводів та вивчено вплив швидкості сканування на формування хвилеводів у кремнії на довжині хвилі лазерного випромінювання $\lambda=1.55$ мкм. Дисертанткою розроблено програму обчислення зміни показника заломлення на основі рівнянь переносу інтенсивності та оберненого перетворення Абеля. Дисертанткою особисто проведено експерименти зі створення структурних модифікацій в InP. Дисертантка спільно з іншими авторами брала участь в обговоренні всіх отриманих результатів та їх підготовці до публікацій.

Апробація результатів дисертації

Основні результати дисертації були представлені на таких конференціях:

- Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (Munich, Germany, 2019);
- Fotonik 2019 (Istanbul, Turkey, 2019);
- 8th International Scientific and Technical Conference "Sensor Electronics and Microsystem Technologies" (SEMST-8) (Ukraine, Odessa, 2018);

- X international conference on topical problems of semiconductor physics (Truskavets, Ukraine, 2018);
- Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (Munich, Germany, 2017);
- APS March Meeting (New Orleans, USA, 2017);
- XVI International Conference of Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems (ICPTTFN-XVI) (Ivano-Frankivsk, Ukraine, 2017);
- Scientific and technical conference "Laser technologies. Lasers and their application" (Truskavets, Ukraine, 2017).

Публікації: Основні матеріали та результати дисертації представлені в 6-ти наукових публікаціях у вітчизняних та міжнародних журналах, а також у 8-ми збірниках тез конференцій.

Структура та обсяг дисертації: Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Обсяг дисертації становить 130 сторінок, з них – 109 сторінок основного тексту, що містить 61 рисунок, 2 таблиці та 127 бібліографічних джерел.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **Вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи та її зв'язок з науковими програмами і темами досліджень, сформульовано мету і завдання досліджень, визначено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, наведено дані щодо апробації роботи, публікації та особистий внесок дисертантки, структуру та обсяг дисертації.

У **розділі I** *“Фемтосекундні волоконнооптичні лазерні джерела: сучасні тенденції та проблеми, що виникають при підсиленні імпульсів”* зроблено огляд літературних джерел за цією тематикою. Основну увагу зосереджено на побудові волоконних лазерів ультракоротких імпульсів (методи отримання ультракоротких імпульсів та механізми синхронізації мод у резонаторі, методика підсилення чирпованих імпульсів, типи та переваги оптичних компресорів). Звернуто увагу на основні ефекти, що виникають при поширенні та підсиленні світла у волокні та їхній вплив на досягнення високих вихідних параметрів (фазова самотуляція, вимушене комбінаційне розсіювання, вимушене розсіювання Манделштама-Бріллюена, дисперсія [1]), проаналізовано деякі публікації інших авторів [2], присвячені фемтосекундним лазерам, що стосуються проблематики дисертаційних досліджень.

У **розділі II** *“Методика експерименту: створення оригінального фемтосекундного оптоволоконного лазера на довжині хвилі випромінювання 1.55 мкм”* детально описано результати (вихідні параметри, аналіз спектрів та імпульсу для кожного підсилювача) розробки фс лазера на довжині хвилі 1.55 мкм (рис.1), що складається з:

осцилятора, який побудовано на основі активного Er-80 4/125 волокна, за кільцевою схемою. Режим синхронізації мод здійснюється за допомогою

контролерів поляризації. Основні параметри: частота слідування – 57 МГц, енергія імпульсу – 0.65 нДж, загальна дисперсія $D=0.0151$ пс/нм;

трьох попередніх підсилювачів, які базуються на ербій та ербій-ітербієвих волокнах, та джерел накачування на довжині хвилі 976 нм. Випромінювання лазерних діодів надходить в активне волокно через мультиплексер (WDM) у випадку волокон із малим діаметром ядра (до 7 мкм) і комбайнер (MPC) для багатомодових волокон. Випромінювання діодів подається назустріч підсилюваному сигналу. Довжини волокон підбиралися такими, щоб підтримувати спектр подібним до початкового і в той же час мінімізувати нелінійні ефекти (НЕ);

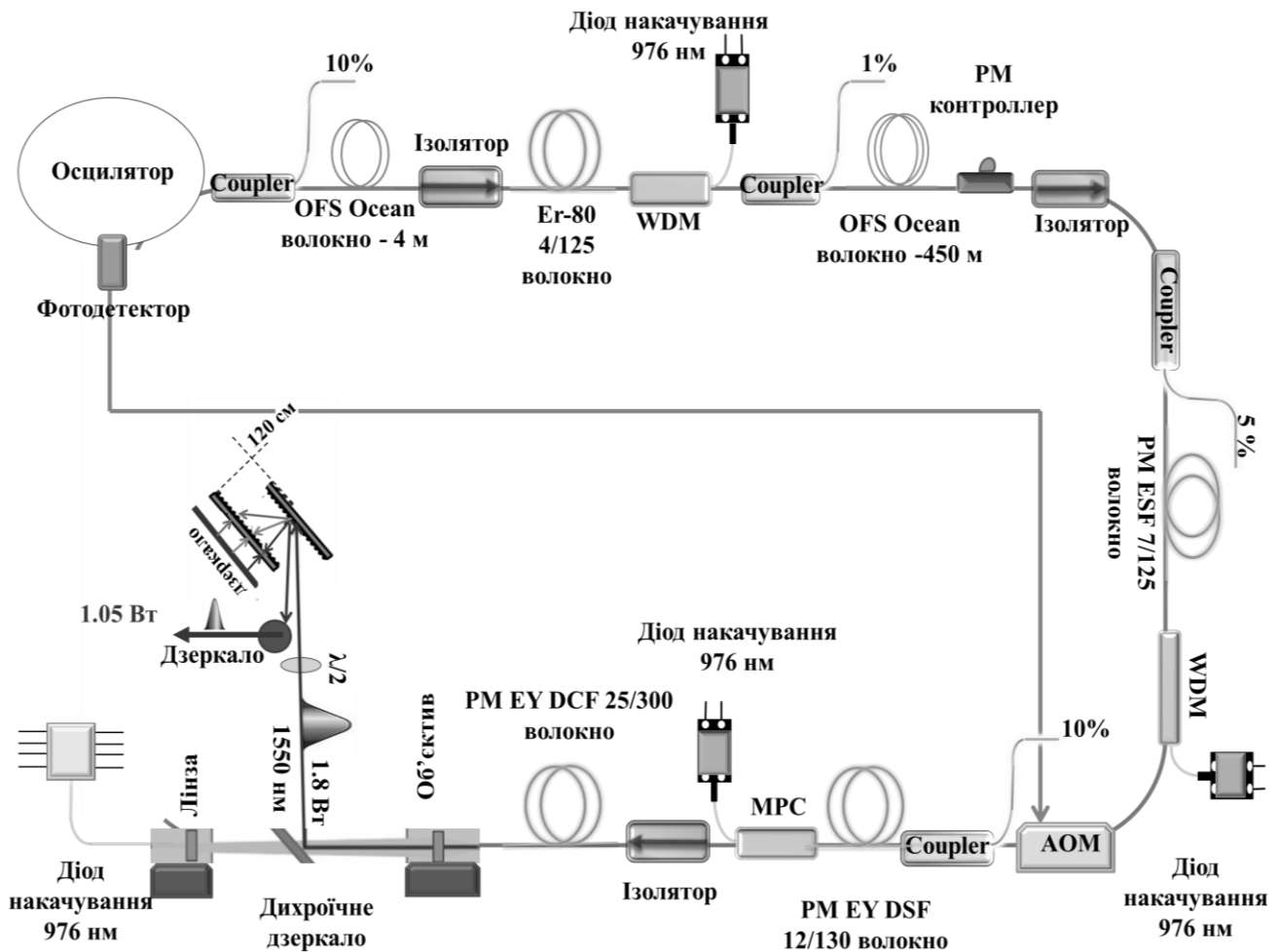


Рис.1. Схема експериментальної установки.

Coupler – розгалужувач, WDM, MPC – одномодові та багатомодові компоненти для подачі випромінювання у волокно, АОМ – акустооптичний модулятор. Типи волокон: SMF – одномодове, DCF – з подвійною оболонкою, ЕУ – ербій-ітербієве, РМ – з підтримкою поляризації.

основного підсилювача, який складається з 50 см волокна, легованого Er-Yb, з подвійною оболонкою (діаметр зовнішньої оболонки – 300 мкм). Використання волокна з великим діаметром серцевини (25 мкм) забезпечує зменшення довжини активного середовища, і, як наслідок, зменшення нелінійних ефектів. Завдяки подвійній оболонці волокна підвищується допустимий рівень подачі випромінювання діодів накачування, водночас збільшуючи вихідну потужність. Для цього підсилювача випромінювання діодів накачування подається через вільний простір (без зварювання волокон), що також значно зменшує вплив нелінійних ефектів;

компресора, який складається з двох ґраток. Внаслідок поширення світла у волокні OFS Ocean довжиною 450 м з нормальною дисперсією ($D=-44$ пс/нм×км), імпульс розтягується майже до 600 пс і є позитивно чирпованим (це волокно є основним для визначення чирпу імпульсу). Для такого типу лазера найбільш ефективним є компресор на основі ґраток, що забезпечує негативну дисперсію. Шляхом регулювання відстані між ґратками (оптимальна відстань для нашого компресора 120 см) забезпечується компресія імпульсу до найкоротшої можливої тривалості.

Проведено чисельне моделювання генерації та поширення імпульсів у нелінійному середовищі з дисперсією, яке дозволяє визначити оптимальну довжину волокон, а також інтерпретувати експериментальні вимірювання. Результати моделювання еволюції спектральної ширини та тривалості імпульсу в підсилювачах відображено на рис.2.

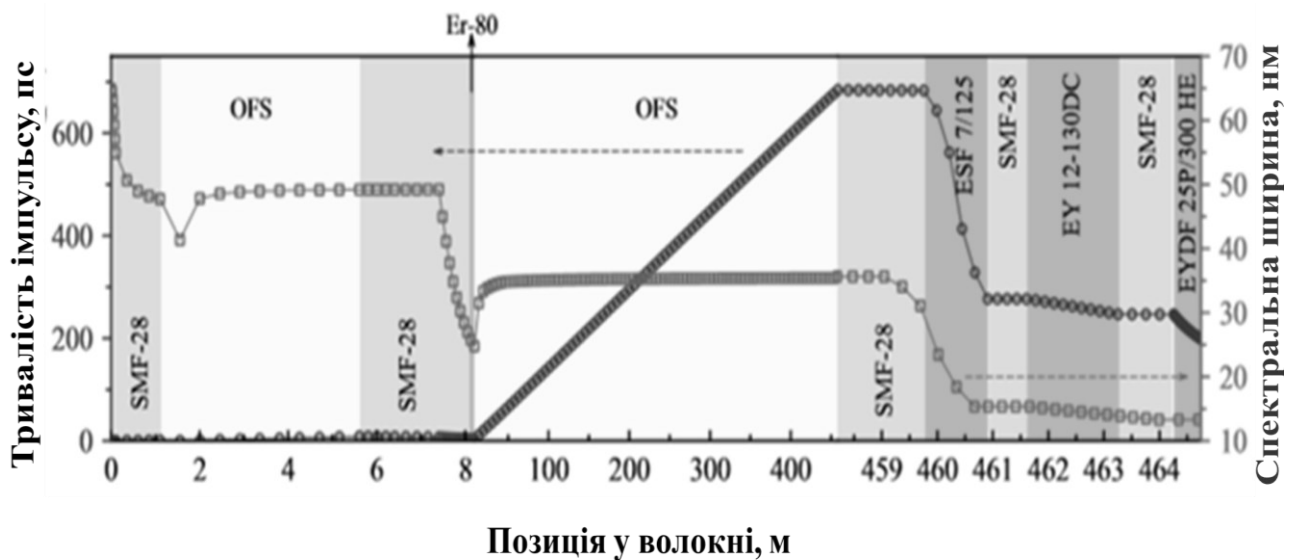


Рис.2. Поширення імпульсів у нелінійному середовищі з дисперсією. Моделювання.

Саме завдяки правильно підібраній довжині волокон та потужності вхідного сигналу для кожного підсилювача, було досягнуто таких вихідних параметрів (таблиця 1):

Частота повторення (МГц)	Середня потужність (Вт)	Тривалість імпульсу (фс)	Енергія імпульсу (мкДж)
1	1.05	370	1
0.5	0.8	400	1.6
0.25	0.54	410	2.16

Таблиця 1. Вихідні параметри лазера.

Для волоконного лазера потужністю 35 Вт на довжині хвилі 1550 нм вивчено умови виникнення ефекту плавлення для волокон різних типів. Ефект плавлення волокна, вперше виявлений в 1987 році [3], – це катастрофічне руйнування серцевини волокна внаслідок поширення світла назустріч сигналу генерації. Зустрічне світло у волокні може з'являтися внаслідок контакту вихідного кінця з абсорбуючими матеріалами, згину волокна, запилення, теплового ефекту тощо.

Розділ III *"Дослідження нелінійних нестационарних оптичних явищ у напівпровідниках, перспективних для оптоелектронних та телекомунікаційних застосувань"*. У першій частині розділу представлено огляд літератури за тематикою: механізми взаємодії фс лазерних імпульсів із прозорими матеріалами, оптичні властивості c-Si, InP, As₂S₃ [4], стан сучасного рівня розвитку даного напрямку досліджень та практичне застосування вказаних матеріалів [5-7]. Основну увагу приділено питанням трансформації гауссового пучка, філаментатії сфокусованого випромінювання, визначенню параметрів випромінювання та плазмових каналів, які є визначальними для формування хвилеводів та інших структур у прозорих матеріалах.

У другій, експериментальній частині розділу:

1) Визначено особливості трансформації гауссового пучка фс випромінювання з довжиною хвилі ~ 1.55 мкм у c-Si, спостережено утворення філамента та мультифіламентатію в As₂S₃.

2) Із застосуванням методики збудження-зондування експериментально встановлено збільшення часової ширини Δt фс осьової компоненти лазерних імпульсів з довжиною хвилі ~ 1.55 мкм від 450 фс до $680 \div 750$ фс при часових затримках $\sim 1 \div 1.8$ пс під час поширення всередині зразка Si (рис.3а). Однак при більших часових затримках імпульс відновлює свою початкову часову ширину.

Проведені розрахунки зміни часового профілю лазерного імпульсу внаслідок двофотонного поглинання (ДФП) (рис.3б) якісно узгоджуються з експериментальними результатами. Можливою причиною такої поведінки Δt є формування конічних Бесселівських хвиль. Бесселівські хвилі спрямовують в напрямку осі енергетичний потік з оточуючих ділянок низької інтенсивності, які не зазнали нелінійних часових змін [8].

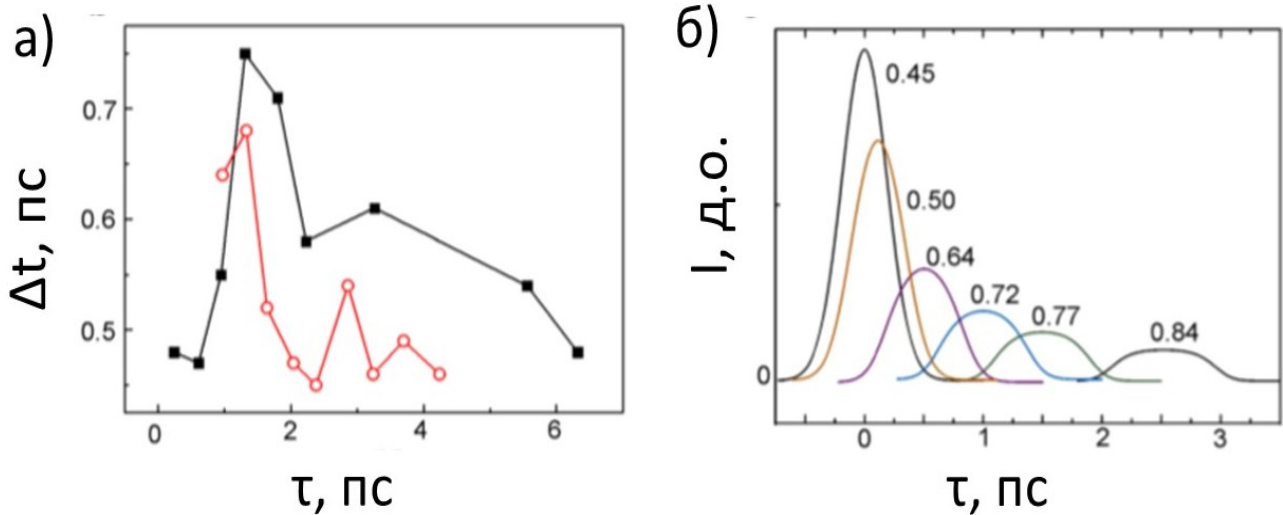


Рис.3. Динаміка тривалості імпульсу в с-Si в схрещених (чорна крива) та паралельних (червона) поляризаторах (а). Трансформація осьових профілів інтенсивності (б).

3) При фокусуванні фс лазерного випромінювання з центральною довжиною хвилі $\lambda=1550$ нм в с-Si, на виході зі зразка спостерігається генерація третьої гармоніки (ТГ) з $\lambda=516$ нм, незважаючи на те, що с-Si повністю непрозорий для зеленого світла (довжина поглинання становить лише 1 мкм) (рис.4а).

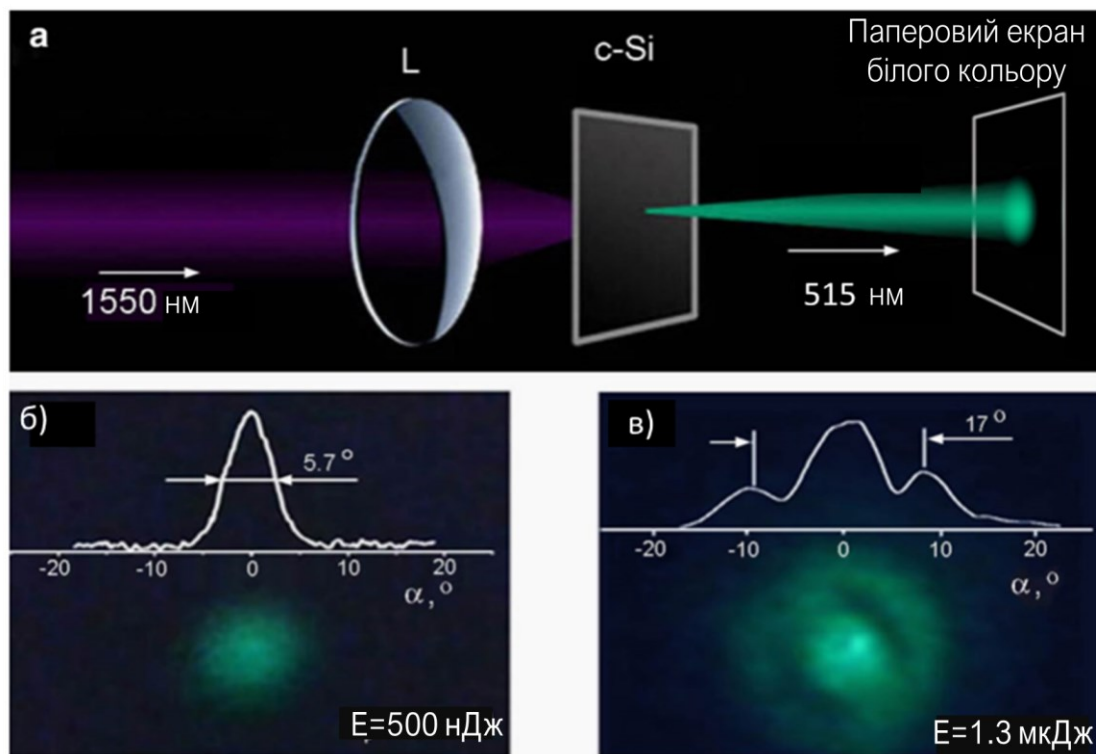


Рис.4. Схема дослідження генерації 3-ї гармоніки (а). Зображення і кутовий профіль ТГ у зразку с-Si товщиною 0.5 мм (б). Зображення і кутовий профіль пучка ТГ у зразку товщиною 8 мм (в).

Встановлено, що для зразка c-Si товщиною 0.5 мм при ширині кутового профілю збуджувального пучка 10° ширина кутового профілю ТГ становить лише 5.7° на рівні половини інтенсивності (рис.4б). Показано, що ширина дифракційно обмеженого кутового профілю пучка ТГ визначається двома конкуруючими факторами. По-перше, вона повинна бути в 3 рази вужчою, ніж у збуджувального променя через меншу довжину хвилі. А по-друге, вона повинна бути в 1.73 рази ширшою із-за меншої перетяжки когерентного джерела ТГ, сформованого нелінійною поляризацією $P^{(3)}(3\omega)$. Комбінована дія цих двох факторів призводить до звуження дифракційно-обмеженого кутового профілю пучка ТГ в 1.73 рази від збуджувального променя, тобто до 5.7° , як і було знайдено експериментально (рис.4б).

Проте для зразка c-Si товщиною 8 мм форма кутового профілю ТГ змінюється, очевидно внаслідок зміни профілю збуджувального пучка під дією ДФП і плазмової рефракції (рис.4в). Генерація ТГ також спостережена й від вхідної поверхні зразка в геометрії на відбивання.

4) Виявлено, що спектр фс лазерних імпульсів з довжиною хвилі ~ 1.55 мкм на виході із зразків c-Si зазнає асиметричного розширення з 25 нм до 100 нм, причому спостерігається переважне розширення в короткохвильову сторону, яке свідчить про внесок лазерно-індукованої плазми у процес фазової самомодуляції. А також симетричне розширення спектрів у As_2S_3 з 25 нм до 300 нм та незначні зміни в спектрі InP (розширення ~ 7 нм).

5) Із застосуванням методики збудження-зондування визначено вплив числової апертури (ЧА) лінзи на параметри плазмового каналу. Виявлено, що при збільшенні ЧА фокусувальної лінзи спостерігається скорочення довжини і поперечного розміру плазмового каналу. Таким способом визначено оптимальні параметри фокусувальної системи для подальших досліджень із формування структур у прозорих матеріалах на довжині хвилі фс лазера 1550 нм.

У розділі IV *''Запис оптичних хвилеводів та об'ємних періодичних структур в оптичних конструкційних матеріалах (c-Si, InP, As_2S_3)''* представлено результати досліджень процесів формування хвилеводів та структур у прозорих оптичних матеріалах, визначено залежність просторових характеристик хвилеводів від параметрів лазерного випромінювання.

Експериментально доведена можливість запису хвилеводів глибоко в об'ємі c-Si. Лазерні імпульси волоконного фс лазера з енергією 2 мкДж, тривалістю 400 фс, частотою повторення 250 кГц і довжиною хвилі 1550 нм фокусуються лінзою з фокусною відстанню $F=8$ мм та числовою апертурою $NA=0.5$, на різній глибині, починаючи від задньої стінки зразка. Модифікація матеріалу відбувається при зміщенні зразка відносно нерухомого пучка лазера у напрямку променя (рис.5а). При використанні лінз із меншими NA модифікація не відбувалась, оскільки сильне ДФП призводило до швидкої дисипації енергії у фокальній області.

Встановлено, що у випадку запису від передньої поверхні зразка до задньої стінки запис неможливий, оскільки лазерний промінь розсіюється вже

модифікованою ділянкою. Таким способом здійснено запис хвильоводів довжиною 0.5-0.8 см.

Для знаходження зміни показника заломлення (Δn) в модифікованій області, розроблено програму, що базується на рівняннях переносу інтенсивності та оберненому перетворенні Абеля. Обчислені профілі зміни Δn для декількох реалізованих хвильоводів наведено на рис.5б. Було визначено, що при різних швидкостях запису, зміна Δn у хвильоводах знаходиться в межах 10^{-4} , а їх діаметри ~ 13 -20 мкм. За межами області ~ 25 мкм властивості c-Si не змінюються.

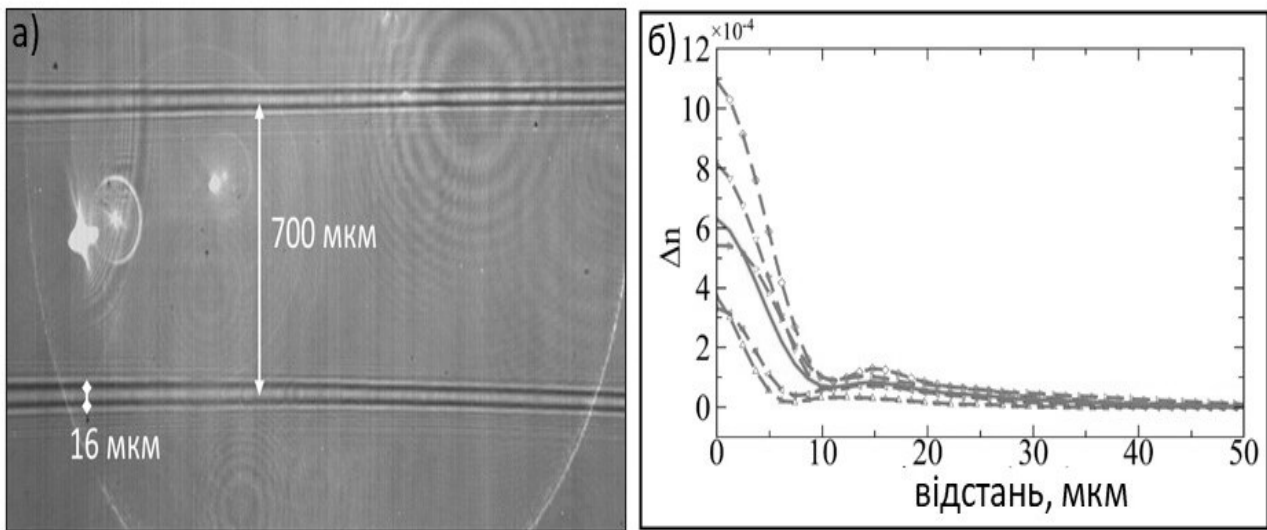


Рис.5. Тіньограми хвильоводів у кремнії (а). Профіль лазерно-індукованої зміни показника заломлення для декількох різних хвильоводів (б).

Тестування створених структур у порівнянні з оптичним волокном показало наявність хвильоводних властивостей і додатної зміни показника заломлення, яка узгоджується з результатами розрахунків.

Крім хвильоводів, продемонстровано можливість формування двовимірних періодичних мікроструктур в об'ємі c-Si при таких самих параметрах лазерного випромінювання, що і в попередньому випадку. Фокусування лазерного променя здійснювалося крізь торцеву грань в об'єм зразка товщиною 0.5 мм лінзою з $NA=0.5$.

Одночасне зміщення зразка вздовж осі X і фокальної плями вздовж осі Z вже під час першого проходу призводить до формування неоднорідної двовимірної періодичної структури, яка стає більш вираженою при наступних проходах внаслідок зміни показника заломлення і зменшення порогу руйнування матеріалу в попередньо експонованій області. Лазерно-індукована зміна показника заломлення є додатною. На рис.6 представлено мікроструктуру зміни показника заломлення з періодом 3 мкм, записану при швидкості 0.01 мм/с для зразка та пучка.

Встановлено, що мінімальна енергія імпульсу, необхідна для створення хвилеводів та структур у c-Si, становить 0.6 мкДж, частота слідування імпульсів 0.25–1 МГц, а оптимальні швидкості сканування $V_{ск}$ знаходяться в діапазоні 0.01–0.07 мм/с.

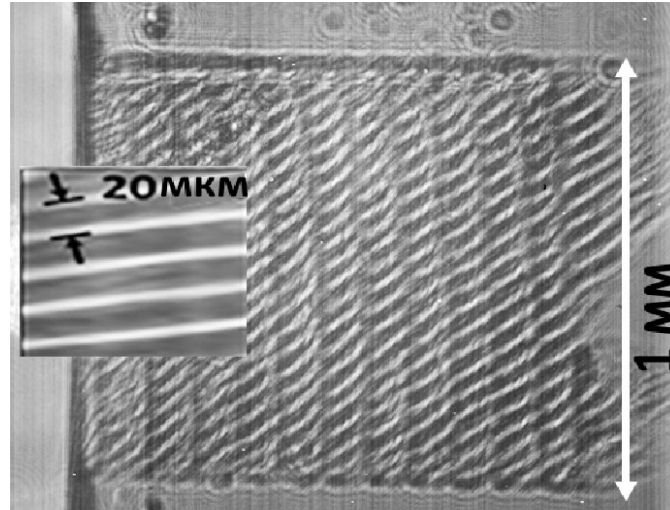


Рис.6. Лазерно-індуковані двовимірні періодичні мікромодифікації в об'ємі кремнію.

У цьому ж розділі викладено результати модифікацій халькогалідного скла $65\text{GeS}_2\text{-}25\text{Ga}_2\text{S}_3\text{-}10\text{CsCl}$, легованого 1% Er, фс лазерними імпульсами з довжиною хвилі 800 нм, енергією імпульсу 1.2 мкДж, $\tau=2$ пс, $\nu=1$ кГц. Тіньограми сформованих структур при дефокусуванні ± 40 , 0 мкм (рис.7а), демонструють, що модифікована область є достатньо неоднорідною, ймовірно внаслідок процесу плавлення-затвердіння.

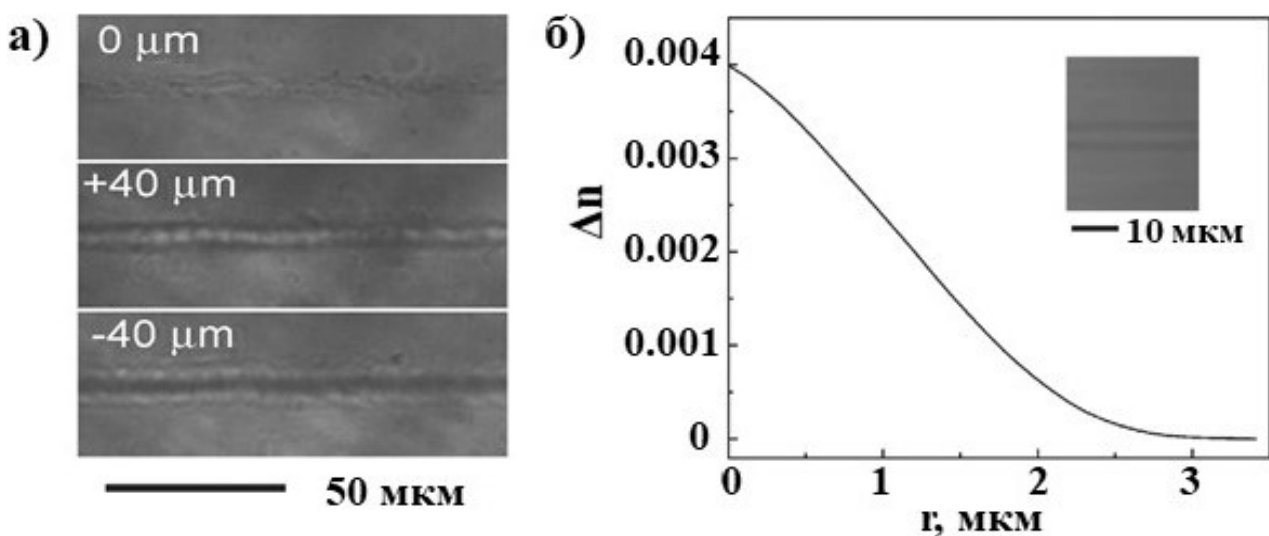


Рис.7. Тіньограми лазерно-індукованих структур (а). Профіль зміни показника заломлення у $65\text{GeS}_2\text{-}25\text{Ga}_2\text{S}_3\text{-}10\text{CsCl}$ склі (б).

На рис.7б показано радіальний профіль лазерно-індукованої зміни показника заломлення, обчислений за допомогою програми, описаної вище, з якого випливає, що $\Delta n > 0$ з максимальним значенням на осі $\Delta n \sim 4 \times 10^{-3}$. Діаметр утвореної структури – близько 6 мкм.

Продemonстровано глибокий запис протяжних структур ($\Delta n < 0$) в As_2S_3 та стійких модифікацій в InP на глибині 100–150 мкм від поверхні під дією лазерних фемтосекундних імпульсів на довжині хвилі 1.55 мкм. Виходячи з того, що в InP коефіцієнт двофотонного поглинання на порядок більший ніж у кремнії, ми вважаємо, що ДФП значно зменшує інтенсивність фокальної плями в глибині матеріалу. Внаслідок цього можливе формування тільки стійких приповерхневих структур.

ВИСНОВКИ

Відповідно до поставленої мети, в представленій дисертаційній роботі:

- Розроблено і виготовлено нове фемтосекундне волоконне лазерне джерело з довжиною хвилі випромінювання 1.55 мкм. Порівняння з існуючими системами такого типу свідчить, що досягнуто кращих експлуатаційних характеристик (максимальна енергія в імпульсі 2 μJ при частоті повторення 250 кГц та тривалості імпульсу 410 фс). Створену лазерну систему застосовано для дослідження закономірностей розповсюдження фс імпульсів у прозорих середовищах та запису хвилеводів та мікроструктур в об'ємі прозорих матеріалів.
- Методами часороздільної мікроскопії вперше зареєстровано динаміку фс-імпульсу у c-Si на довжині хвилі 1550 нм. Досліджено еволюцію (розширення) часової ширини Δt лазерних імпульсів під час поширення в об'ємі зразка c-Si , виміряно осьові профілі інтенсивності при різних часових затримках.
- Виявлено, що у кремнії та As_2S_3 локалізація лазерного випромінювання із центральною довжиною хвилі 1550 нм супроводжується генерацією третьої гармоніки на довжині хвилі 514-519 нм.
- Запропоновано та досліджено механізм формування кутового розподілу випромінювання третьої гармоніки у кремнії.
- Вперше здійснено запис мікрохвилеводів в об'ємі кристалічного кремнію випромінюванням фс лазера на довжині хвилі 1550 нм.
- Визначено геометричні розміри створених хвилеводів та структур у кремнії, As_2S_3 для довжини хвилі лазера 1550 нм та у $65\text{GeS}_2\text{-}25\text{Ga}_2\text{S}_3\text{-}10\text{CsCl}$ – для довжини хвилі 800 нм. Встановлено, що для кремнію та $65\text{GeS}_2\text{-}25\text{Ga}_2\text{S}_3\text{-}10\text{CsCl}$ зміна показника заломлення $\Delta n > 0$, а для As_2S_3 – $\Delta n < 0$.
- Встановлено критичний вплив числової апертури NA фокусувальної лінзи на запис структур у c-Si ($\text{NA} \geq 0.5$). При менших NA ДФП зменшує інтенсивність світла у фокальній плямі нижче порогу модифікації матеріалу.
- Продemonстровано, що в InP при максимальній енергії імпульсу 2 мкДж стійка модифікація можлива тільки на глибині 100-150 мкм від

поверхні, а в об'ємі матеріалу можливі лише невеликі локальні зміни. Основним обмежуючим фактором при цьому є сильне двофотонне поглинання.

- Розроблено обчислювальну програму, в якій на основі рівнянь переносу інтенсивності та оберненого перетворення Абеля обчислюються профілі зміни показника заломлення у плазмових каналах та хвилеводах, виходячи з тіннограм, отриманих методом мікроскопії дефокусування.

Наукові та методологічні результати роботи будуть корисними як для фундаментальної науки про взаємодію потужних фемтосекундних лазерних імпульсів з напівпровідниковими матеріалами, так і для практичних застосувань в задачах лазерної прецизійної мікрообробки матеріалів та створення масивів елементів мікрооптики.

СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. В.Г. Беспрозванных, Нелинейная оптика: учебное пособие/ В.Г. Беспрозванных, В.П. Первадчук. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. – 228 с.
2. G. Sobon, P. Kaczmarek, A. Gluszek, J. Sotor, K. Abramski, μJ -level, kHz-repetition rate femtosecond fiber-CPA system at 1555 nm, *Opt. Commun.* 347, 8-12, 2015.
3. R. Kashyap, Self-propelled self-focusing damage in optical fibres, *Proc. the 10th Int. Conf. Lasers and Applications*, Lake Tahoe, Nevada, USA, Dec. 7-11, 1987, pp. 859–866.
4. R. Gattass, E. Mazur, Femtosecond laser micromachining in transparent materials, *Nature Photon.* 2, 219-225, 2008.
5. P. Verburg, G. Römer, and A. Huis in't Veld, Two-photon-induced internal modification of silicon by erbium-doped fiber laser, *Opt. Express* 22, 21958-21971, 2014.
6. D. Grojo, A. Mouskeftaras, P. Delaporte, and S. Lei, Limitations to laser machining of silicon using femtosecond micro-Bessel beams in the infrared, *J. Appl. Phys.* 117, 153105, 2015.
7. V. Kononenko, V. Konov, and E. Dianov, Delocalization of femtosecond radiation in silicon, *Opt. Lett.* 37, 3369-3371, 2012.
8. D. Faccio, M. Clerici, A. Averchi, O. Jedrkiewicz, S. Tzortzakis, D. G. Papazoglou, F. Bragheri, L. Tartara, A. Trita, S. Henin, I. Cristiani, A. Couairon, and P. Di Trapani, Kerr-induced spontaneous Bessel beam formation in the regime of strong two-photon absorption, *Opt. Express* 16, 8213-8218, 2008.

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ:

1. I. Blonskyi, V. Kadan, **S. Pavlova**, I. Pavlov, O. Shpotyuk, O. Khasanov, Ultrashort light pulses in transparent solids: propagation peculiarities and practical applications, **Ukr. J. Phys.** 64(6), 457-463, 2019.
2. I. Blonskyi, V. Kadan, O. Shpotyuk, L. Calvez, I. Pavlov, **S. Pavlova**, A. Dmytruk, A. Rybak, P. Korenyuk, Upconversion fluorescence assisted visualization of femtosecond laser filaments in Er-doped chalcogenide $65\text{GeS}_2\text{-}25\text{Ga}_2\text{S}_3\text{-}10\text{CsCl}$ glass, **Optics and Laser Technology** 119, 105621, 2019.
3. **S. Pavlova**, H. Rezaei, I. Pavlov, H. Kalaycıoğlu, F.Ö. Ilday, Generation of 2- μJ 410-fs pulses from a single-mode chirped-pulse fiber laser operating at 1550 nm, **Appl. Phys. B** 124(10), 201, 2018.
4. V. Kadan, **S. Pavlova**, I. Pavlov, H. Rezaei, F. Ö. Ilday, I. Blonskyi, Spatio-temporal dynamics of femtosecond laser pulses at 1550 nm wavelength in crystal silicon, **Appl. Phys. A** 124(8), 560, 2018.
5. I. Pavlov, O. Tokel, **S. Pavlova**, V. Kadan, G. Makey, A. Turnali, Ö. Yavuz, and F. Ö. Ilday, Femtosecond laser written waveguides deep inside silicon, **Opt. Lett.** 42, 3028-3031, 2017.
6. I. Blonskyi, V. Kadan, A. Rybak, **S. Pavlova**, L. Calvez, B. Mytsyk, O. Shpotyuk, Optical Phenomena and Processes Induced by Ultrashort Light Pulses in Chalcogenide and Chalcogenide Glassy Semiconductors, **J. Nano-Electron. Phys.** 9(5), 05033, 2017.

Тези конференцій здобувача:

1. **S. Pavlova**, E. Yagci, K. Eken, E. Tunckol, and I. Pavlov, μs pulsed, low repetition rate, 30 W fiber laser at 1550 nm, Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference, Munich, Germany, 2019, paper cj_p_54.
2. **S. Pavlova**, E. Yagci, K. Eken, E. Tunckol, and I. Pavlov, High power microsecond pulsed Er-Yb doped fiber laser source, Fotonik 2019, Istanbul, Turkey, 2019, p.25.
3. I. Blonskyi, V. Kadan, I. Pavlov, **S. Pavlova**, A. Rybak, O. Shpotyuk, Femtosecond laser fabrication of microoptical elements for optoelectronic sensors, 8th International Scientific and Technical Conference "Sensor Electronics and Microsystem Technologies", Odesa, Ukraine, 2018, pp.10-11.
4. I. Blonskyi, V. Kadan, **S. Pavlova**, I. Pavlov, A. Rybak, L. Calvez, O. Shpotyuk, Spatio-temporal transformation of infra-red femtosecond laser pulses in crystal silicon, X international conference on topical problems of semiconductor physics, Truskavets, Ukraine, 2018, p.54-56.

5. I. Pavlov, O. Tokel, **S. Pavlova**, V. Kadan, G. Makey, A. Turnali, T. Colakoglu, O. Yavuz, F. O. Ilday, Optical waveguides written deep inside silicon by femtosecond laser, 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference, Munich, Germany, 2017, pp.1-1.
6. I. Pavlov, O. Tokel, **S. Pavlova**, V. Kadan, G. Makey, A. Turnali, F. Ö. Ilday. Optical waveguides written in silicon with femtosecond laser, APS March Meeting, New Orleans, USA, 2017, abstract id. G1.058.
7. Blonskyi I., Kadan V., Rybak A., **Pavlova S.**, Calvez L., Mytsyk B., Shpotyk O., Optical Phenomena and Processes Induced by Ultrashort Light Pulses in Chalcogenide and Chalcogenide Glassy Semiconductors, Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems (ICPTTFN-XVI), Ivano-Frankivsk, Ukraine, 2017, p.5.
8. I. Blonskyi, V. Kadan, **S. Pavlova**, F. Ö. Ilday, I. Pavlov, L. Calvez, O. Shpotyk, O. Khasanov, Reversible and irreversible processes induced by femtosecond light pulses in crystal silicon and chalcogenide glasses, Laser technologies. Lasers and their application, Truskavets, Ukraine, 2017, p.66-68.

АНОТАЦІЯ

Павлова С. В. Дослідження філаментатії та супутніх нелінійно-оптичних явищ у напівпровідникових матеріалах телекомунікаційного діапазону довжин хвиль – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.05 – оптика, лазерна фізика. – Інститут фізики НАН України. Київ, 2020.

Дисертаційна робота присвячена вивченню оптичних нелінійних процесів та особливостей взаємодії фемтосекундного випромінювання з довжиною хвилі 1.55 мкм у напівпровідникових матеріалах (с-Si, InP, As₂S₃) та з довжиною хвилі 800 нм у 65GeS₂-25Ga₂S₃-10CsCl склі. У процесі виконання дисертаційної роботи було розроблено та створено потужний волоконний лазер, що працює на довжині хвилі 1.55 мкм. Отримано максимальне, для даного типу волоконних лазерів, значення енергії імпульсу (2 мкДж) при тривалості імпульсу 410 фс. Із використанням лазера проведено дослідження нелінійних нестационарних оптичних явищ та задач мікрообробки матеріалів.

Виявлено особливості спектрів випромінювання при взаємодії лазерних імпульсів з центральною довжиною хвилі 1550 нм з матеріалами (с-Si, As₂S₃, InP) та зафіксовано: асиметричне розширення спектра вихідного імпульсу з 25 нм до 100 нм зі зміщенням у короткохвильову область у с-Si, симетричне розширення спектру у халькогенідному склі з 25 нм до 300 нм та незначні зміни в спектрі InP (розширення ~7 нм), генерацію третьої гармоніки у кремнії та As₂S₃.

Досліджено залежність кутового розподілу випромінювання з довжиною хвилі 1.55 мкм та його третьої гармоніки у c-Si. Застосовуючи методи часороздільної мікроскопії, вивчено просторово-часову динаміку фс-імпульсу в c-Si при $\lambda=1550$ нм. Зокрема зареєстровано збільшення тривалості фс лазерних імпульсів та запропоновані фізичні механізми їх формування, а саме: процесами двофотонного поглинання, керрівським самофокусуванням, рефракцією та поглинанням твердотільною плазмою. Всі ці процеси є причиною складного перетворення імпульсу.

Зареєстровано просторову трансформацію фс випромінювання з довжиною хвилі 1.55 мкм у c-Si та явище філаментатії і мультифіламентатії в As_2S_3 .

Продемонстровано модифікації у кремнії, формування хвилеводних структур у стеклах As_2S_3 та $65\text{GeS}_2\text{-}25\text{Ga}_2\text{S}_3\text{-}10\text{CsCl}$, приповерхневі модифікації в InP. Виявлено, що основним обмежуючим фактором, що ускладнює процеси модифікації у c-Si та InP, є високий коефіцієнт двофотонного поглинання.

Ключові слова: філаментатія, фемтосекундні імпульси, волоконні лазери, часороздільна мікроскопія, хвилеводи.

АННОТАЦІЯ

Павлова С. В., **Исследование филаментации и сопутствующих нелинейно-оптических явлений в полупроводниковых материалах телекоммуникационного диапазона длин волн, – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – оптика, лазерная физика. – Институт физики НАН Украины, Киев, 2020.

Диссертационная работа посвящена изучению оптических нелинейных процессов и особенностей взаимодействия фемтосекундного излучения на длине волны 1.55 мкм с полупроводниковыми материалами (c-Si, InP, As_2S_3) и на длине волны 800 нм с $65\text{GeS}_2\text{-}25\text{Ga}_2\text{S}_3\text{-}10\text{CsCl}$. В диссертации подробно описана разработка нового фемтосекундного волоконного лазера, работающего на длине волны 1.55 мкм, и его использование для изучения нелинейных нестационарных оптических процессов и задач микрообработки материалов.

Выявлены особенности спектров излучения при взаимодействии лазерного излучения с центральной длиной волны 1550 нм с исследованными материалами c-Si, As_2S_3 , InP и зафиксировано: асимметричное расширение спектра выходящего импульса с 25 нм до 100 нм со смещением в коротковолновую область в c-Si, симметричное расширение спектра в As_2S_3 с 25 нм до 300 нм и незначительные изменения в спектре InP, генерация третьей гармоники в кремнии и As_2S_3 .

Исследована зависимость углового распределения излучения на длине волны 1.55 мкм и его третьей гармоники в c-Si. С использованием методов времязрешающей микроскопии изучена пространственно-временная динамика фемтосекундного импульса в c-Si при $\lambda=1550$ нм, зарегистрировано

увеличение длительности фс лазерных импульсов и предложен физический механизм этого явления, обусловленный вкладами двухфотонного поглощения, керровской самофокусировки, рефракции и поглощения плазмы, которые и приводят к сложному преобразованию импульса.

Зарегистрирована пространственная трансформация фс излучения с длиной волны 1.55 мкм в c-Si и явление филаментации и мультифиламентации в As₂S₃.

Продemonстрировано модификации в кремнии, формирование волноводных структур в стеклах As₂S₃ и 65GeS₂-25Ga₂S₃-10CsCl, приповерхностные модификации в InP. Выявлено, что основным ограничивающим фактором, затрудняющим процессы модификации в c-Si и InP, является высокий коэффициент двофотонного поглощения.

Ключевые слова: филаментация, фемтосекундные импульсы, волоконные лазеры, временно разрешающая микроскопия.

SUMMARY

Pavlova S.V., Investigation of filamentation and nonlinear optical phenomena in semiconductor materials of the telecommunication wavelength range – Manuscript.

Thesis for the degree of candidate of physical and mathematical sciences, specialty 01.04.05 – Optics, Laser Physics. – Institute of Physics NAS of Ukraine. – Kyiv, 2020.

The dissertation is devoted to the study of physical phenomena and processes induced by femtosecond laser pulses with the central wavelength of 1550 nm in semiconductor materials (c-Si, InP, As₂S₃) and in chalcogenide glass 65GeS₂-25Ga₂S₃-10CsCl at a wavelength of 800 nm. For this research, an Er-Yb-doped fiber laser with a wavelength of 1.55 μm was developed. The femtosecond laser source delivers a maximal value of the pulse energy of 2 μJ at a pulse duration of 410 fs and repetition rate of 250 kHz.

Using a time-resolved pump-probe technique, non-destructively interact radiation with the crystals at wavelength 1550 nm was shown. The spectral changes of pulses during the interaction with c-Si, As₂S₃, InP were observed for the first time. Those are an asymmetric expansion of the spectrum of the output pulse from 25 nm to 100 nm with a shift to the short-wavelength region in c-Si, symmetrical expansion spectrum in As₂S₃ from 25 nm to 300 nm, and slight changes in the spectrum of InP, and also third-harmonic generation in c-Si and As₂S₃.

Non-linear spatial-temporal transformation of the fs pulse, which results in the transformation of the angular profile of the beam from Gaussian to Bessel in c-Si and multifilamentation in As₂S₃ and generation of green third harmonic, was observed. The dependence of the angular distribution of radiation at a wavelength of 1.55 μm and its third harmonic in c-Si was investigated. Also, an increase in the duration of fs of laser pulses has been registered in c-Si. The physical mechanisms of their

formation have been proposed, namely: two-photon absorption processes, Kerr self-focusing, refraction, and solid-state plasma absorption. All these processes are the cause of complex pulse conversion.

The advent of ultrafast infrared lasers provides a unique opportunity for the direct fabrication of three-dimensional microdevices. However, strong nonlinearities prevent access to modification regimes in narrow gap materials with the shortest laser pulses. In our study, by a judicious choice of the writing parameters, including laser pulse energy, repetition rate, and inscription speed, the optical structures inside c-Si by the femtosecond laser at a wavelength of 1.55 μm were recorded. In the study, it was found that there exists a threshold of the pulse energy to produce a high-quality groove, which is 0.65–2 μJ . It was shown that optimal writing velocity is in the range 0.01–0.07 mm/s at a repetition rate of 0.25–1 MHz.

Using femtosecond pulses at wavelength 1.55 μm , the structures in As_2S_3 , near-surface modifications in InP have been demonstrated. Focused laser pulses have induced the refractive index modification inside the 65GeS₂-25Ga₂S₃-10CsCl glass at 800 nm wavelength. It was revealed that the main contributions that prevent modification with the shortest pulses are beam depletion by multiphoton absorption, Kerr-induced phase distortions, and defocusing of strong plasma in c-Si and InP.

Keywords: filamentation, femtosecond pulses, fiber lasers, time-resolved microscopy, waveguides.