НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ ІНСТИТУТ ФІЗИКИ

РИБАК АНДРІЙ СТАНІСЛАВОВИЧ

Pyp

УДК: 535: 535.2: 535.3: 535.5: 539: 544.25: 621.373.826

ЕФЕКТИ СТРУКТУРУВАННЯ НАНО- ТА МІКРОМЕТРОВОГО МАСШТАБУ В ТВЕРДОТІЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩАХ ПІД ДІЄЮ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

01.04.05 — оптика, лазерна фізика

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук 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:	доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник Федоренко Леонід Леонідович , Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є.Лашкарьова НАН України, провідний науковий співробітник відділу фізико-технічних основ оптоелектроніки
	кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник Лимаренко Руслан Анатолійович , міжнародний центр «Інститут прикладної оптики» НАН України, учений секретар

Захист дисертації відбудеться «__» ____ 2018 року о __год. __хв. 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 «__» ____ 2018 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради Д26.159.01

Olym

О.О. Чумак

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У практиці наукових досліджень та розвитку прецизійних методів мікрообробки матеріалів, перспективних для оптоелектронних та телекомунікаційних технологій, дедалі ширше використання в останні роки знаходять лазерні джерела з фемтосекундною тривалістю імпульсів. Пов'язано це з особливими властивостями такого випромінювання, до яких відносять: надкоротку тривалість відповідних лазерних імпульсів τ_i , сумірну з часом зміщення атомів з рівноважних положень у процесі фазових перетворень; надвисоку напруженість електричного поля, близьку до внутрішньоатомної напруженості; особливий просторово-часовий зв'язок електромагнітного поля. Неруйнівна та руйнівна дія таких світлових імпульсів на прозорі і поглинаючі світло твердотільні об'єкти приводить до прояву ще недостатньо вивчених нелінійних нестаціонарних оптичних явищ та особливостей лазерного руйнування матеріалів мішені. Серед нових нелінійних нестаціонарних оптичних явищ насамперед відзначають генерацію фемтосекундного континууму (квазібілого спектра випромінювання, який охоплює видимий і середній ІЧ діапазони), утворення лазерних фемтосекундних філаментів, світлових конічних хвиль тощо.

При дослідженні руйнівної дії фемтосекундних імпульсів на матеріали мішеней все більше уваги приділяється встановленню природи і пошуку нових ніш практичного використання лазерно-індукованих поверхневих періодичних структур (з періодом, меншим від довжини хвилі лазерного випромінювання), дослідженню кінетики лазерного руйнування матеріалів мішеней різної природи в широкому часовому інтервалі (від кількох десятків фемтосекунд до кількох десятків наносекунд), розвитку прецизійних економічно привабливих технологій лазерної мікрообробки матеріалів, включаючи створення масивів елементів мікрооптики.

Одним із найбільш яскравих проявів динамічної структуризації електромагнітного поля ультракороткого світлового імпульсу при поширенні в прозорих середовищах є явище фемтосекундної філаментації – розбиття суцільного променя на окремі «шнури» плазмово-польової природи. Крім досягнень у вивченні природи цього явища існують і відкриті питання, зокрема щодо впливу анізотропії середовища на механізми утворення білого суперконтинууму і конічної емісії.

руслі таких досліджень знаходиться і дана дисертаційна робота. У Встановлені в ній закономірності утворення стаціонарних періодичних структур на поверхні металів під дією фемтосекундних лазерних імпульсів, їх нові застосування для орієнтації рідких кристалів, закономірності прояву ефектів динамічного структурування поля фемтосекундних світлових імпульсів у середовищах з характеризація променезаломленням, подвійним виготовлення i елементів мікрооптики в халькогалогенідних стеклах методом одноімпульсної лазерної абляції, а також вивчення фізичних механізмів, що лежать в основі таких процесів, створення нових експериментальних методик для їх дослідження є оригінальними і важливими як для сучасного напрямку фундаментальної науки – фемтооптики конденсованого стану, так і для подальшого розвитку лазерних технологій.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Робота виконувалась у відділі фотонних процесів Інституту фізики НАН України. Дослідження, що становлять зміст дисертації, виконувались у рамках бюджетних тем: 1.4.В/167, «Нестаціонарні розмірно залежні оптичні процеси в наноструктурованих матеріалах» (номер державної реєстрації: 0113U001667); 1.4.В/190, «Дослідження оптичних явищ та процесів, індукованих ультракороткими світловими імпульсами в матеріалах, перспективних для оптоелектронних та телекомунікаційних використань» (номер державної реєстрації: 0118U003382), а також міжнародних наукових проектів «Лазерні фемтосекундні філаменти в ізотропних та анізотропних середовищах: фундаментальні та прикладні аспекти» (номери державної реєстрації: 0116U008790, 0117U001862).

Мета дисертаційної роботи полягає у з'ясуванні фізичних механізмів формування періодичних структур на поверхнях склоподібних халькогенідних напівпровідників та металів під дією фемтосекундних лазерних імпульсів, можливостей їх використання для орієнтації нематичних рідких кристалів, а також у вивченні нестаціонарних нелінійних оптичних явищ, пов'язаних з утворенням лазерних фемтосекундних філаментів в об'ємі твердотільних прозорих середовищ.

Досягнення поставленої мети передбачало виконання таких основних наукових завдань:

1) розробки фемтосекундного лазера з заданими характеристиками (довжина хвилі 1 мкм, енергія імпульсу ~1 мкДж, тривалість імпульсу ~100 фс) для задач лазерно індукованого формування структур бажаної геометрії на поверхні металів та напівпровідників;

2) вивчення фізичних механізмів та розвиток технологій створення періодичних поверхневих структур (масивів мікролінз та мікродзеркал у халькогенідному склі, поверхневих ґраток у металах) під дією фемтосекундних лазерних імпульсів та їх характеризація методами оптичної, атомно-силової та електронної мікроскопії;

3) дослідження особливостей фотохімічних перетворень на поверхні титану внаслідок опромінення фемтосекундними лазерними імпульсами та початкових стадій утворення на ній наноструктур;

4) з'ясування можливості керування орієнтацією нематичних рідких кристалів на поверхні титану за допомогою поверхневих періодичних структур, індукованих фемтосекундними лазерними імпульсами, та вивчення факторів, що впливають на азимутальну енергію зчеплення (AE3) поверхні наноструктурованої плівки титану;

5) дослідження поляризаційних особливостей білого суперконтинууму (СК) та конічної емісії (КЕ) філаментів у середовищах з додатним і від'ємним двопроменезаломленням (кварц, сапфір).

Об'єктами дослідження були лазерно-індуковані періодичні поверхневі структури в металах (Ті, Сu, Ni, Mo), фемтосекундна лазерна абляція оптичних матеріалів телекомунікаційного діапазону довжин хвиль (халькогенідні та халькогалідні напівпровідникові стекла, кристалічний кремній), лазерні фемтосекундні філаменти в твердотільних керрівських середовищах з подвійним променезаломленням (кристалічний кварц, сапфір). **Предметом дослідження** були: широкодіапазонна кінетика лазерної абляції та нестаціонарні нелінійні оптичні явища в оптичних конструкційних матеріалах (філаментація, генерація фемтосекундного суперконтинууму, оптичних конічних хвиль), явища періодичного наноструктурування на поверхні металів.

Використовувалися такі методи досліджень: фемтосекундна часороздільна мікроскопія, растрова електронна та оптична мікроскопія, оптична спектроскопія видимого та інфрачервоного діапазонів, математичне моделювання.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що в ній вперше:

1. Запропоновано новий метод орієнтації нематичних рідких кристалів на металевих поверхнях (Ті) з лазерно-індукованими періодичними структурами.

2. Продемонстровано можливість збільшення азимутальної енергії зчеплення поверхні наноструктурованого металу з рідким кристалом шляхом нанесення на поверхню полімерної плівки.

3. У широкому часовому інтервалі (100 фс — 10 нс) досліджено кінетику лазерної абляції мішеней із халькогалогенідних склоподібних напівпровідників 65GeS₂·25Ga₂S₃·10CsCl з фіксацією стадій утворення і остигання плазми, плавлення, викиду продуктів абляції, генерації надзвукових вибухових хвиль, тверднення.

4. Експериментально виявлено поляризаційні особливості фемтосекундного суперконтинууму і конічної емісії генерованої фемтосекундним лазерними імпульсами в кристалах з додатним (кварц) і від'ємним (сапфір) двопроменезаломленням та встановлено їх природу. Запропоновано фізичний механізм генерації конічної емісії, який пояснює особливості її поляризації.

5. Показано, що поляризація конічної емісії визначається поляризацією заднього фронту імпульсу, який поширюється в двозаломлюючому середовищі, а поляризація його переднього фронту визначає поляризацію фемтосекундного суперконтинууму, яка є ортогональною до напрямку поляризації конічної емісії.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Створено оптоволоконний фемтосекундний лазер з довжиною хвилі 1 мкм, енергією імпульсу 1 мкДж і тривалістю ~100 фс, перспективний для прецизійної мікрообробки оптичних конструкційних матеріалів.

Розроблено і реалізовано одноімпульсний лазерний метод створення 2. масивів дифракційно обмежених плоско-увігнутих мікролінз та мікродзеркал у 65GeS₂·25Ga₂S₃·10CsCl, халькогалогенідному прозорому склі в ліапазоні 0,5—11 мкм під дією фемтосекундних лазерних імпульсів з тривалістю 200 фс та центральною довжиною хвилі випромінювання 800 нм. Такі масиви мікролінз та мікродзеркал перспективні оптоелектронних телекомунікаційних для та використань.

3. Запропонований метод керування орієнтацією нематичних рідких кристалів на поверхні металів можна використати у виробництві рідкокристалічних дисплеїв.

4. Отримані результати щодо особливостей проявів нелінійних нестаціонарних оптичних явищ у твердих тілах різної структурної організації (стекла, кристали з додатним і від'ємним двопроменезаломленням) доцільно використовувати в сучасних курсах з нелінійної оптики твердого тіла.

Особистий внесок здобувача

Представлені в дисертації та в наукових працях результати одержано за безпосередньої участі здобувача на всіх етапах роботи. Відповідно до поставлених завдань, дисертант безпосередньо отримав зразки з наноструктурами та брав участь у їх дослідженнях, проведених у роботі [1*]. Експериментальні результати роботи [2*] виконано дисертантом спільно з іншими співавторами. Експериментальну частину та аналіз результатів, представлених у роботах [3*-5*], виконано здобувачем разом з науковим керівником д.ф.-м.н. В.М. Каданом. Зразки для досліджень, описаних у роботах [3*-5*], отримано від партнерів по співробітництву з інших організацій, якими також проведено частину досліджень з їх характеризації. Експериментальні дослідження та аналіз результатів робіт [6*,7*] виконано здобувачем разом з к.ф.-м.н. І.А. Гвоздовським. Спільно з науковим керівником та іншими співавторами дисертант брав участь у написанні всіх наукових статей та підготовці їх до публікації. Отримані результати доповідалися на міжнародних наукових конференціях, у тому числі особисто здобувачем [8*], а також у формі стендових доповідей, у підготовці яких здобувач брав активну участь.

Достовірність результатів забезпечено використанням новітніх експериментальних методик, сучасного обладнання та ліцензійного програмного забезпечення для обробки результатів. Усі основні результати, отримані в дисертації, пройшли обговорення на семінарах та міжнародних конференціях і дістали позитивний відгук.

Апробація результатів дисертації

Результати досліджень за темою дисертації було представлено на 8 наукових конференціях:

- 2 Міжнародна наукова конференція "Наноструктурні матеріали–2010" (НАНО–2010) (Київ, Україна, 2010)
- Свропейська конференція з лазерів та електрооптики та міжнародна конференція з квантової електроніки (CLEO EUROPE/IQEC) (Мюнхен, Німеччина, 2013)
- 7 Міжнародна науково-технічна конференція "Сенсорна електроніка та мікросистемні технології" (СЕМСТ-7) (Одеса, Україна, 2016)
- 9 Міжнародна конференція з актуальних проблем фізики напівпровідників (Трускавець, Україна, 2016)
- 7 Українська наукова конференція з фізики напівпровідників УНКФН-7 (Дніпро, Україна, 2016)
- конференція "Електронні процеси в органічних та неорганічних матеріалах", (ICEPOM-11) (Івано-Франківськ, Україна, 2018)
- 8 Міжнародна науково-технічна конференція "Сенсорна електроніка та мікросистемні технології" (СЕМСТ-8) (Одеса, Україна, 2018)

 10 Міжнародна конференція з актуальних проблем фізики напівпровідників (Трускавець, Україна, 2018)

Результати досліджень також доповідалися на підсумкових наукових конференціях Інституту фізики НАН України.

Публікації. Основні результати роботи представлено та детально описано в 15 наукових публікаціях, з яких 7 – у фахових наукових журналах, 8 – у матеріалах та тезах наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, п'ятьох розділів та заключної частини.

У роботі 157 сторінок машинописного тексту, з них 117 сторінок основного тексту, 56 рисунків, 1 таблиця, 43 формули та список літератури з 285 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи та її зв'язок з науковими програмами і темами досліджень, які виконувались у відділі фотонних процесів Інституту фізики НАН України, сформульовано мету і завдання досліджень, визначено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, наведено дані щодо апробації роботи, публікації та особистий внесок дисертанта, структуру та обсяг дисертації.

Перший розділ присвячено огляду літературних джерел з метою визначення актуальності проблеми та виокремлення напрямків, що потребують подальшого детального вивчення. Спочатку проаналізовано процеси, що супроводжують розповсюдження ультракоротких надпотужних світлових імпульсів у середовищі, властивості динамічних структур світлового поля (філаментів), практичні застосування філаментації. У другій його частині описані ефекти необоротного структурування поверхонь металів та напівпровідників під дією фемтосекундних лазерних імпульсів. До таких ефектів відносять, зокрема, стаціонарні періодичні структури на поверхні металів та абляцію матеріалів.

У другому розділі описано методики, з використанням яких проводились дослідження. Крім огляду волоконних лазерних систем, властивостей оптичних волокон та особливостей їх застосування повідомляється про оригінальну розробку фемтосекундного лазера з довжиною хвилі 1 мкм на оптичному волокні, легованому іонами ітербію (його принципову схему наведено на Рис. 1).

Відомі такі методи підсилення лазерних імпульсів в оптоволоконних підсилювачах: підсилення розтягнутого лазерного імпульсу (chirped-pulse amplification); компенсація третього порядку дисперсії (third order dispersion compensation); самоподібне підсилення (self-similar amplification); метод балансу між звуженням підсилення лазерної системи та фазової самомодуляції лазерного імпульсу. В роботі використовувалась остання з вищезгаданих методик.

У створеному нами комплексі для досліджень осцилятор містить волоконну частину та компоненти, які не інтегровані у волокно. До таких компонент належать компресор для компенсації дисперсії показника заломлення волокна і



Рис. 1. Фемтосекундний лазер на активному волокні, легованому іонами ітербію. Енергія і тривалість імпульсу на виході дорівнювали 1 мкДж та 110 фс відповідно. 1, 28, 33 –діод накачки; 2, 29, 34, 42 – запобіжник для діода; 3, 30, 35 – мультиплексор 980/1030; 4, 23, 36, 38 – волокно, леговане ітербієм; 5, 12, 21 – коліматор; 6, 10, 19, 20 – дзеркало; 7 – чвертьхвильова пластинка; 8 – півхвильова пластинка; 9 – поляризаційний світлоподільник; 11 – світлоподільник 50/50; 13, 22, 31 – розгалужувач; 14, 37 – ізолятор; 15 – контролер поляризації; 16, 17 – дифракційні гратки; 18 – діафрагма; 24 – акустооптичний модулятор; 25 – фотодетектор; 26 – програмована користувачем вентильна матриця; 27 – драйвер акустооптичного модулятора; 32 – часовий розширювач імпульсів (stretcher); 39, 41 – лінза; 40 – дихроїчне дзеркало; 43 – діод помпування високої потужності.

системи контролю нелінійної зміни поляризації. Розповсюдження променя у вільному просторі позначене на малюнку точковою лінією. Компресор складається з двох дифракційних ґраток та дзеркала 19. Діафрагма 18 всередині компресора виконує роль спектрального фільтра для пошуку компромісу між стабільністю синхронізації мод у резонаторі та шириною спектра. Для контролю нелінійної еволюції поляризації використовувались хвильові пластинки 7, 8, світлоподільники 9, 11 та контроллер поляризації 15. Осцилятор генерував імпульси з частотою слідування 40 МГц. Активним середовищем було волокно Yb1200-4/125 з довжиною 30 см. Вихідний сигнал осцилятора подавався на вхідний коліматор 21 першого попереднього підсилювача. Другий вихід подавався на фотодетектор 25. Товстішою лінією позначений вузол системи відбору імпульсів, яка керує модулятором (AOM). першого після акустооптичним AOM попереднього підсилювача пропускає лише кожен сороковий оптичний імпульс. Отже, на виході першого попереднього підсилювача частота слідування імпульсів становить 1 МГц.

підсилювачів зберігають Оптичні волокна попередніх поляризацію випромінювання. В обох попередніх підсилювачах активним середовищем було волокно PM-YSF-HI з довжинами 100 см та 65 см. Після першого попереднього підсилювача імпульс проходить через часовий розширювач імпульсів створений на основі оптичного волокна Corning-PM980 з довжиною 12,2 м. Остання ланка системи – підсилювач потужності. Він виконаний у конфігурації "зустрічної накачки". У ролі активного середовища було волокно Yb1200-20/125DC-PM з довжиною 50 см. Накачка волокна здійснювалось через вільний простір. Тривалість імпульсів після підсилювача становила 20 пс. За допомогою зовнішнього компресора цей імпульс стискався до 100 фс. Енергія вихідних імпульсів становила 1 мкДж.

У третьому розділі викладено результати оригінальних досліджень динаміки процесів абляції халькогалогенідного скла 65GeS₂·25Ga₂S₃·10CsCl та кристалічного кремнію окремими імпульсами фемтосекундного лазера в часовому діапазоні до 10 наносекунд, а також повідомляється про використання процесу фемтосекундної лазерної абляції для створення елементів мікрооптики – масивів мікролінз та мікродзеркал.

Актуальність таким дослідженням надають дедалі зростаючі потреби телекомунікаційних технологій та мікроелектроніки у мініатюризації функціональних елементів.

Схему установки, на якій проводилися експерименти з абляції матеріалу за допомогою окремих лазерних імпульсів, зображено на Рис. 2. Регенеративний підсилювач (РП) «Legend F-1K-HE» створює горизонтально поляризовані лазерні імпульси (максимальна енергія імпульсу 2,5 мДж, ширина імпульсу 200 фс, центральна довжина хвилі 800 нм). Енергія імпульсу регулюється шляхом повороту його площини поляризації півхвильовою пластинкою (ПХП) і пропускання через призму Ґлана (ПҐ). Далі імпульс проходить через діафрагму (А) з регульованим діаметром від 1 до 3 мм і відбивається від дихроїчного дзеркала (ДД). Об'єктив (О1) (3.7×, NA 0.11) фокусує світловий імпульс на зразок (Зр). У результаті дифракції на діафрагмі (А) у фокальній площині об'єктива (О1) формується розподіл інтенсивності, який має назву "диску Ейрі" (Рис. 3(а)).

Для реєстрації часових стадій процесу абляції створено установку часороздільної мікроскопії, блок-схему якої зображено на Рис. 4. Збудження

поверхні матеріалу здійснювалося імпульсом основної гармоніки, а еволюція процесу абляції реєструвалися за допомогою затриманого в часі зондуючого імпульсу другої гармоніки (Рис. 5(б)).



Рис. 2. Схема експериментальної установки для одноімпульсної абляції.



Рис. 3. а) диск Ейрі діаметром 32,4 мкм, що формується у фокальній площині об'єктива 3,7X лінзи з діаметром діафрагми 2 мм; б) зображення поверхні в зоні абляції при енергії імпульсу 12 мкДж і $\delta = 0$ у боковому світлі; в) зображення тієї ж поверхні, отримане під кутом за допомогою скануючої електронної мікроскопії (СЕМ).

Шляхом сканування поверхні халькогалогенідного скла 65GeS₂·25Ga₂S₃·10CsCl променем фемтосекундного лазера в режимі повторення імпульсів створено масив увігнутих мікролінз, здатних формувати масив дифракційно обмежених уявних фокальних плям і уявних зображень (рис. 4).

Напилення на поверхню мікролінз шару золота завтовшки 20 нм приводить до створення масиву увігнутих мікродзеркал, які формують дійсні фокальні плями й дійсні зображення. Швидкість продукування масивів мікролінз та мікродзеркал обмежена лише частотою повторення лазерних імпульсів (типове значення — 1000 мікролінз за секунду).



Рис. 4. Установка часороздільної нестаціонарної мікроскопії у конфігурації на відбивання.

Рис. 5 (а) ілюструє інтегровану за часом картину світіння струменя абляційної плазми при $E_p = 15$ мкДж. Окрім плазмового струменя, можна спостерігати і його відбиття від поверхні зразка праворуч від плями абляції. Нижче показано декілька перехідних стадій абляції при різних часових затримках τ_d , зазначених у лівій верхній частині зображень. Слід звернути увагу на появу і кінетику еволюції темної плями в області дії лазерного променя. Затримку, яка відповідає першому виявленому затемненню, позначено як «0». Таке затемнення, зумовлене оптичними перегрітого розплавленого властивостями матеріалу [1] та розсіюванням зондуючого променя на ранніх стадіях абляції. Після збільшення інтенсивності потемніння на початковій стадії при $0 < \tau_d < 27$ ps, далі відбувається поперечне розширення абляційної плями, яке починається із затримки на 127 пс, що вказує на початок викиду матеріалу зі збудженої області. Крім викиду матеріалу виявлено і формування вибухової хвилі, яка поширюється від плями абляції і сприяє згладжуванню поверхні розплаву. Перші ознаки утворення вибухових хвиль з'являються при $\tau_d = 1,7$ нс. Фронт вибухової хвилі стає видимим завдяки різкій зміні показника заломлення в інтерфейсі плазма/повітря. Фронт має асферичну форму, яка вказує на анізотропне розширення продуктів абляції. Максимальна швидкість вибухової хвилі, яка розрахована за останніми двома зображеннями із затримками 4,3 і 7,6 нс, становить 9,7 км/с, тобто є значно вищою за швидкість звуку в повітрі. Наявність тороїдальної формації, яку видно на краю кратера при затримках 1,7 – 7,6 нс, може свідчити про поперечне витискання розплавленого шару, що рухається під тиском вибухової хвилі. Слід звернути увагу на те, що на краю кратера після затвердіння і утворення мікролінзи не залишається помітних слідів викиду матеріалу (Рис. 3(в)).



Рис. 5. а) Інтегрована в часі картина світіння абляційної плазми при енергії імпульсу 15 мкДж та б) часові стадії фемтосекундної лазерної абляції халькогенідного напівпровідникового скла, отримані методом часороздільної нестаціонарної мікроскопії.

Шляхом нанесення металевої плівки на поверхню створених таким чином мікролінз отримано масиви з увігнутих мікродзеркал.

Значна частина імпульсу, що залишається після поглинання поверхнею, поширюється всередині матеріалу, де піддається самофокусуванню і філаментації. Враховуючи можливий вплив цих ефектів на результати фемтосекундної обробки функціональних склоподібних середовищ, ми вивчили поширення фемтосекундних імпульсів всередині халькогалогенідного скла, використовуючи установку часороздільної поляризаційної мікроскопії (Рис. 7). Результати вимірів представлені на Рис. 8.

Видно, що при затримках 2,0 – 4,67 пс імпульс самостискується майже до 7 мкм, що значно менше за дифракційно обмежений діаметр фокальної плями 32,4 мкм. Це є підтвердженням того, що в матеріалах відбуваються процеси самофокусування і утворення філаментів. Зауважимо, що Е_{ім} = 100 нДж перевищує

порогове значення енергії утворення філаментів, яка для цього матеріалу оцінено приблизно в 70 нДж. Крім цього, з наведених результатів можна визначити швидкість розповсюдження імпульсу, а значить, і коефіцієнт заломлення матеріалу (n = 2, 16).



Рис. 6. Масив мікролінз і сформовані ним зображення літер IP (Institute of Physics).



Рис. 7. Установка часороздільної нестаціонарної мікроскопії у конфігурації на проходження.

В четвертому розділі досліджено умови створення періодичних структур на поверхні тугоплавких металів (Ті, Мо) шляхом опромінення останніх фемтосекундними лазерними імпульсами з довжинами хвиль 800 нм і 1,05 мкм. Такі матеріали можна використати як підкладки для орієнтації нематичних рідких кристалів. Опромінення здійснювалось перпендикулярно до поверхні зразка. Енергія імпульсу для створення структур оптимальної якості при довжині хвилі 1,05 мкм становила 1 мкДж.

Раніше було встановлено [2], що причиною зародження періодичних структур є інтерференція падаючої і розсіяної на дефектах поверхні хвиль з урахуванням плазмон-поляритонних збуджень.

Досліджено початкові стадії формування лазерно-індукованих періодичних поверхневих структур (ЛПППС) на поверхні титану навколо одиничного дефекту поверхні. Показано, що на дефекті виникає розсіяна хвиля, діаграма направленності

якої має диполеподібний характер (Рис. 10). Інтерференція падаючої та розсіяної хвиль призводить на появи на поверхні зразка максимумів інтенсивності, в яких відбувається формування сполук TiO₂ і TiN, виявлених нами методом раманівської спектроскопії (Рис. 9).



Рис. 8. Поширення фемтосекундних лазерних імпульсів у часі з енергією $E_p=100$ нДж в халькогалогенідному склі складу $65GeS_2 \cdot 25Ga_2S_3 \cdot 10CsCl$, отримані методом поляризаційної спектроскопії при різних часових затримках.

Поява у раманівському спектрі опроміненої фемтосекундним лазером області поверхні титану смуг при 144, 241, 324, 438 та 606 см⁻¹ (крива 2 на рис. 9) свідчить про те, що під дією імпульсів лазера на поверхні утворюється діоксид титану (TiO₂) у формі нанокристалів рутилу [3]. Якщо розглянути раманівські спектри нітриду титану TiN, то для них характерні лінії з максимумами при 200–225, 310–320 і 520–

550 см⁻¹ [4]. Спектральне положення цих смуг корелює з максимумами при 207, 324 та 545 см⁻¹ на кривій 2 (рис. 9.). Є підстави вважати, що раманівські піки при 205 та 545 см⁻¹ зумовлені формуванням ТіN на поверхні титану під дією опромінення, а в інтенсивність смуги при 324 см⁻¹, ймовірно, вносять вклад як нанокристали рутилу, так і ТіN.



Рис. 9. Спектри раманівського розсіювання поверхні титану, опроміненого фемтосекундними лазерними імпульсами (енергія імпульсу - 1 мДж, тривалість імпульсу – 120 фс, довжина хвилі - 800 нм) поза опроміненою областю (1) та в опроміненій області (2) зразка.

Встановлено, що на утворення ЛІППС істотно впливає якість обробки поверхні мішеней, яка визначає центри розсіяння на початковій стадії їх формування.



Рис. 10. Початкові стадії формування наноструктури навколо розсіювального центру: а) 15 імпульсів; б) 30 імпульсів; в) 50 імпульсів.



— 1 мкм

Рис. 11. ЛІППС створені на поверхні Ті. Рис. 12. ЛІППС створені на поверхні Мо.

Параметри фемтосекундних лазерних імпульсів: довжина хвилі $\lambda = 800$ нм, частота слідування v = 1 кГц, енергія імпульсу $E_{imn} = 4$ мДж, тривалість імпульсу $\tau = 130$ фс, швидкість сканування $V_{cкан} = 5 - 20$ мм/с.

Нами вперше продемонстровано можливість створення ЛІППС в різних матеріалах (Ті, Мо, Ni, Cu) шляхом сканування поверхні зразка сфокусованим променем фемтосекундного лазера (рис. 11–12). Виявлено можливість підвищення якості ЛІППС. Встановлено, що вплив дефектів поверхні на якість наноструктур не є визначальним.



650 нм 650 нм 10 мл. х. 10 мл. м

Рис. 13 СЕМ зображення наноструктурованого шару титану, який не покритий шаром полімеру

Рис. 14 ACM зображення наноструктурованого шару титану, який не покритий шаром полімеру

Вперше запропоновано новий метод орієнтації нематичних рідких кристалів на поверхні матеріалів в якому використовуються створені ЛІППС. З'ясовано, що лазерно індуковані поверхневі періодичні структури здатні орієнтувати нематичні рідкі кристали, нанесені на поверхню з такою структурою. Продемонстровано можливість збільшення азимутальної енергії зчеплення (AE3) поверхні наноструктурованої плівки титану шляхом нанесення на нього плівки полімеру. Показано, що наноструктурована плівка титану дає відносно малу азимутальну енергію зчеплення, тоді як нанесення на неї плівки полімеру приводить до значного збільшення цієї енергії. Встановлено, що величину азимутальної енергії зчеплення

14

можна змінювати в досить широкому діапазоні шляхом зміни як мінімум двох параметрів (швидкості сканування та густини енергії імпульсу на поверхні) під час обробки орієнтуючої поверхні.



Рис. 15. Залежності твіст-кута рідкокристалічної (РК) комірки а) від швидкості сканування при постійній густині енергії імпульсу на поверхні 0,55 Дж/см² і б) від густини енергії імпульсу на поверхні при постійній швидкості сканування 1500 мм/сек. РК комірка містить тестову пластинку з непокритим полімером наноструктурованим шаром (суцільні квадрати ромби) титану 1 наноструктурованим шаром титану, покритого плівкою ОДАПІ (суцільні кола і трикутники).



Рис. 16. Залежність розрахованої за формулою (1) АЕЗ орієнтуючої поверхні від швидкості сканування поверхні титану під час створення ЛІППС. РК комірка складається з тестової пластинки, що не покрита шаром полімеру (позначено трикутниками), та пластинки з ЛІППС, покритою плівкою ОДАПІ (позначено кружками).

Шляхом вимірів твіст-кута рідкокристалічної (РК) комірки досліджено залежність азимутальної енергії зчеплення орієнтуючої поверхні від швидкості сканування і енергії збуджувального імпульсу при створенні ЛІППС. Твіст-кут ф співвідноситься з АЕЗ наступним чином [5], [6]:

$$W_{\varphi} = K_{22} \times \frac{2 \times \sin \varphi}{d \times \sin 2(\varphi_0 - \varphi)} \tag{1}$$

де d – товщина РК комірки, $\varphi_0 = 36^\circ$ кут між вільними осями референтної та тестової пластинок, φ – виміряний твіст-кут, K_{22} – стала, що характеризує РК. Результати вимірів твіст-кута наведено на Рис. 15.

Розрахована за формулою (1) залежність АЕЗ від швидкості сканування представлена на Рис. 16. Встановлено, що максимальна АЕЗ досягається в діапазоні швидкостей сканування від 900 до 1200 мм/с.

У п'ятому розділі повідомляється про перше спостереження поляризаційних особливостей білого суперконтинууму (СК) та конічної емісії (КЕ) філаментів у середовищах з подвійним променезаломленням для випадків $n_0 < n_e$ і $n_0 > n_e$, (відповідно кварц і сапфір).

Структура філаментів, умови їх формування та властивості СК і КЕ раніше вивчались переважно в ізотропних керрівських середовищах. Анізотропія показника заломлення впливає на процес філаментації, приводячи до виникнення періодичної модуляції інтенсивності люмінесценції в плазмовому каналі філамента [7]. Фізичною причиною спостереженої періодичності є циклічне перетворення стану поляризації світлового імпульсу в двозаломлюючих середовищах внаслідок набігу фази між звичайним і незвичайним променями.

В цьому розділі вперше виявлено вплив розбіжності групових швидкостей ота е- променів на поляризаційні властивості білого суперконтинууму (СК) і конічної емісії (КЕ), які генеруються фемтосекундними філаментами. Блок-схему установки, з використанням якої проводились дослідження, зображено на Рис. 17. Поляризація СК та КЕ аналізувалася за допомогою поляризатора П2, а кутовий спектр КЕ зондувався гнучким оптичним волокном з діаметром 1 мм і вимірювався SP-2500i. спектрографом Встановлено, шо циркулярної поляризації за зондувального променя СК і КЕ набувають взаємно ортогональної поляризації внаслідок розбіжності групових швидкостей звичайного і незвичайного променів, причому поляризація СК збігається з поляризацією більш «повільного», а КЕ більш «швидкого» променя.

Отже, показано, що поляризація конічної емісії визначається поляризацією заднього фронту сумарного імпульсу, тоді як передній фронт визначає поляризацію білого суперконтинууму.

Запропоновано фізичний механізм генерації КЕ в результаті чотирихвильового змішування інфрачервоної компоненти СК і збуджувального випромінювання, який пояснює особливості її поляризації.



Рис. 17. Схема експериментальної установки для вивчення поляризаційних властивостей СК та КЕ. П1, П2 – призми Глана, Д – діафрагма, Л – лінза, З – зразок.



Рис. 18. Залежність поляризації КЕ та СК у сапфірі та кристалічному кварці від поляризації вхідного променя.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. Побудовано оптоволоконний фемтосекундний лазер на ітербії з багатоступеневим підсилювачем. Кожну ступінь підсилювача спроектовано так, щоб зміни у формі імпульсу, генерованого в осциляторі, були мінімальними. Це досягалось шляхом балансу між звуженням підсилення і самомодуляцією фази. Отримано імпульси з енергією 1 мкДж, тривалістю 100 фс, з частотою слідування 1 МГц.

2. Виявлено поляризаційні особливості білого СК та КЕ фемтосекундних лазерних філаментів у кристалах кварцу та сапфіру, зумовлені їх додатним та від'ємним подвійним променезаломленням. СК і КЕ набувають взаємно ортогональних напрямків поляризації внаслідок розбіжності групових швидкостей звичайного і незвичайного променів. Запропоновано фізичний механізм генерації конічної емісії, який пояснює особливості її поляризації.

утворення стадії лазерно Досліджено індукованих періодичних 3. поверхневих структур (ЛПППС) навколо дефекту поверхні титану в залежності від кількості імпульсів. Встановлено диполеподібний характер зародження ЛІППС. раманівської спектроскопії встановлено, шо в процесі Метолом росту наноструктури внаслідок взаємодії металевого титану з повітрям утворюються діелектричні сполуки ТіО₂ і ТіN.

В результаті вивчення динаміки лазерної абляції халькогалогенідного 4 скла 65GeS₂·25Ga₂S₃·10CsCl імпульсами фемтосекундного лазера визначено основні часові стадії цього процесу. Встановлено, що дія сил поверхневого натягу і тиску надзвукової вибухової хвилі на залишковий рідкий шар формує кратери з оптично властивості увігнутих мікролінз. гладкою поверхнею, які мають Енергія фемтосекундного лазерного імпульсу поглинається у поверхневому шарі халькогалогенідного скла внаслідок двофотонного поглинання, а залишкова частина імпульсу поширюється в об'ємі матеріалу в філаментному або мультифіламентному режимі, не призводячи на своєму шляху до незворотних структурних змін.

5. Продемонстровано швидкий та гнучкий процес виробництва дифракційно обмежених масивів мікролінз та мікродзеркал у халькогалогенідних стеклах. Масив мікролінз формувався методом сканування поверхні зразка сфокусованим лазерним променем. Напилення плівки золота завтовшки 20 нм на поверхню з мікролінзами створює масив мікродзеркал. Керування лазерними імпульсами за допомогою комп'ютерної програми надає можливість створювати масиви мікрооб'єктів довільної геометрії. На базі цієї методики можливе створення технології виробництва мікролінз та мікродзеркал, продуктивність якої обмежена лише частотою слідування фемтосекундних лазерних імпульсів.

6. Запропоновано новий метод створення орієнтації нематичних РК на поверхні матеріалів. З'ясовано, що ЛІППС здатні орієнтувати нематичні РК, нанесені на поверхню з ЛІППС. Продемонстровано можливість збільшення AE3 поверхні наноструктурованого шару титану шляхом нанесення на нього плівки полімеру. Показано, що наноструктурований шар титану має відносно малу AE3,

тоді як нанесення на наноструктурований шар титану плівки полімеру призводить до сильного зростання AE3. Показано, що величину AE3 можна змінювати в широкому діапазоні за допомогою зміни щонайменше двох параметрів (швидкості сканування та густини енергії імпульсу на поверхні) під час обробки орієнтуючої поверхні.

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації в наукових журналах:

- 1* Rybak A. Optical properties of the Ti surface structured by femtosecond laser beam
 / L. Dolgov, R. Kravchuk, A. Rybak, V. Kiisk, I. Sildos // Semicond. Phys. Quantum Electron. Optoelectron.- 2011.- V. 14.- P. 325–329.
- 2* Rybak A. Nonlinear laser lithography for indefinitely large-area nanostructuring with femtosecond pulses / B. Oktem, I. Pavlov, S. Ilday, H. Kalaycioglu, A. Rybak, S.Yavas, F. O. Ilday // Nature Photonics.- 2013.- V. 7.- P. 897–901.
- 3* Rybak A. 'White Supercontinuum' and 'Conical Emission' of Femtosecond Filaments in Birefringent Media / I. Blonskyi, V. Kadan, A. Rybak, P. Korenyuk // Ukr. J. Phys. – 2016.- V. 61.- P. 873–878.
- 4* Rybak A. Optical Phenomena and Processes Induced by Ultrashort Light Pulses in Chalcogenide and Chalcohalide Glassy Semiconductors / I. Blonskyi , V. Kadan, A. Rybak, S. Pavlova, L. Calvez, B. Mytsyk, O. Shpotyk // J. Nano- Electron. Phys.-2017.- V. 9.- P. 5033-1-5033-5.
- 5* Rybak A. Single-pulse femtosecond laser fabrication of concave microlens- and micromirror arrays in chalcohalide glass / V. Kadan, I. Blonskyi, Ye. Shynkarenko, A. Rybak, L. Calvez, B. Mytsyk, O. Spotyuk // Opt. Laser Technol.- 2017.- V. 96.-P. 283–289.
- 6* Rybak A. The alignment of nematic liquid crystal by the Ti layer processed by nonlinear laser lithography / I. Pavlov, A. Rybak, A. Dobrovolskiy, V. Kadan, I. Blonskiy, F. Ö. Ilday, Z. Kazantseva, I. Gvozdovskyy // Liq. Cryst.- 2018.- V. 45,. № 9.- P. 1265-1271.
- 7* Rybak A. High-quality alignment of nematic liquid crystals using periodic nanostructures created by nonlinear laser lithography / I. Pavlov, A. Rybak, A. Dobrovolskiy, V. Kadan, I. Blonskiy, Ö. Ilday, Z. Kazantseva, I. Gvozdovskyy // J. Mol. Liq.-2018.- DOI: 10.1016/j.molliq.2018.02.058.

Тези доповідей на наукових конференціях:

- 8* Rybak A. Balancing gain narrowing with self phase modulation: 100-fs, 800-nJ from an all-fiber-integrated Yb amplifier / I. Pavlov, A. Rybak, C. Cenel, F. O. Ilday // Conference on Lasers & Electro-Optics Europe & International Quantum Electronics Conference CLEO EUROPE/IQEC 1–1 (IEEE, 2013). doi:10.1109/CLEOE-IQEC.2013.6801340.
- 9* Рыбак А.С. Наноструктурирование поверхности титана под действием мощных ультракоротких лазерных импульсов / А.С. Рыбак, Р.Н. Кравчук,

В.И. Степкин, И.А. Павлов, И.В. Блонский // 2 Міжнародна наукова конференція "Наноструктурні матеріали–2010", НАНО–2010, 19 – 22 жовтня, Київ.

- 10* Рибак А.С. Елементи мікрооптики для сенсорних застосувань, створені з використанням прецизійних лазерних технологій / В.М. Кадан, І.В. Блонський, Є.В. Шинкаренко, А.С. Рибак, О.Й. Шпотюк, Л. Калвез // 7-ма Міжнародна науково-технічна конференція "Сенсорна електроніка та мікросистемні технології" (СЕМСТ-7), 30 травня — 3 червня, 2016, Одеса.
- 11* Rybak A. Single-shot femtosecond laser fabrication of microlenses in chalcogenide glass / I. Blonskyi, V. Kadan, Y. Shinkarenko, A. Rybak, O. Shpotyuk, L. Calvez // IX international conference on topical problems of semiconductor physics, on May 16 - 20, 2016, Truskavets.
- 12* Рибак А.С. Надкороткі світлові імпульси в халькогенідних напівпровідниках: особливості розповсюдження та індукованого руйнування матеріалів / І.В. Блонський, В.М. Кадан, П.І. Коренюк, А.С. Рибак, Є.В. Шинкаренко, О.Й. Шпотюк // VII Українська наукова конференція з фізики напівпровідників (УНКФН-7), 26-30 вересня 2016, Дніпро.
- 13* Rybak A. Nonlinear laser lithography-based high-quality alignment of nematic liquid crystals / I. Pavlov, A. Rybak, A. Dobrovolskiy, V. Kadan, I. Blonskyi, Z. Kazantseva, I. Gvozdovskyy // Electronic Processes in Organic and Inorganic Materials (ICEPOM-11), May 21-25, 2018, Ivano-Frankivsk.
- 14* Rybak A. Femtosecond laser fabrication of microoptical elements for optoelectronic sensors / I. Blonskyi, V. Kadan, I. Pavlov, S. Pavlova, A. Rybak, O. Shpotyuk // 8-ма Міжнародна науково-технічна конференція "Сенсорна електроніка та мікросистемні технології" (СЕМСТ-8), 28 травня — 1 червня, 2018, Одеса.
- 15* Rybak A. Spatio-temporal transformation of infra-red femtosecond laser pulses in crystal silicon / I. Blonskyi, V. Kadan, S. Pavlova, I. Pavlov, A. Rybak, L. Calvez, O. Shpotyuk // X international conference on topical problems of semiconductor physics, on June 26 29, 2018, Truskavets.

СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] Miloshevsky A. Dynamics of plasma expansion and shockwave formation in femtosecond laser-ablated aluminum plumes in argon gas at atmospheric pressures / A. Miloshevsky, S. S. Harilal, G. Miloshevsky, and A. Hassanein // Phys. Plasmas.- 2014.- V. 21, N_{2} 9.- P. 043111.

[2] Temple P. Polarization charge model for laser-induced ripple patterns in dielectric materials / P. Temple and M. Soileau // IEEE J. Quantum Electron.- 1981.- V. 17, № 10.- P. 2067–2072.

[3] Mazza T. Raman spectroscopy characterization of TiO₂ rutile nanocrystals / T. Mazza, E. Barborini, P. Piseri, P. Milani, D. Cattaneo, A. Li Bassi, C. E. Bottani, C. Ducati // Phys. Rev. B.- 2007.- V. 75, № 4.- P. 045416.

[4] Spengler W. Raman scattering, superconductivity, and phonon density of states of stoichiometric and nonstoichiometric TiN / W. Spengler, R. Kaiser, A. N. Christensen, and G. Müller-Vogt // Phys. Rev. B.- 1978.- V. 17, № 3.- P. 1095–1101.

[5] Andrienko D. Control of the Anchoring Energy of Rubbed Polyimide Layers by

Irradiation with Depolarized UV-Light / D. Andrienko, Y. Kurioz, M. Nishikawa, Y. Reznikov, and J. L. West // Jpn. J. Appl. Phys.- 2000.- V. 39, Part 1, № 3A.-P. 1217-1220.

[6] Gerus I. Anchoring of a liquid crystal on a photoaligning layer with varying surface morphology / I. Gerus, A. Glushchenko, S.-B. Kwon, V. Reshetnyak, and Y. Reznikov // Liq. Cryst.- 2001.- V. 28, № 11.- P. 1709–1713.

[7] Blonskyi I. Periodic femtosecond filamentation in birefringent media / I. Blonskyi, V. Kadan, Y. Shynkarenko, O. Yarusevych, P. Korenyuk, V. Puzikov, L. Grin' // Appl. Phys. B.- 2015.- V. 120, № 4.- P. 705–710.

АНОТАЦІЯ

Рибак А.С. Ефекти структурування нано- та мікрометрового масштабу в твердотільних середовищах під дією фемтосекундного лазерного випромінювання. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.05 «оптика, лазерна фізика». Інститут фізики НАН України, Київ, 2018.

В дисертації експериментально досліджено ефекти структурування нано- та мікрометрового масштабу в твердотільних середовищах під дією фемтосекундного лазерного випромінювання.

Побудовано оптоволоконний фемтосекундний лазер на ітербії 3 багатоступеневим підсилювачем. Кожну ступінь підсилювача спроектовано так, щоб зміни форми імпульсу, генерованого в осциляторі, були мінімальними. Це балансу звуженням шляхом між званим досягалось так підсилення 1 самомодуляцією фази. Отримано імпульси з енергією 1 мкДж і тривалістю 100 фс на частоті слідування 1 МГц.

Виявлено поляризаційні особливості білого суперконтинууму (СК) та конічної емісії (КЕ) фемтосекундних лазерних філаментів у кристалах кварцу та сапфіру, зумовлені їх додатним та від'ємним подвійним променезаломленням. СК і КЕ набувають взаємно ортогональних поляризацій як результат розбіжності групових швидкостей звичайного і незвичайного променів. Запропоновано фізичний механізм генерації конічної емісії, який пояснює особливості її поляризації.

Розроблено дешевий і швидкий метод виробництва лазерно індукованих періодичних поверхневих структур (ЛПППС) високої якості.

Продемонстровано швидкий та гнучкий процес продукування дифракційно обмежених мікролінз та мікродзеркал у халькогалогенідному склі. Кожна лінза створюється одним лазерним імпульсом, енергія якого поглинається робочим матеріалом в процесі двофотонного поглинання. Вибухова хвиля сприяє видаленню матеріалу з місця абляції. Залишковий тонкий шар рідини у процесі тверднення набувє оптично гладкої поверхні під дією сил поверхневого натягу. Утворений на поверхні абляційний кратер має властивості увігнутої лінзи. Частина імпульсу, що залишалася після двофотонного поглинання, найбільш вірогідно, входить в об'єм зразка у філаментному або мультифіламентному режимі, не призводячи на своєму шляху до незворотних змін у матеріалі. Масив мікролінз вироблявся методом сканування поверхні зразка сфокусованим лазерним променем. Напилення плівки металу на поверхню з мікролінзами перетворює їх у мікродзеркала. Керування послідовністю лазерних імпульсів за допомогою комп'ютерної програми дає можливість створювати масиви мікролінз довільної геометрії. Отже, на основі цієї методики можна створити технології виробництва мікролінз та мікродзеркал. Її продуктивність обмежена лише частотою слідування фемтосекундних лазерних імпульсів, яка зазвичай становить 1 кГц.

Вперше запропоновано метод орієнтації нематичних рідких кристалів на поверхні матеріалів. Встановлено, що ЛІППС здатні орієнтувати нематичні рідкі кристали, нанесені на поверхню ЛІППС. Продемонстровано можливість збільшення азимутальної енергії зчеплення (AE3) поверхні наноструктурованих шарів титану (HCШT) шляхом нанесення на нього плівки полімеру. Показано, що HCШT має відносно малу AE3, тоді як нанесення на HCШT плівки полімеру призводить до значного зростання AE3. Показано, що величину AE3 можна змінювати в широкому діапазоні шляхом зміни щонайменше двох параметрів (швидкості сканування та густини енергії імпульсу на поверхні) під час обробки орієнтуючої поверхні.

Ключові слова:

філаментація, мікроструктурування, мікролінза, наноструктурування, фемтосекундні лазерні імпульси, групова швидкість, оптоволоконні лазери, фемтосекундна часороздільна мікроскопія, конічна емісія, подвійне променезаломлення, білий суперконтинуум, металеві плівки, азимутальна енергія зчеплення, рідкі кристали, орієнтація рідких кристалів.

ABSTRACT

Rybak, A.S. Effects of micro- and nanoscale structuring in solid media under femtosecond laser irradiation. – Manuscript.

Thesis for Candidate of Sciences degree (equivalent to Ph.D.) in Physics and Mathematics, specialty 01.04.05 Optics and Laser Physics. Institute of Physics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2018.

The thesis is devoted to the experimental studies of micro- and nanoscale structuring effects in solid media under femtosecond laser irradiation.

Femtosecond optical fiber laser based on ytterbium with a multistage amplifier is constructed. Each stage of the amplifier was arranged in such a way that it provides minimal variation of the pulse shape generated in the oscillator. This was achieved by balancing between so-called gain narrowing and self-phase modulation. Pulses with energy of 1 μ J and duration of 100 fs at a repetition rate of 1 MHz were obtained.

Polarization features of white supercontinuum (SC) and conical emission (CE) of femtosecond laser filaments in quartz and sapphire crystals, resulting from their positive and negative birefringence, are reported. The SC and CE acquire orthogonal polarization planes as a result of the difference between the group velocities of the ordinary and extraordinary rays. A physical mechanism of the CE generation is proposed, explaining the specific features of its polarization.

A cheap and fast technique for the production of high-quality laser-induced periodic surface structures (LIPPS) based on the negative and positive feedback is proposed.

A fast and flexible process of fabrication of diffraction-limited microlenses and micromirrors in a chalcohalogenide glass is demonstrated. Each lens is fabricated by a single laser pulse, the energy of which was absorbed by the medium due to two-photon absorption process. The blast wave favoured the removal of material from the ablation spot. Solidification of the residual thin liquid layer formed an optically smooth surface due to the surface tension forces. After the two-photon absorption the residual part of the pulse penetrated into the sample bulk in a filament or multifilament mode without causing any irreversible changes in the material. An array of microlenses was fabricated by scanning the sample surface with a focused laser beam. Covering the microlense surface with a metal film converted it into micromirrors. Computer control of the sequence of laser pulses enables the formation of arrays of microlenses of various geometry. This technique can be used as a basis for the technology of fabrication of microlenses and micromirrors. The productivity of the technology is limited solely by the femtosecond laser pulse repetition rate which, as a rule, is 1 kHz.

New technique for orientation of nematic liquid crystals on the material surface is proposed. LIPPS are found to be capable of orienting nematic liquid crystals deposited on a surface with LIPPS. A method of increase of azimutal anchoring energy (AAE) of the surface of a nanostructured titanium layer (NSTL) by deposition the polymer film is demonstrated. NSTL is shown to possess a relatively low AAE while deposition of a polymer film results in a strong AAE increase. The AAE value can be varied in a broad range by variation of at least two parameters (the scanning speed and the pulse energy density on the surface) during the orienting surface processing.

Keywords:

Filamentation, micro structuring, microlense, nanostructuring, femtosecond laser pulses, fiber lasers, femtosecond pump-probe microscopy, conical emission, birefringence, white super continuum, azimuthal anchoring energy, liquid crystal orientation.

АННОТАЦИЯ

Рыбак А.С. Эффекты структурирования нано- та микрометрового масштаба в твердотельных средах под действием фемтосекундного лазерного излучения. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 «оптика, лазерная физика». Институт физики НАН Украины, Киев, 2018.

В диссертации экспериментально исследованы эффекты структурирования нано- та микрометрового масштаба в твердотельных средах под воздействием фемтосекундного лазерного излучения.

Построен оптоволоконный фемтосекундный лазер на иттербии с многокаскадным усилителем. Каждый каскад усилителя спроектирован таким образом, чтобы изменения формы спектра импульса, сгенерированного в осцилляторе, были минимальными. Это достигалось с помощью балансирования между сужением полосы усиления лазера и самомодуляцией фазы. Получены импульсы с энергией 1 мкДж и длительностью 100 фс на частоте повторения 1 МГц.

Выявлены поляризационные особенности белого суперконтинуума (СК) и конической эмиссии (КЭ) фемтосекундных лазерных филаментов в кристаллах кварца и сапфира, которые обусловлены их положительным и отрицательным двойным лучепреломлением. СК і КЭ приобретают взаимно ортогональные плоскости поляризации вследствие разницы групповых скоростей обыкновенного и необыкновенного лучей. Предложен физический механизм генерации конической эмиссии, который объясняет особенности её поляризации.

Разработан дешёвый и быстрый метод создания лазерно индуцированных периодических поверхностных структур (ЛИППС) высокого качества.

Продемонстрирован быстрый и гибкий процесс производства дифракционно ограниченных микролинз и микрозеркал в халькогалогенидном стекле. Каждая линза создавалась одним импульсом, энергия которого поглощалась рабочим материалом в процессе двухфотонного поглощения. Ударная волна абляции способствовала удалению материала с места образования кратера. В процессе затвердевания остаточный тонкий слой расплавленного материала под воздействием сил поверхностного натяжения приобретал оптически гладкую поверхность. Наиболее вероятно, что часть импульса, которая остаётся после двухфотонного поглощения, входит в объём образца в режиме филамента или мультифиламента, не вызывая при этом на своём пути необратимых изменений в материале. Массив микролинз создавался методом сканирования поверхности образца сфокусированным лазерным лучом. Напыление пленки металла на поверхность с микролинзами преобразует их в микрозеркала. Управляя последовательностью лазерных импульсов с помощью компьютерной программы, возможно создавать массивы микрообъектов произвольной геометрии. На базе этой методики возможно создание технологии производства микролинз и микрозеркал, продуктивность которой ограничена только частотой следования фемтосекундных лазерных импульсов. Типичное значение этой частоты равно 1 кГц.

Впервые предложен метод создания ориентации нематических жидких кристаллов на поверхности материалов. Установлено, что ЛИППС способны задавть ориентацию нанесенным на них нематическим жидким кристаллам. Продемонстрирована возможность увеличения азимутальной энергии сцепления (АЭС) поверхности путем нанесения на нее пленки полимера. Показано, что наноструктурированная пленка титана имеет относительно малую АЭС, тогда как нанесение на нее пленки полимера приводит к сильному увеличению АЭС. Показано, что величину АЭС можно изменять в довольно широком диапазоне с помощью изменения как минимум двух параметров (скорости сканирования и плотности энергии импульса на поверхности) процесса создания ориентирующей поверхности.

Ключевые слова:

филаментация, микроструктурирование, микролинза, наноструктурирование, фемтосекундные лазерные импульсы, групповая скорость, оптоволоконные лазеры, фемтосекундная времяразрешающая микроскопия, коническая эмиссия, двойное лучепреломление, белый суперконтинуум, металлические пленки, азимутальная энергия сцепления, жидкие кристаллы, ориентация жидких кристаллов.

Підписано до друку 20.09.2018 р. Зам. № 911. Формат 60х90 1/16. Папір офсетний. Друк – цифровий. Наклад 100 прим. Ум. друк. арк. 0,9. Друк ЦП «КОМПРИНТ». Свідоцтво ДК №4131 від 04.08.2011 р. м. Київ, вул. Предславинська, 28 528-05-42, 067-209-54-30 email: komprint@ukr.net