

ДК 004.085

№ держреєстрації: 0114U002061

Інв. №

Національна академія наук України
Інститут проблем реєстрації інформації
(ІПРІ НАН України)
03113, м.Київ-113, вул. Шпака, 2
тел. (044) 456-83-89, факс (044) 456-33-18
e-mail: ipri@ipri.kiev.ua

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор ІПРІ НАН України
академік НАН України

_____ В.В. Петров

ЗВІТ
ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ
«Дослідити та розробити методи створення високоефективних систем
фокусування оптичного випромінювання та обробки зображень на основі
інтегральної і дифракційної оптики»
(шифр «Нанокод»)

Керівник НДР
член-кор. НАН України,
доктор технічних наук

А.А. Крючин

Відповідальній виконавець
провідний науковий співробітник,
доктор технічних наук

А.С. Лапчук

Рукопис закінчено грудня 2018
Результати цієї роботи розглянуті Вченою Радою ІПРІ НАН України,
протокол №__ від _____

2018

РЕФЕРАТ

звіт по НДР: 106 с., 134 рис., 11 табл., 211 джерел

ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ:

Високоєфективні системи фокусування лазерного випромінювання.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ:

Розробка високоєфективних систем фокусування лазерного випромінювання з застосуванням принципів інтегральної оптики і систем зменшення спеклових шумів в лазерних проєкційних системах на основі дифракційних елементів. Аналіз можливостей застосування отриманих результатів в пристроях реєстрації інформації, в системах контролю, створення нанорозмірних структур, а також в малогабаритних лазерних проєкторах і системах ультразвукової діагностики.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ:

Запропоновано новий підхід у моделюванні механізму зменшення спеклових шумів за допомогою активних регулярних структур дифракційних оптичних елементів. Розроблена теорія базується на спектральному аналізі структури і аналізу динаміки дифрагованих лазерних пучків; вона дозволяє отримати аналітичні формули для розрахунку дисперсії контрасту спеклів у відповідності до компенсаційного методу, що застосовується. Досліджено дисперсію ефективності зменшення спеклових шумів для різних структур дифракційних оптичних елементів. Аналіз методів зменшення спеклів, що базуються на використанні одновимірних двосторонніх дифракційних оптичних елементів, показав, що вони характеризуються більшим діапазоном ефективного зменшення спеклів ніж діапазон візуального сприйняття ока людини, отже одна структура бути використана для ефективного зменшення спеклових шумів у всьому видимому діапазоні. Проаналізовано ефективність зменшення спеклових шумів для методів, що використовують лінійне та покрокове зміщення дифракційних оптичних елементів а також перемикання між різними структурами дифракційних оптичних елементів. Показано, що ефективність зменшення спеклових шумів методом, що використовує покрокове зміщення дифракційних оптичних елементів, залишається незмінною зі зменшенням вхідної числової апертури об'єктива проєктору у заданих межах. Результати експериментів з рухомими дифракційними оптичними елементами довели, що двовимірні структури з розподілом елементів на основі бінарного коду Баркера є ефективним методом зменшення лазерного спеклового шуму для більшої частини видимого діапазону світла. Розрахунки показують, що для отримання максимального ефекту для синього, зеленого і червоного лазера необхідно замінити двовимірну структуру на комплекс з двома ортогонально розташованими одновимірними структурами дифракційних оптичних елементів. Статистика проведення експериментальних досліджень по зменшенню спеклових шумів за допомогою активних регулярних структур дифракційних оптичних елементів відповідає теоретичним розрахунками. Показано, що експериментальні дані характеризуються стохастичними відхиленнями від теоретичних розрахунків, що можуть бути представлені у

вигляді нерегулярних осциляцій. Дані осциляції носять стохастичний характер і обумовлені недостатньою контрольованістю параметрів схеми під час експерименту, а також недостатньою точністю обробки даних проведення вимірів, що пов'язана з малою потужністю лазерних діодів і неоднорідністю освітлення. Аналіз компенсаційного методу показав, що базується на використанні рухомого дифракційного оптичного елемента у площині, спряженій до площини екрану показав мінімальну чутливість до аберацій оптичної системи. Досліджено, що контраст спеклів на периферії світлової плями змінюється лише у випадку зміни внаслідок аберацій кількості освітлювальних дифракційних порядків. Показано, що у оптичній схемі з дифракційним оптичним елементом розташованим безпосередньо перед оптичним модулятором, контраст спеклів є нечутливим до відстані між оптичним модулятором і елементом д тих пір, поки оптичний модулятор освітлюється всіма дифракційними порядками, що виникли при дифракції світла на елементі. Визначено, що для компенсаційних методів, у яких використовується квазіспіральна двовимірною дифракційною структурою, що базується на бінарній квазівипадковій M послідовності з довжиною коду $N=15$, дозволяють ефективно зменшувати спеклові шуми в усьому видимому діапазоні світла до рівня чутливості ока. Тим не менш, на границях видимого спектра ефективність зменшення спеклів зменшується у два рази по відношенню до центральної частини видимого діапазону. Математичне моделювання показує, що можна збільшити ширину смуги частот ефективного зменшення спеклів методу і зменшити контраст спеклів нижче чутливості ока людини до спеклів у всьому видимому діапазоні, якщо замінити дифракційну структуру на двосторонню одновимірною дифракційною структурою, що складається з двох елементів, розміщених між собою ортогонально на різних поверхнях. Визначено та експериментально підтверджено, що метод зменшення спеклів на основі нерухомого дифракційного оптичного елемента що поділяє один лазерний пучок на декілька десятків з подальшою декореляцією отриманих пучків за допомогою світловодів є ефективним і дозволяє суттєве зменшити рівень спеклових шумів. Проте, для досягнення мінімального рівня спеклових шумів необхідно використовувати високо габаритну конструкцію, що є неприйнятним для багатьох технічних застосувань. Проведений аналіз показав, що спекловий шум несе корисну інформацію про мікроструктуру зразка, причому зміна мікроструктури завжди призводить до зміни спеклових полів. Завдяки цьому аналіз спеклів є простим та неінвазивним інструментом для вимірювання зміни мікроструктури об'єктів з точністю, що може досягати декілька десятків нанометрів.

Проведено числове моделювання процесу зчитування інформації з оптичних дисків формату «ROM» в освітлювальному, освітлювально-відбивальному та освітлювально-збиральному режимах роботи ближньопольового зонду на основі оптичної плазмонної мікросмушкової лінії на довжині хвилі збуджуючого випромінювання 405 нм. Показано, що найбільш контрастний сигнал зчитування отримується в освітлювально-збиральному режимі, має правильну форму і його ширина на рівні половинної амплітуди

приблизно дорівнює довжині пітів. Крім того, в освітлювально-збиральному режимі існує можливість отримувати фазово-контрастне зображення с величиною контрасту . Прецесійний контроль відстані між мікросмужковим зондом і оптичним диском в освітлювально-збиральному режимі можна здійснювати в діапазоні висот від 0 до 100 нм. Досліджено рівень впливу перехресних наводок від сусідніх пітів при отриманні сигналу зчитування. Встановлено, що зменшення даного впливу можна досягти збільшенні відстані між сусідніми пітами до значення, що перевищує сумарну товщину діелектричного стрижня та металевого покриття мікросмужкового зонду. Проведено числове моделювання процесу зчитування інформації з оптичних дисків формату «R» і «RW» в освітлювально-відбивальному та освітлювально-збиральному режимах роботи ближньопольового зонду на основі оптичної плазмонної мікросмужкової лінії на довжині хвилі збуджуючого випромінювання 405 нм. Показано, що в цьому випадку сигнал зчитування в освітлювально-відбивальному режимі має правильну форму та відносно великий контраст . Було отримано фазово-контрастне зображення з невеликим контрастом . Показано, що сигнал в освітлювально-збиральному режимі отримується малоконтрастний () і неправильної форми. Розроблено і досліджено конструкцію ефективного торцевого з'єднання оптоволоконного зонда з ї з використанням коннектора SU-8. Було показано, що коефіцієнт ефективності передачі енергії та ефективність збудження фундаментальної моди зонду становлять 79% і 68% відповідно. Отримані результати підтвердили ефективність застосування запропонованої конструкції з'єднання оптоволоконного зонда з ближньопольовим зондом на основі оптичної плазмонної мікросмужкової лінії. Запропонована конструкція торцевого з'єднання може бути використана при розробці ближньопольових плазмонних пристроїв.

Розроблено метод розрахунку мод смужкових плазмонних хвилеводів. Метод враховує сингулярну поведінку поля локальних плазмонів на гострих металевих ребрах і модовий спектр плоских хвилеводних структур для ефективного розкладу полів власних мод смужкових плазмонних хвилеводів. Такий підхід максимально враховує особливості полів таких хвилеводів і повинен забезпечити швидку збіжність методу.

Ключові слова: спекли, безспеклові лазерні проектори, дифракційні оптичні елементи, нанотехнологія, надщільні методи реєстрації інформації, нанохвилеводи, локальні плаزمони.

Умови отримання звіту за адресою:
03113, Київ, вул. М.Шпака, 2, ІПРІ НАН України.

ЗМІСТ

1. ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	10
2. ВСТУП.....	11
3. РОЗДІЛ 1. Загальна теорія зменшення спеклових шумів активними бінарними дифракційними ґратками.....	18
1.1. Оптична схема лазерного проектора з механізмом зменшення спеклових шумів активним ДОЕ.....	20
1.1.1. Зв'язок між дифракційними порядками активного ДОЕ та декорельованими лазерними пучками.....	24
1.1.2. Метод декореляції лазерних пучків лінійним неперервним зміщенням ДОЕ.....	27
1.1.3. Декореляція полів дифракційних порядків при послідовному стрибкоподібному зміщенні ДОЕ	28
1.1.4. Декорельовані лазерні пучки при освітленні через послідовність ДОЕ, створених на основі матриці Адамара.....	29
1.2. Визначення дисперсії ефективності зменшення спеклів.....	30
1.2.1. Дисперсія ефективності зменшення спеклів при застосуванні метода на основі зміщення дифракційної ґратки.....	30
1.2.2. Дисперсія ефективності зменшення спеклів методом зміщення односторонньої 2D ДОЕ структури.....	31
1.2.3. Дисперсія ефективності зменшення спеклів методом зміщення двосторонньої 2D ДОЕ структури.....	32
1.2.3. Дисперсія ефективності зменшення контрасту спеклів на основі двійкових псевдовипадкових послідовностей.....	33
1.2.4. Зменшення спеклів при застосуванні декореляції через перемиканням дифракційних структур.....	35
1.3. Результати чисельного моделювання зменшення спеклових шумів.....	44
1.3.1. Дисперсія ефективності зменшення спеклових шумів.....	44
1.3.2. Ефективна кількість декорельованих лазерних пучків для різних методах активації ДОЕ.....	48
1.4. Висновки до розділу 1.....	52
4. РОЗДІЛ 2. Експериментальне дослідження зменшення рівня спеклових шумів шляхом застосування дифракційних структур.....	54
2.1. Залежність ефективності зменшення спеклових шумів від швидкості і напрямку зміщення дифракційного елемента.....	54
2.1.1. Моделювання залежності ефективності зменшення спеклів від швидкості зміщення ДОЕ.....	54
2.1.2. Залежність ефективності зменшення спеклів від швидкості випадкового дифузора	56
2.1.3. Залежність ефективності зменшення спеклів від швидкості і напряму зміщення 1D ДОЕ на основі коду Баркера і M-послідовності.....	60
2.1.4. Залежність ефективності зменшення спеклів від швидкості і напряму зміщення 2D ДОЕ на основі коду Баркера і M-послідовності.....	62
2.1.5. Експериментальні вимірювання ефективності зменшення спеклових шумів при	

застосуванні 2D ДОЕ на основі коду Баркера.....	68
2.1.6. Моделювання залежності ефективності зменшення спеклів від швидкості зміщення ДОЕ.....	79
2.2. Визначення впливу аберацій та дефокусування об'єктиву на ефективність зменшення спеклів.....	94
2.2.1. Вплив аберацій оптичної системи на структуру спеклів.....	94
2.2.2. Оптична схема лазерного проектора з рухомим ДОЕ.....	95
2.2.3. Математична модель механізму зменшення спеклових шумів.....	96
2.2.4. Оптична схема з рухомим ДОЕ, розташованим безпосередньо перед оптичним модулятором.....	99
2.2.5. Оптична схема з оптичним модулятором розміщеним в площині зображення ДОЕ.....	101
2.2.6. Аналіз на основі спектру просторових частот.....	103
2.2.7. Числове моделювання впливу первісних аберацій Церніке на ефективність зменшення спеклових шумів.....	107
2.3. Зменшення контрасту спеклів за допомогою обертання квазі-спіральної двовимірної ДОЕ.....	111
2.3.1. Оптична схема квазі-спірального компенсатору спеклів.....	111
2.3.2. Моделювання зменшення контрасту спеклів квазі-спіральною ДОЕ структурою.....	120
2.4. Вимірювання ефективності зменшення спеклів двосторонньою 1D ДОЕ на основі бінарних псевдовипадкових послідовностей.....	126
2.5. Зменшення контрасту спеклів одновимірною ДОЕ структурою розміщеною на гнучкій плівці закрученій у замкнену петлю.....	132
2.6. Експерименти по зниженню спеклів з одною активною і одною пасивною 1D ДОЕ.....	143
2.7. Зменшення спеклових шумів за допомогою нерухомого ДОЕ і багатомодових світловодів.....	154
2.8. Методики застосування спеклових структур.....	159
2.8.1. Спеклов технології роботи з компонентами фарб.....	160
2.8.2. Спекловий аналіз процесів корозії.....	162
2.8.3. Спекловий аналіз процесів фізико-хімічного вицвітання.....	163
2.8.4. Вивчення стабільності пін та піноутворювачів.....	163
2.8.5. Технології застосування біоспеклів.....	164
2.9. Висновки до розділу 2.....	166
5. РОЗДІЛ 3. Розробка методу збудження ближньопольового зонда, що базується на основі оптичної плазмонної мікросмушкової лінії.....	169
3.1. Розробка ближньопольового зонду на основі оптичної плазмонної мікросмушкової лінії.....	177
3.2. Застосування ближньопольового зонду на основі оптичної плазмонної мікросмушкової лінії в оптичному записі інформації.....	183
3.2.1. Зчитування інформації з оптичних дисків формату ROM.....	184
3.2.2. Зчитування інформації з оптичних дисків формату R і RW.....	194
3.2.3. Модифікація структури БЗОПМЛ для зчитування інформації з оптичних дисків.....	196

3.3. Математичне моделювання роботи мікросмушкового ближньопольового зонда у режимі зчитування.....	198
3.3.1. Методика проведення числового аналізу.....	198
3.3.2. Методика визначення коефіцієнту передачі за дальнім полем.....	201
3.3.3. Побудова аналітичної моделі.....	203
3.3. Режими роботи ближньопольового зонду на основі оптичної плазмонної мікросмушкової лінії.....	206
3.3.1. Освітлювальньо-відбивальний режим роботи БЗОМПЛ.....	206
3.3.2. Освітлювальньо-збиральний режим роботи БЗОМПЛ.....	212
3.4. Метод високоефективного збудження наносмушкового оптичного зонда сканувального ближньопольового оптичного мікроскопа.....	219
3.4.1. Конструкція торцевого з'єднання БЗОПМЛ з оптоволоконним зондом з використанням коннектора SU-8.....	220
3.4.2. Аналіз параметрів коннектора SU-8.....	223
3.4.3. Аналіз ефективності збудження фундаментальної моди БЗОПМЛ з використанням коннектора SU-8.....	230
3.5. Моделювання хвилеводних мод плазмонних метало-діелектричних смужкових хвилеводів.....	234
3.5.1. Сингулярне зростання поля локального плазмона на ребрі.....	236
3.5.2. Власні хвилі плоских метало-діелектричних структур	240
3.6. Висновки до розділу 3.....	242
6. ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ.....	244
7. СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	248
53. J.-H. Lee, D.-W. Kim, Y.-H. Wu, C.-J. Yu, S.-D. Lee, and S.-T. Wu, “High-speed infrared phase modulators using short helical pitch ferroelectric liquid crystals,” <i>Opt. Express</i> , 13(20), 7732–7740 (2005).....	252
54. A. Lapchuk, V. Yurlov, A. Kryuchyn, G. A. Pashkevich, V. Klymenko, and O. Bogdan, “Impact of speed, direction, and accuracy of diffractive optical element shift on efficiency of speckle suppression,” <i>Appl. Opt.</i> 54(13), 4070–4076 (2015).....	252
56. W. Thomas, and C. Middlebrook, “Non-moving Hadamard matrix diffusers for speckle reduction in laser pico-projectors,” <i>Journal of Modern Optics</i> , 61(Supp 1), S74–S80 (2014).....	252
57. Z. Tong and X. Chen, “Principle, design and fabrication of a passive binary micro-mirror array (BMMA) for speckle reduction in grating light valve (GLV) based laser projection displays,” <i>Sensors & Actuators A Physical</i> . 210(1), 209–216 (2014).....	252
58. J. W. Goodman, “Some Fundamental Properties of Speckle,” <i>J. Opt. Soc. Am.</i> 66(66), 1145–1149 (1976).....	253