

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

ФАКУЛЬТЕТ РАДІОФІЗИКИ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ

Кафедра медичної радіофізики

«На правах рукопису»

Робота допущена до захисту в ЕК
рішенням кафедри медичної радіофізики
від ____ 2024 року, протокол № ____
Завідувач кафедри канд. фіз.-мат. наук, доцент
_____ Сергій РАДЧЕНКО

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

на тему:

**«СТВОРЕННЯ УСТАНОВКИ ТА ВИБІР ОПТИМАЛЬНИХ УМОВ ДІАГНОСТИКИ
ЗОРУ НА ОСНОВІ СПОСТЕРЕЖЕННЯ СПЕКЛІВ»**

Виконав:

студент 4-го курсу
денної форми навчання
спеціальності 105 «Прикладна фізика та наноматеріали»
ОПП «Електроніка та інформаційні технології в медицині»
Ліннік Олександр Олександрович _____

Науковий керівник:

докт. фіз.-мат. наук, доцент
Іванісік Анатолій Іванович _____

Рецензент:

канд. фіз.-мат. наук, доцент
Кравченко Олександр Юрійович _____

Засвідчую, що у цій бакалаврській роботі
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань

Студент _____ Олександр ЛІННІК

Реферат

Випускна кваліфікаційна робота бакалавра включає. 40 с., 24 рис., 16 джерел.

В даній роботі було протестовано різні, зокрема поліетиленові поверхні, на пропускання та відбиття, на яких спостерігалися спекл-структури. Для формування спекл-зображень використовувалися напівпровідниковий лазер з довжиною хвилі $\lambda = 687,93$ нм та Nd-лазер з довжиною хвилі $\lambda = 530$ нм (друга гармоніка). Також спостереження проводилися за різних розташувань пацієнта в залежності від відстані та кута спостереження. Проведено моделювання характеристик спекл-структур в залежності від регулярних структур

Зміст

Вступ	4
Розділ 1. Оглядова частина	5
1.1 Особливості використання лазерів в офтальмології	5
1.2 Спекл ефект	6
1.3 Дефекти зору	11
1.3.1 Міопія	11
1.3.2 Гіперметропія	12
1.4 Установки для спостереження спеклів	14
Розділ 2. Експериментальна частина	21
Розділ 3. Аналіз результатів	21
Висновки	38
Перелік використаних джерел	39

Вступ

Застосування лазерів в офтальмології відбувається з метою діагностування, терапії та хірургії. У сучасній офтальмології використовуються різні технології, такі як лазерна томографія, аберрометрія та інші, які базуються на принципах лазерних спеклів для точної діагностики та корекції зору. Спекл-структура лазера на відбиваючій поверхні виникає в результаті розсіювання лазерного випромінювання сітківкою ока людини.

Лазерні спекли структури можна використовувати як метод для проведення дуже чутливого тесту зору. Вони дозволяють визначити характеристики заломлення світла в окулярних тканинах, а саме зміни в заломлення можуть вказувати на патології, які потребують корекції або лікування.

Для того, щоб проста та легкодоступна діагностика зору методом лазерного спеклу зображень стала широковживаною необхідно проводити дослідження направлені на визначення оптимальних умов діагностики, а саме технічні параметри установки, покращення візуалізації спеклів зображень, тип лазера, склад відбиваючої поверхні, відстань між зображенням та пацієнтом.

Мета роботи: дослідження технічних параметрів установки та визначення оптимальних умов діагностики зору на основі спостереження спеклів.

Об'єкт дослідження: визначення оптимальних умов для одержання чіткого зображення лазерного спеклу для дослідження зору в офтальмології

Предмет дослідження: аналітичний аналіз спеклів від регулярних структур в залежності від відстані і кута спостереження та дослідження прозорих екранів у схемі на пропускання світла

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯДОВА ЧАСТИНА

1.1 Особливості використання лазерів в офтальмології

Відкриття лазерів, що розпочалось ще на початку 20 століття видатним фізиком А. Айнштайном і Майманом у 60-ті роки цього ж століття, сприяло формуванню нової ери розвитку науково-технічного процесу. Лазерні технології широко застосовуються як у наукових дослідженнях, промисловості, військовій справі, так і в медицині. Сучасна хірургія та терапія широко використовує лазери для корекції зору, операції на сітківці та виправлення дефектів очного дна, а операції з застосуванням лазерного скальпеля не приводять до значного пошкодження живих тканин.

Спекл-ефект використовується в офтальмології для дослідження аномалії заломлення ока. У цьому випадку використовується наступна процедура. Спочатку пацієнт дивиться одним оком (другим закритий) розслаблений у напрямку шорсткої стіни, освітленої лазерним світлом. Пацієнт бачить малюнок з точок. Потім пацієнт рухає головою, наприклад, знизу вгору або зліва направо (або навпаки). Нарешті, пацієнт сприймає один з трьох варіантів: [1]

1. Одержане спекл-зображення залишається нерухомим. Це свідчить про відсутність аномалії заломлення ока.

2. Плямистий візерунок рухається вниз (вгору, вправо або вліво), коли голова і, отже, око піднімаються вгору (вниз, вліво або вправо). Підсумовуючи, зображення точок рухається всупереч руху голови. У цьому випадку спостерігається короткозорість.

3. Спекл рухається разом із рухом голови, тоді далекозорість.

На Рис. 1.1 а схематично зображено оптичний промінь, паралельного оптичній осі лінзи для ока без помилки заломлення в двох різних положеннях (внизу та вгорі). У цьому випадку око називають еметропним. Оскільки відстань між кришталиком і сітківкою відповідає фокусній відстані ока,

падаючий паралельний промінь заломлюється в одній точці сітківки незалежно від положення ока (внизу або вгорі).

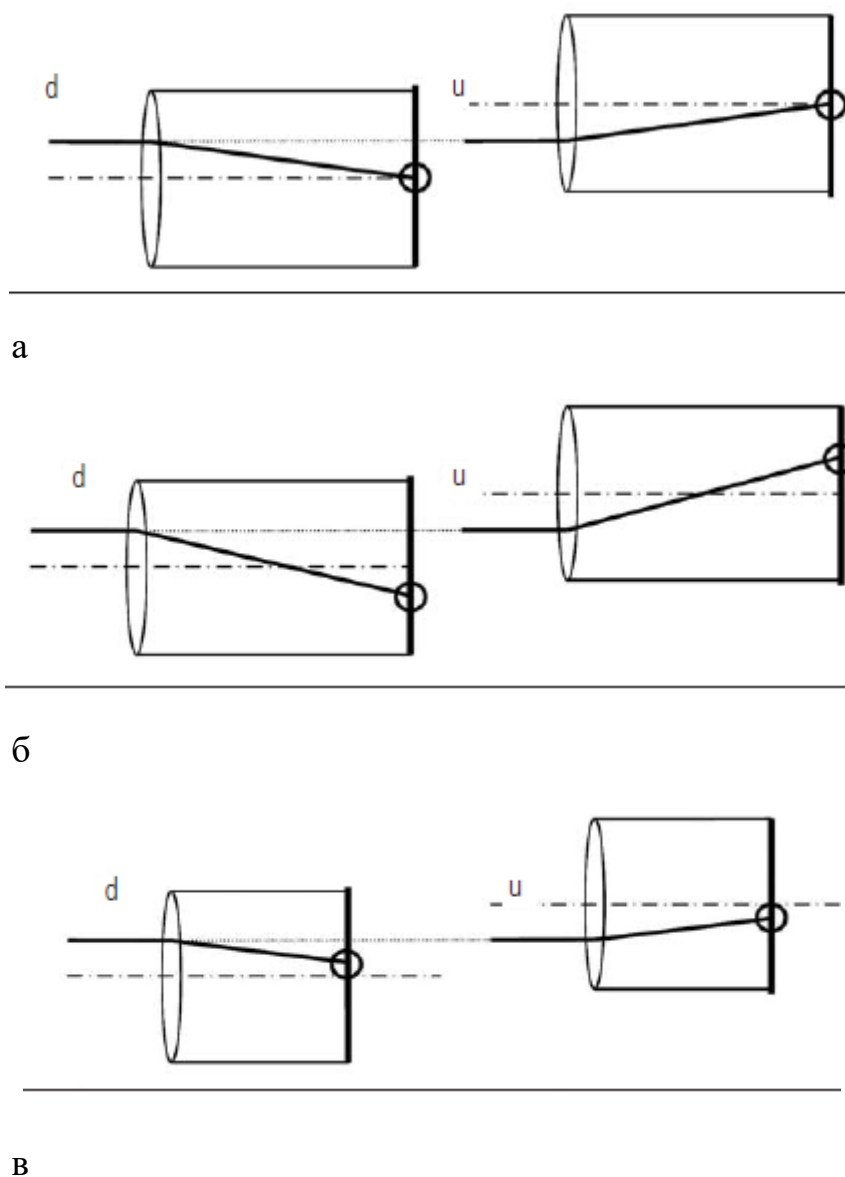


Рис. 1.1. Схематичне зображення оптичного променя, паралельного оптичній осі лінз: а-без аномалій, б- короткозорість, в- далекозорість [2].

1.2 Спекл ефект

Основна теорія лазерного спеклу була розроблена в 1960-х роках [3]. Було помічено, що коли лазер освітлює певну поверхню, висока когерентність світла створює випадковий гранулярний ефект, відомий як спекл. Лазерний спекл — це інтерференційна картина, створена світлом, відбитим або розсіяним від

різних частин поверхні, на яку потрапляє лазерний промінь. Якщо поверхня шорстка, світло від різних частин поверхні проходить різні довжини оптичного шляху та досягає площини зображення.

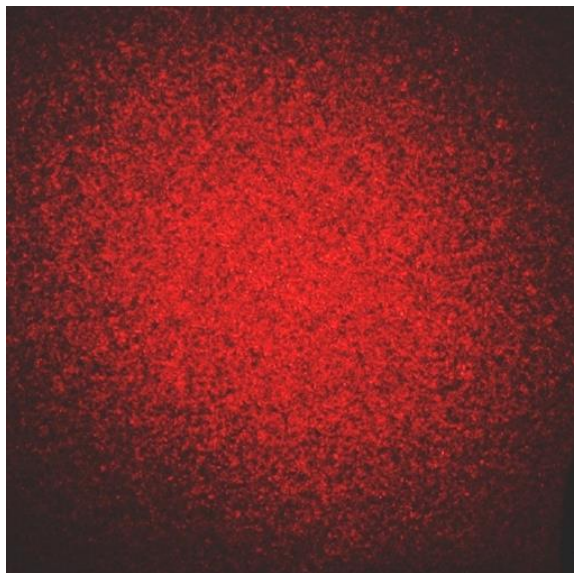


Рис.1.2. Фотографія спекла-зображення [4]

У випадку спостерігача, який дивиться на освітлену лазером поверхню, роздільною коміркою є межа роздільної здатності ока, а площиною зображення є сітківка. Інтенсивність у даній точці зображення визначається суперпозицією усіх хвиль, що надходять у цю точку. Якщо результуюча амплітуда дорівнює нулю, внаслідок гасіння всіх індивідуальних хвиль, то з'являється темна точка, а при умові; якщо всі хвилі досягають точки в фазі, спостерігається максимум інтенсивності. Згодом у 1970-х роках предметом дослідження став спекл, що змінюється в часі, викликаний рухом. Зокрема, встановлено зв'язок між коливаннями спекл-картини і рухом центрів розсіювання в живих організмах, наприклад, рухом еритроцитів [5]. Якщо об'єкт не рухається, а лазер стабільний, інтерференційна картина не змінюється з часом, і ця картина називається статичною спекл-схемою. Якщо об'єкт або частинки рухаються в середовищі, інтерференційна картина буде змінюватися з часом, і ця картина називається динамічною. Така динамічна поведінка в основному спричинена

доплерівськими зсувами світла, яке взаємодіє з рухомими частинками. У 1980-х роках цей ефект був використаний у фотографічній техніці, відомій як спекл-зйомка з однократною експозицією, розробленій для дослідження кровотоку в сітківці [6]. Методи спекл-потоків засновані на змінах з часом динамічної спекл-картинки, створеної рухом. Мінливий візерунок спеклів записується за допомогою камери в діапазоні мілісекунд. Через тривалий час інтеграції порівняно з типовим часом декореляції спекл буде розмитим на записаному зображенні. Рівень розмиття кількісно визначається спекл-контрастом. Спекл-контраст C зазвичай визначається як коефіцієнт стандарту відхилення σ інтенсивності I від середньої інтенсивності $\langle I \rangle$ плямистого візерунка:

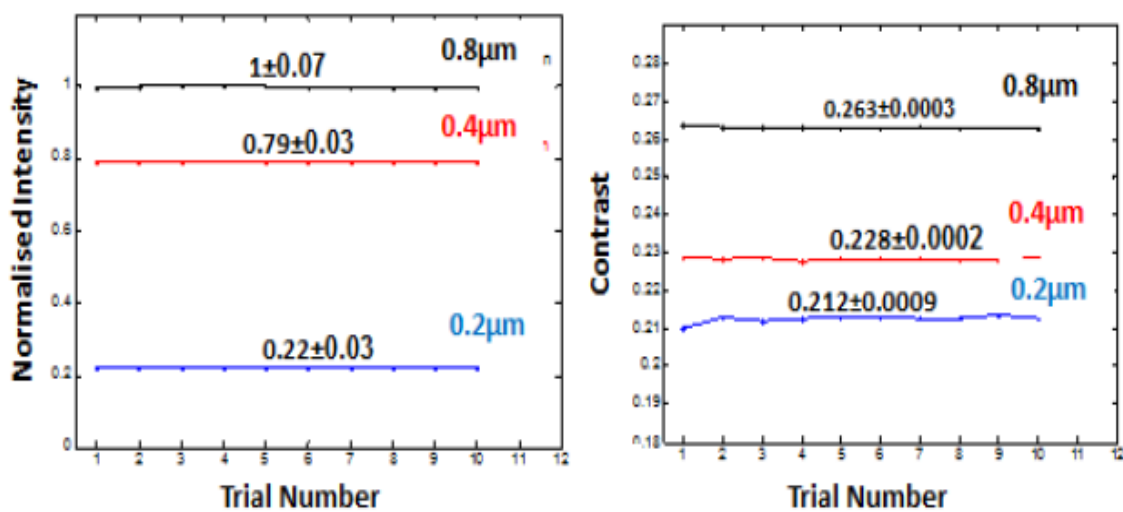
$$C \equiv \frac{\sigma}{\langle I \rangle} = \frac{\sqrt{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}}{\langle I \rangle} \quad (1)$$

Якщо об'єкт не рухається, або рух є незначним, то розмиття не буде або буде лише невелике. Гудман і Паррі [2] показали, що для статичного спекл-зображення за ідеальних умов (тобто ідеально монохроматичні та поляризовані хвилі та відсутність шуму) стандартне відхилення σ буде дорівнювати середній інтенсивності $\langle I \rangle$, а спекл-контраст дорівнює одиниці, що є максимальним значенням. Такий малюнок називається «повністю розвинутим». Коли в об'єкті відбувається рух, візерунок плям буде розмитим, а стандартне відхилення інтенсивності буде малим порівняно з незмінною середньою інтенсивністю, що призводить до зниження контрасту зображення.

Дослідження впливу текстури та морфології поверхні, від якої відбивається лазер, на контраст спекл-структур не досить добре представлено в літературі. Однак, повідомляється метод оцінки поверхневої текстури, заснований на лазерному спекл-аналізі [7, 8]. Інтенсивність лазерних спеклів, яка розглядається як просте явище розсіювання світла, може визначати шорсткість поверхні. Запропонований метод оцінює численні властивості поверхневої текстури з візерунка лазерного спеклу, такі як шорсткість, період і ступінь подібності в періодичних мікроповерхневих структурах. Експериментально досліджуючи зв'язок між поверхневою текстурою та лазерним спекл-шаблоном оброблених поверхонь, було запропоновано декілька характерних параметрів лазерного спеклу, таких як середня інтенсивність, довжина автокореляції розподілу інтенсивності та інше.

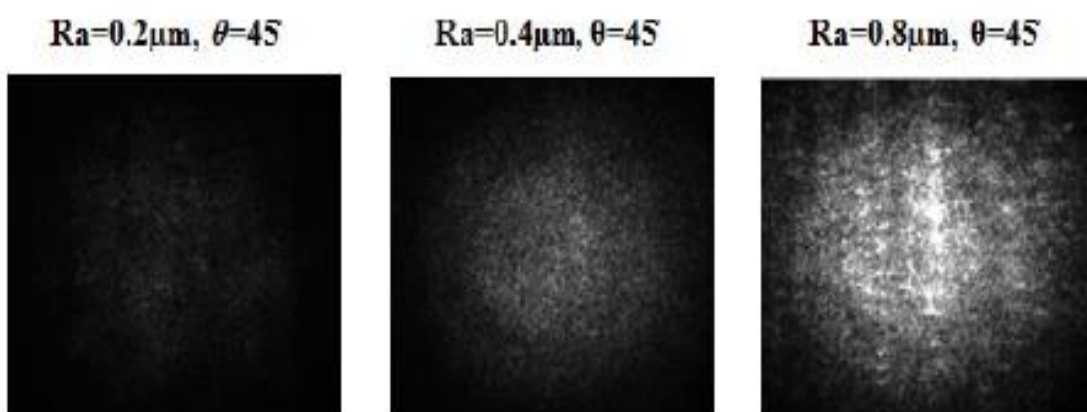
В роботі [9] експериментально досліджено вплив шорсткості поверхні на статистичний розподіл інтенсивності спеклів зображення. Спекл-зображення формується просторово-когерентним світлом на площині зображення об'єкта, що має деяку шорсткість поверхні, і досліджували його статистичні властивості. Встановлено, що контраст плямистості пов'язаний з шорсткістю поверхні. За допомогою цього співвідношення запропоновано новий метод вимірювання шорсткості поверхні.

В роботі [10] обговорюється вимірювання шорсткості за допомогою інтенсивності та контрастності лазерних спеклів. Ця техніка дозволить проводити вимірювання в повному обсязі досліджуваного зразка, що має як шорстку, так і блискучу поверхню. Дані вимірювань на стандартних калібрувальних пластинах представлені з детальною інформацією про точність і надійність вимірювання.



а

б



в

Рис. 1.3. Нормалізована інтенсивність (а), контраст (б) і спекл-зображення (в) поверхні відбиття лазера з різною шорсткістю (R_a).

Таким чином, структурно-морфологічні характеристики матеріалу проявляють вплив на інтенсивність спекл-структур, що може дозволити покращити даний метод.

Тому, одним із завдань даної роботи було дослідження умов проведення тестування зору за допомогою спекл-структур для покращення візуалізації спеклів

1.3 Дефекти зору

1.3.1. Міопія

Міопія – це розповсюджений розлад зору, який полягає у порушенні рефракції ока, а саме пацієнт погано бачить на велику відстань, але добре бачить зблизька. Рефракція – властивість частин ока (рогівки або кришталика) заломлювати промені світла так, щоб вони потрапляли на сітківку.[11]. При міопії, форма очного яблука видозмінюється (витягується) зі збільшенням довжини. Оптична система ока заломлює світло так, що зображення фокусується перед сітківкою, а не на ній, як при еметропії. [12]

Ступені короткозорості:

- Слабка (до 3 дптр.).
- Середня(від 3 до 6 дптр.).
- Висока (від 6 дптр.).

Прогресування короткозорості:

- Стаціонарна (відсутня прогресія).
- Повільно прогресуюча (до 1 дптр. на рік).
- Швидко прогресуюча (більше 1 дптр. на рік). [12]

НОРМАЛЬНИЙ ЗІР ТА МІОПІЯ



Рис. 1.4. Порівняння фокусування променя при міопії та еметропії.[11]

На розвиток міопії впливають генетичні та навколишні фактори. Доведено, якщо в одного з батьків присутня міопія, ймовірність, що вона буде у дитини становить близько 20%, а при міопії в обох батьків шанс збільшується до 45%. Найчастіше короткозорість проявляється у віці від 8 до 12 років і стабілізується близько 20-30 років.[11]. Травми ока та черепно-мозкові також можуть впливати на порушення зору та викликати міопію. Перенавантаження очей суттєво впливають на погіршення зору. Наприклад відсутність хорошого освітлення, близька відстань при читанні або використанні гаджетів. [12]

1.3.2. Гіперметропія

Гіперметропія або далекозорість – це поширений розлад зору при якому людина погано бачить на відстані. При еметропії, тобто нормальному зорі, промені світла фокусуються на сітківці. Це відбувається в наслідок одночасного заломлення променів рогівкою, кришталиком і склоподібним

тілом. Натомість при гіперметропії зображення потрапляє та фокусується поза сітківкою ока. Зсув фокусу відбувається через зменшену довжину очного яблука та недостатню силу заломлення рогівки або кришталіка

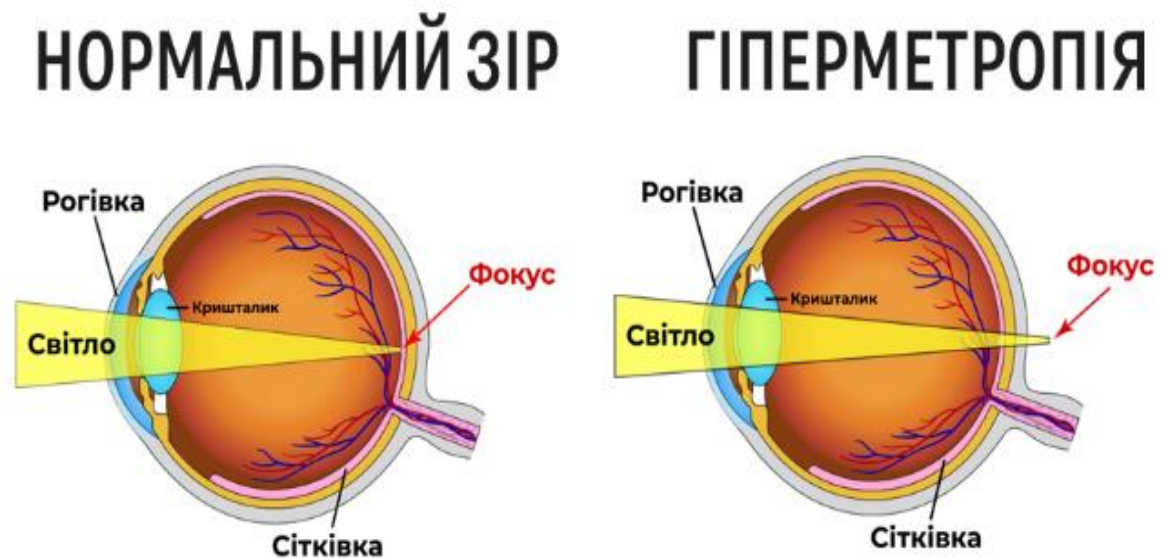


Рис.1.5. Порівняння фокусування променя при гіперметропії та еметропії

Розрізняють три ступені далекозорості. Класифікація гіперметропії наведена Американською асоціацією оптометристів (American Optometric Association):

- Слабкий ступінь (до +2 дптр.)
- Середній ступінь (від 2.25 до 5 дптр.)
- Високий ступінь (від 5.25 дптр.)

Також при високому ступені гіперметропії також можливе погіршення сприйняття на відстані. [13]

1.4 Установки для спостереження спеклів

У роботі [14] описується робота системи електронної спекл-інтерферометрії за допомогою приладу, схема якого зображена на Рис. 1.6. Цей прилад використовується для запису спекл-зображень, які передаються та обробляються на комп'ютері. В даній роботі спеклом вважають безконтактний оптичний метод вимірювання. Перевагами цього методу є висока точність, швидке передавання даних та безконтактність повного поля.

Вимірювальна система технології електронної спекл-інтерферометрії складається з кількох компонентів, а саме лазери, камери CCD, комп'ютери, карти отримання зображення та деякі оптичні елементи. На Рис. 1.6 зображено шлях променя, який використовується в електронній спекл-інтерферометрії, де M - відбивна призма, а BS_1 і BS_2 – спектральні призми. Лазерний промінь накладається на вимірювальний промінь і еталонний промінь після проходження через спектральну призму BS_1 , і вимірювальний промінь випромінюється на вимірюваний об'єкт. Пройшовши через розширювач променя, вимірювальний промінь інтерферує з еталонним променем після проходження відбивної призми BS_2 , а CCD-камера записує інтерференційні смуги, передає інформацію зображення на комп'ютер для обробки та відображає результати тесту в реальному часі.

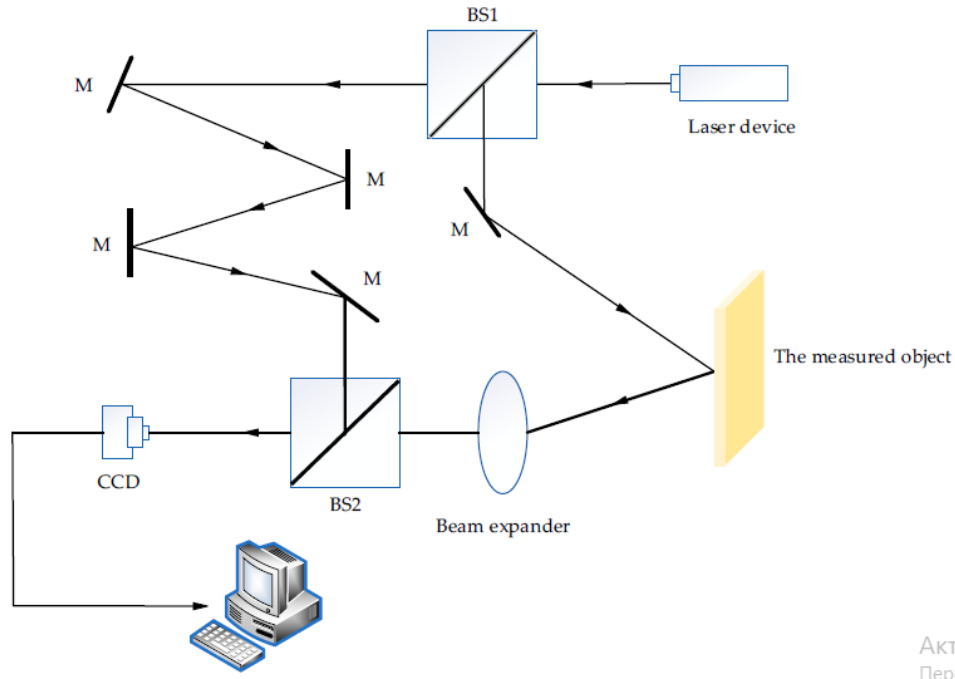


Рис. 1.6. Установка для спостереження спеклів

Записану інформацію зображення спеклу на об'єкті до деформації та після неї можна виразити наступним чином:

$$I_1 = I_0 + I_r + 2\sqrt{I_0 I_r} \cos \theta \quad (1)$$

$$I_2 = I_0 + I_r + 2\sqrt{I_0 I_r} \cos (\theta + \varphi) \quad (2)$$

де I_1 і I_2 - інтенсивність спекл-поля до і після деформації відповідно; I_0 і I_r - інтенсивність двох когерентних пучків відповідно; θ - різниця фаз у спекл-полі на площині об'єкта; φ - зміна різниці фаз, спричинена деформацією об'єкта.

φ можна отримати з рівняння (3):

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} W \quad (3)$$

Віднявши інтенсивності спекл-зображення до та після деформації вимірюваного об'єкта отримуємо:

$$\Delta I = I_1 - I_2 = 4\sqrt{I_0 I_r} \sin \frac{2\theta + \varphi}{2} \sin \frac{\varphi}{2} \quad (4)$$

Зі зміною φ , різниця інтенсивності світла також змінюється, що дозволяє отримувати інформацію про частини спекла, які не видно в певному діапазоні інтенсивності світлового поля, що призводить до чергування яскравих і темних зображень смуг.

Результати вимірювань електронної спекл-інтерферометрії зазвичай являють собою спекл-зображення і фазове зображення, отримане шляхом встановлення фазообертача на еталонному оптичному шляху та використання ступінчастого зсуву фази. Як показано на Рис. 1.7, обидва містять значний шум, а візерунок спеклу представляє чорно-білу структуру смуг, що чергуються світлими та темними, причому щільність і напрямки смуг відображають зміни різниці фаз на поверхні об'єкта. Карта фаз, обернена до електронної спекл-інтерферометрії, обмежує інформацію про фазу по $[-\pi, \pi]$ і відображає її у відтінках сірого. Вдосконалення методів виділення фази електронної спекл-інтерферометрії має вирішальне значення для швидкого й точного аналізу вимірювань.

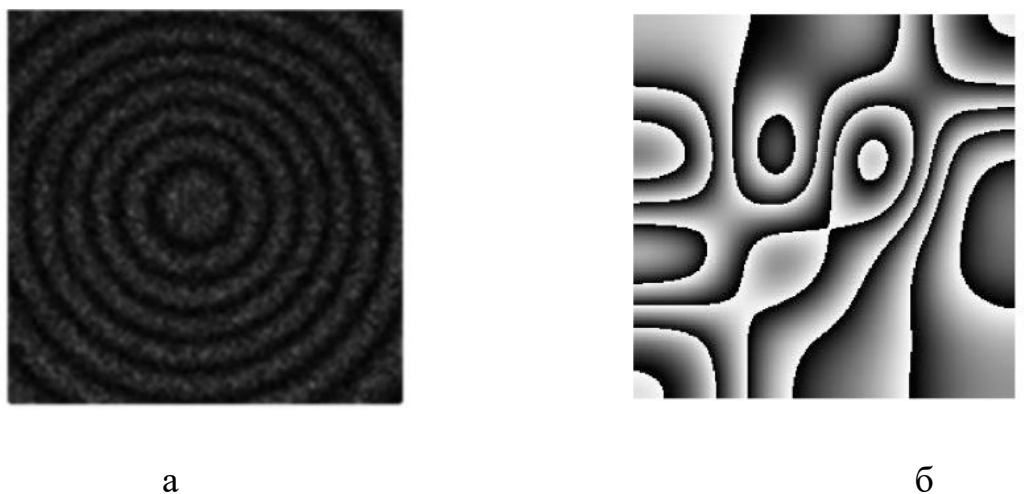


Рис. 1.7. Два результати вимірювання технології ESPI ((а) візерунок смуги ESPI та (б) карта фаз, обернена ESPI).

В роботі [15] розглядають налаштування та створення універсальної оптичної установки для PS-DSPI (phase-shifting digital speckle pattern interferometry) і SC-DSPI (spatial-carrier digital speckle pattern interferometry), що приймає трьох-канальну оптичну інформацію. Кожен канал складається з об'єкта та опорного променя, згенерованим окремим лазером. Компоненти в кожному каналі однакові, але довжини хвилі лазера можуть відрізнятися. Кути падіння, або кути освітлення, трьох променів об'єкта, що потрапляють на об'єкт вимірювання, штучно встановлюються для досягнення оптимальних результатів вимірювання 3D деформації.

Дослідження виконувались за допомогою оптичної установки, зображеної на Рис. 1.8. Враховуючи, що три канали майже однакові, описано будову лише одного каналу, щоб показати процес оптичної інтерференції. Лазерний промінь розділяється дільником променя на об'єктний і опорний пучки. Потім об'єктний промінь потрапляє на вимірювальну мішень після того, як його розширюють негативні лінзи або інші оптичні компоненти чи частини з подібною функцією, такі як об'єктив мікроскопа. Розсіяне світло від об'єкта потрапляє на лінзу для формування зображення, наприклад асферичною лінзу, а потім потрапляє на датчик зображення камери через отвір. Діафрагма працює як регулятор інтенсивності світла в режимі PS-DSPI і фільтр просторової частоти в режимі SC-DSPI. Опорний промінь підключається до оптичного волокна через дзеркало, кероване п'єзоелектричним перетворювачем. Подовження п'єзоелектричного перетворювача (PZT) автоматично контролюється комп'ютером для модуляції оптичного шляху опорного променя, що призводить до фазового зсуву в вимірюванні PS-DSPI. Світло, потрапляє на датчик камери під невеликим кутом між ним і оптичною віссю. Цей кут визначає несучу частоту, ключовий параметр у вимірюванні SC-DSPI. Об'єктний і опорний промені стикаються один з одним на датчику камери, що

призводить до оптичних перешкод. Згенеровані спекл-інтерферограми фіксуються камерою та записуються комп'ютером для подальшої обробки.

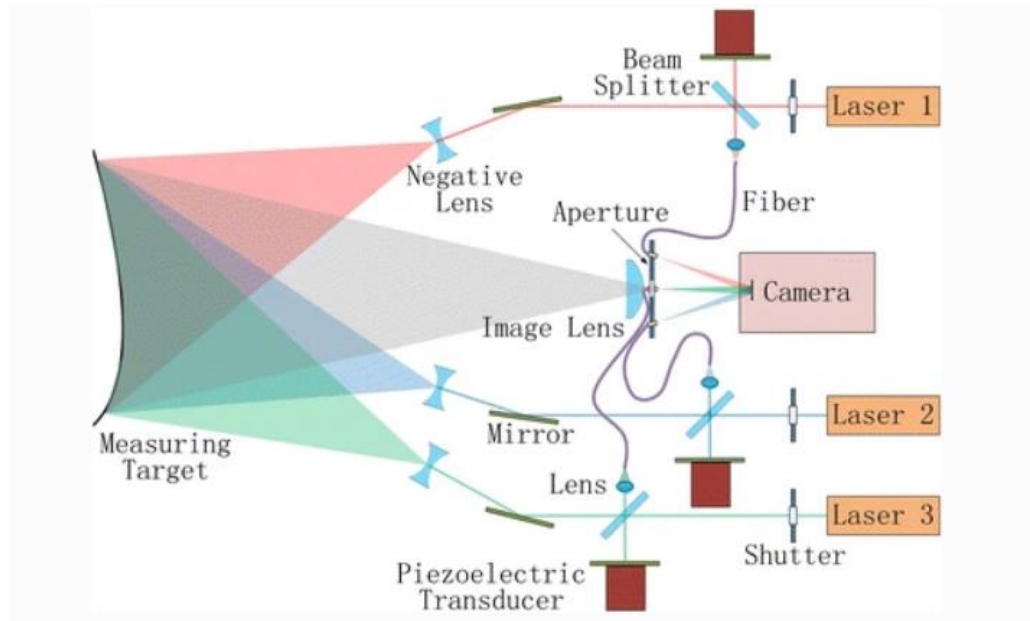


Рис. 1.8. Схема установки для досліджень спект-структур

Інші два канали працюють за тим же принципом, але мають різні кути освітлення та кути падіння опорного променя. Різниця в кутах падіння опорних променів гарантує поділ інтерферометричних сигналів з трьох каналів у частотній області, коли установка працює в режимі SC-DSPI. Різниця в кутах освітлення між трьома каналами призводить до різних коефіцієнтів чутливості зміщення. Комбінація цих коефіцієнтів чутливості до зміщення утворює матрицю чутливості до зміщення, за допомогою якої будується зв'язок між тривимірними деформаціями та інтерферометричними фазами, отриманими за допомогою PS-DSPI та SC-DSPI. Різні комбінації кутів освітлення серед трьох каналів дають різні матриці чутливості до зсуву. Серед цих комбінацій прямокутний розподіл і однорідний розподіл, описані на рис. 1.9, є двома найпростішими й оптимальними схемами. В обох типах величини кутів освітлення рівні, але напрямки різняться.

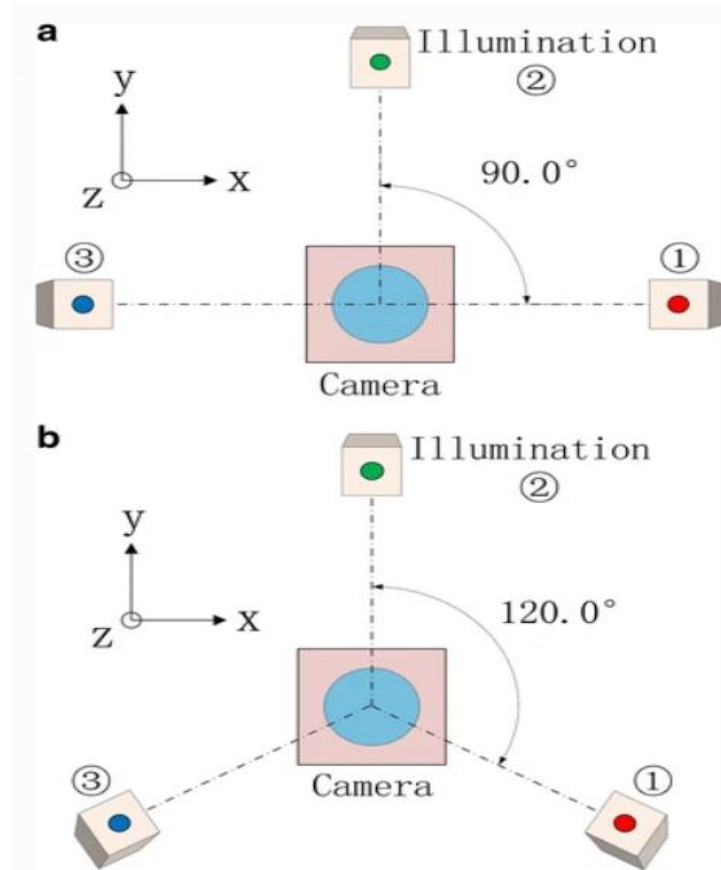


Рис. 1.9. Схематичне зображення використання двох різних підходів.

Коли використовується PS-DSPI для вимірювання 3D-деформацій, три канали вмикаються по черзі, відкриваючи затвори перед кожним лазером (Рис. 1.9). За один раз камера фіксує лише одну інтерферограму, створену парою об'єктного та опорного променів із каналу. Реалізація циклу вимірювань з використанням трьох каналів, у свою чергу, дає три рівняння, які виражають математичне співвідношення між інтерферометричними фазами та інтенсивністю зображення. Коли для вимірювання використовується SC-DSPI, три шторки відкриваються разом, у результаті чого на датчик камери одночасно виходять три пари об'єктних і опорних променів. Кожна пара промінь об'єкта – опорний промінь генерує інтерферограму, що призводить до одночасного запису трьох незалежних інтерферограм. Три інтерферограми пізніше розділяються в частотній області після того, як на них виконується

перетворення Фур'є. Інтерферометричні фази виділяються з розділених інтерферограм після виконання зворотного перетворення Фур'є.

Принцип вимірювання в площині, зображеного на Рис. 1.10, описано в роботі [16]. Промінь, що випромінюється з лазера розширюється просторовим фільтром. Потім світлорозділювач розділяє його на два пучки. Обидва освітлюються на поверхні предмета під однаковим кутом. Розсіяні пучки, які відбиваються від предмета утворюють спекл-інтерферограма та фіксуються кольоровою CCD-камерою.

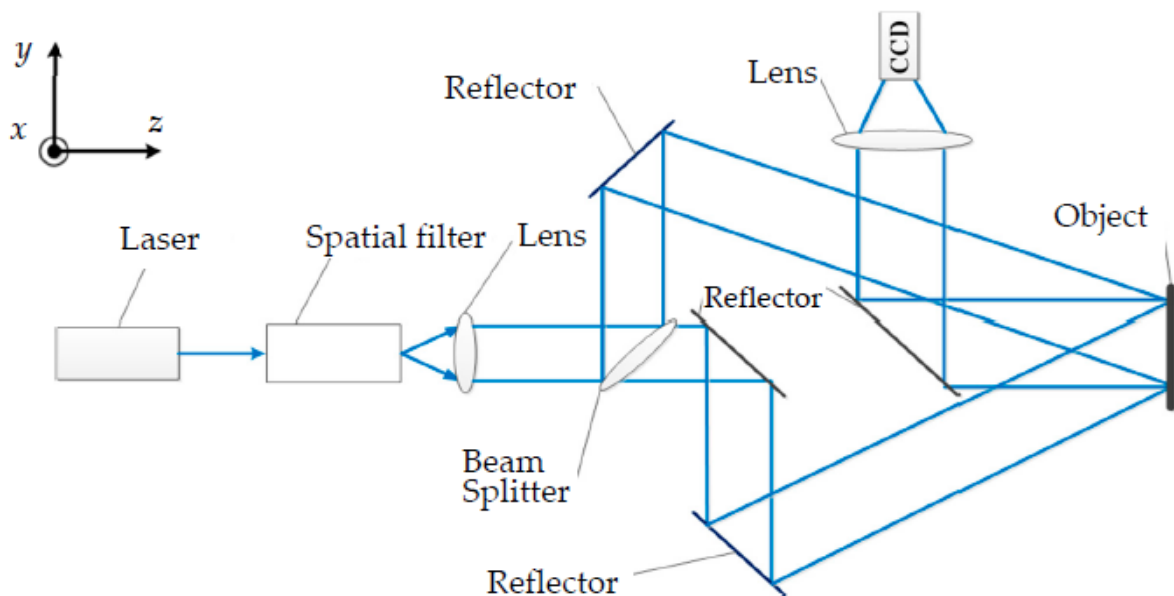


Рис. 1.10. Схема установки .

Коли об'єкт рухається в напрямку x або z , зміна оптичного шляху двох променів залишається незмінною. Таким чином, спекл-інтерферограма залишається незмінною. Якщо предмет переміщується на невелику відстань в напрямку шляху одного променя збільшується $\Delta y(x, z, t) \sin i$, а якщо іншого зменшується $\Delta y(x, z, t) \sin i$. Отримуємо:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta y(x, z, t) \sin i \quad (5)$$

Отже, після руху об'єкта функція інтенсивності спекл-інтерферограми дорівнює:

$$I(x, y, t) = I_0(x, y) \{1 + V \cos[\Phi_0(x, y) + 4\pi \Delta y(x, z, t) \sin i / \lambda]\} \quad (6)$$

Інтенсивність інтерферограм буде змінюватися, якщо об'єкт рухатиметься в напрямку у. Обробляючи ці інтерферограми за допомогою вейвлет-перетворення та алгоритму фазового розгортання, можна отримати зміщення об'єкта.

РОЗДІЛ 2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

- Для аналітичного аналізу залежності параметрів спеклів від регулярних структур використовувалася програма Wolfram Mathematica.
- Спекл-зображення реєструвалися на камеру телефон та цифрову камеру OLYMPUS C-750 UltraZoom.
- Для отримання знімків поверхні плівок використовувався мікроскоп KONUS 5606 BIDREX-3 зі збільшенням у 200 разів.
- Для модифікації поверхні поліетиленових плівок використано діоксид титану (TiO_2 , DegussaP25) і оксиду цинку (ZnO), модифікованого Al (1% ваг.).
- Лазер з довжиною хвилі при 687,93 нм і 530 нм були використанні.
- Для теоретичної частини цієї роботи використовувалася програма Wolfram Mathematica, з такими параметрами:

L- лазер, S - спекли, IS - відносна інтенсивність спеклів до інтенсивності лазера, X, Y, Z - координати, 1... - індекс координати, r - відстань, k - модуль хвильового вектора $= 2\pi/\lambda$, де λ - довжина хвилі, dL - відстань між центрами розсіювання, dS - відстань між точками спостереження спеклів, dist - дистанція між площинами екрана та спостереження,

Розмірність всіх параметрів у метрах.

$$\lambda = 0.555 \cdot 10^{-6};$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda};$$

$$\text{dist} = 1;$$

$$dL = 0.001;$$

$$dS = .;$$

$$LX1 = 0.5 \cdot dL;$$

$$LX2 = -0.5 \cdot dL;$$

$$SX = dS;$$

$$r1 = \sqrt{(dS - LX1)^2 + \text{dist}^2};$$

$$r2 = \sqrt{(dS - LX2)^2 + \text{dist}^2};$$

$$IS = (\text{Cos}[k * r1] + \text{Cos}[k * r2])^2$$

(*IS інтенсивність "спеклів"- "дифракційних структур" на відстані "dist"

за координатою x за умови рівних амплітуд для хвиль від двох центрів розсіювання на відстані $\pm 0,5dL$ розташованих симетрично *)

Схема експериментальної установки зображена на Рис. 2.1, де лазерний промінь проходив через лінзу до поверхні досліджуваного матеріалу.

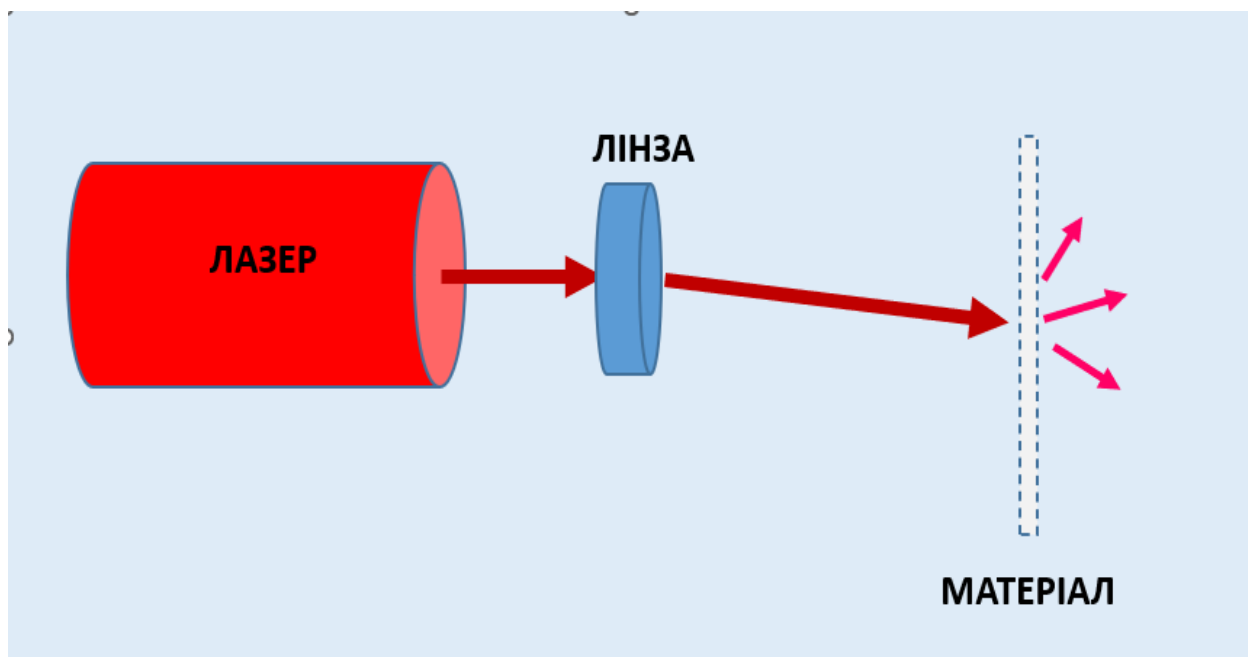
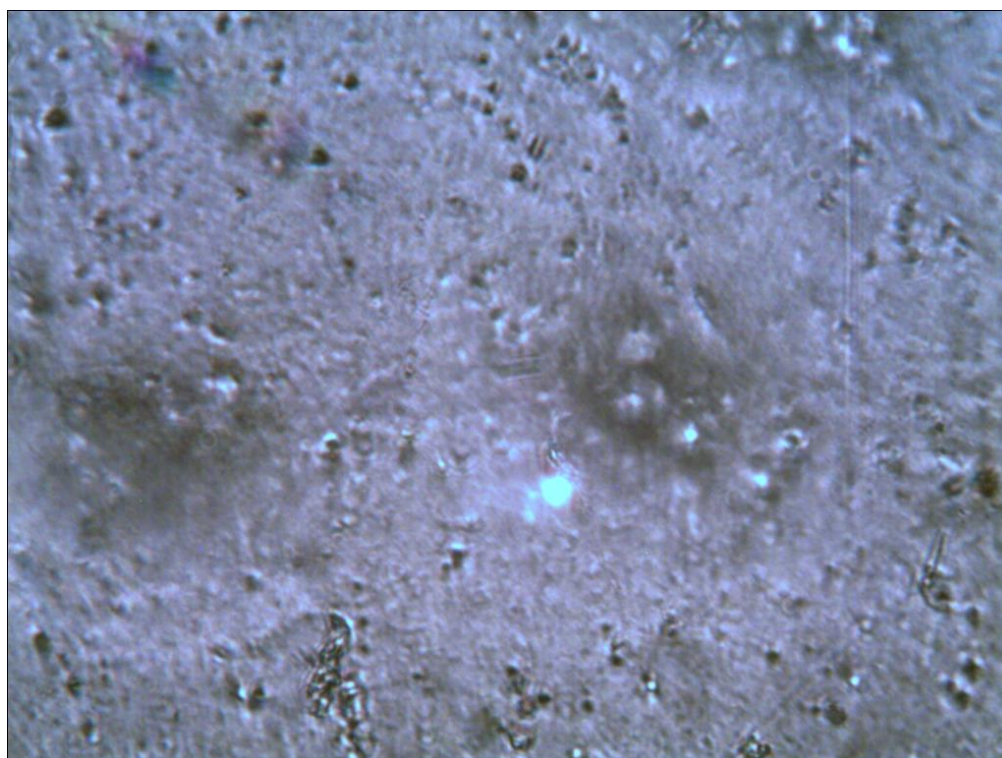
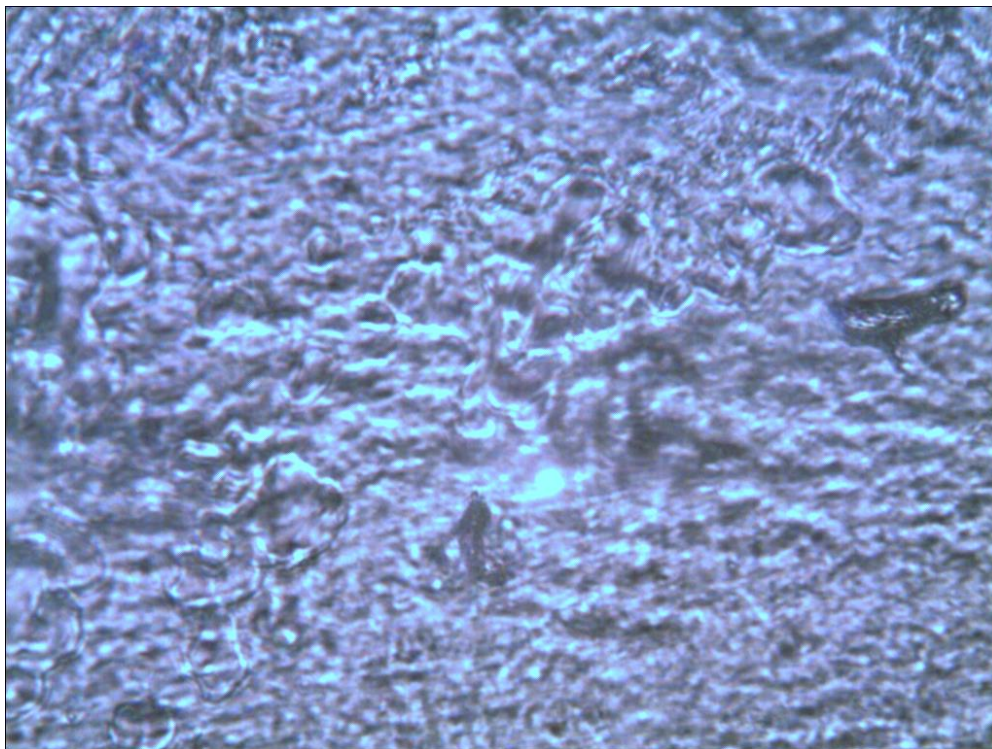


Рис. 2.1. Схема установки для дослідження спекл-структур.

В якості поверхонь використовувалися дві поліетиленові плівки, мікрофотографії яких зображені на Рис. 2.2 а, б.



а



б

Рис. 2.2. Знімки робочих поверхонь

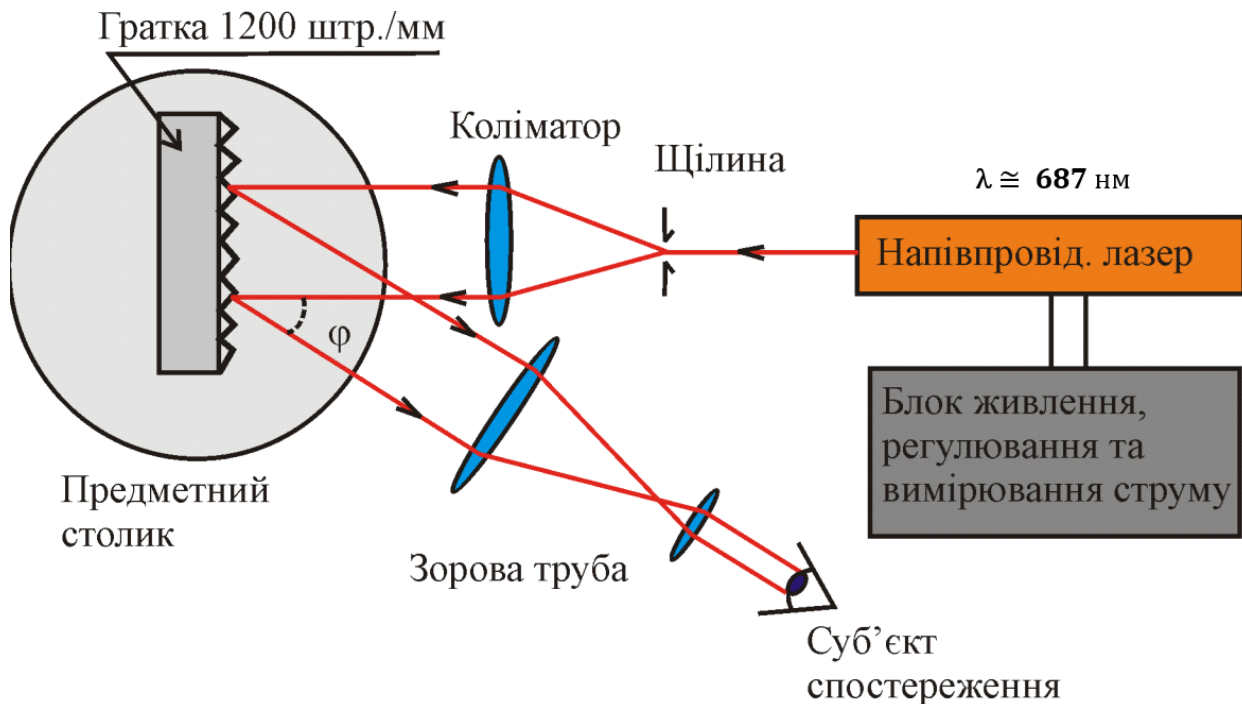
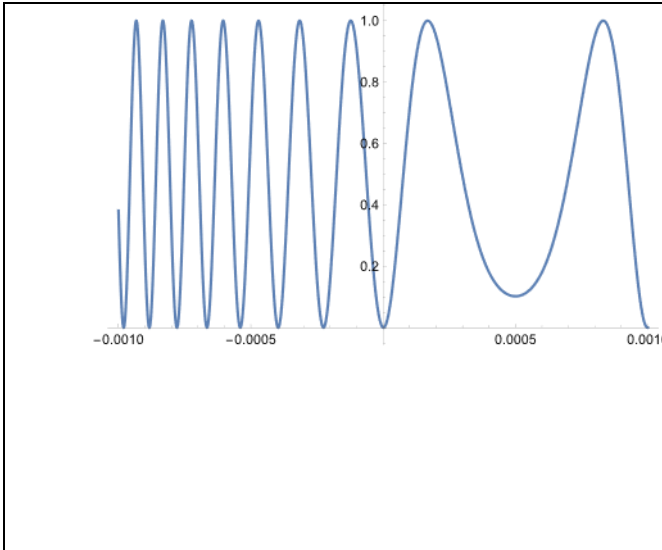


Рис. 2.3. Схема експериментальної установки (взята з методичних вказівок «СПЕКТР ГЕНЕРАЦІЇ НАПІВПРОВІДНИКОВОГО ЛАЗЕРА НА ПОДВІЙНІЙ ГЕТЕРОСТРУКТУРІ ТА ЙОГО ЗАЛЕЖНІСТЬ ВІД СТРУМУ ЖИВЛЕННЯ»).

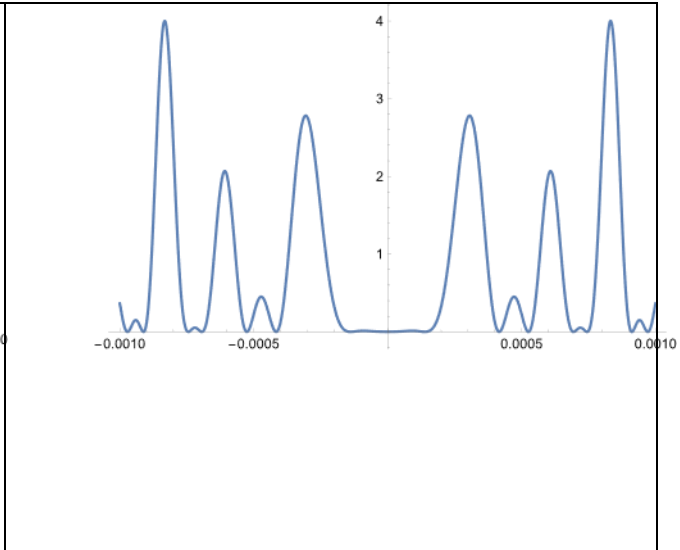
РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

3.1 Аналітичний аналіз залежності параметрів спеклів від регулярних структур.

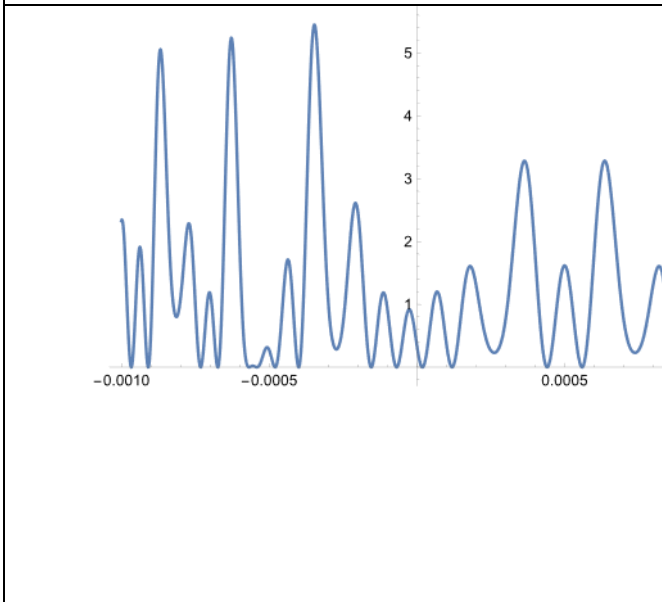
Аналіз залежності відносної інтенсивності спеклів до інтенсивності лазера (I_S) від відстані між точками спостереження спеклів (d_S) для різної кількості точок (r) (Рис. 3.1) показав, що при збільшенні кількості точок інтенсивність "спеклів"- "дифракційних структур" від двох центрів розсіювання збільшується.



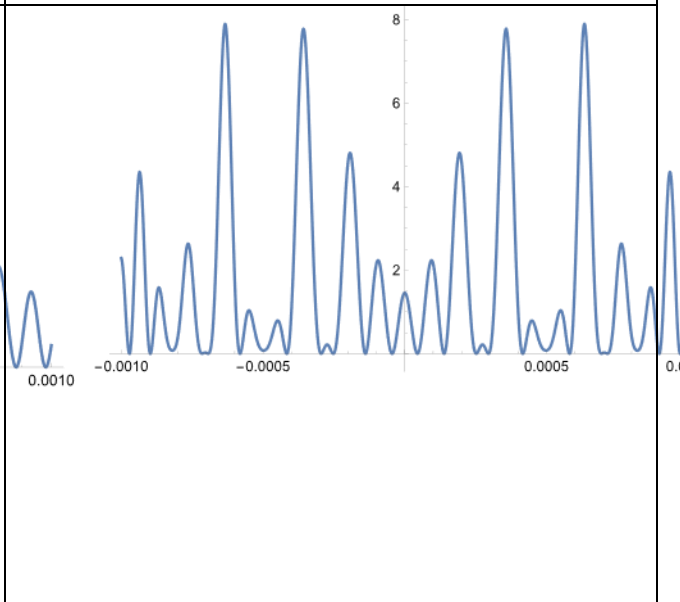
r1



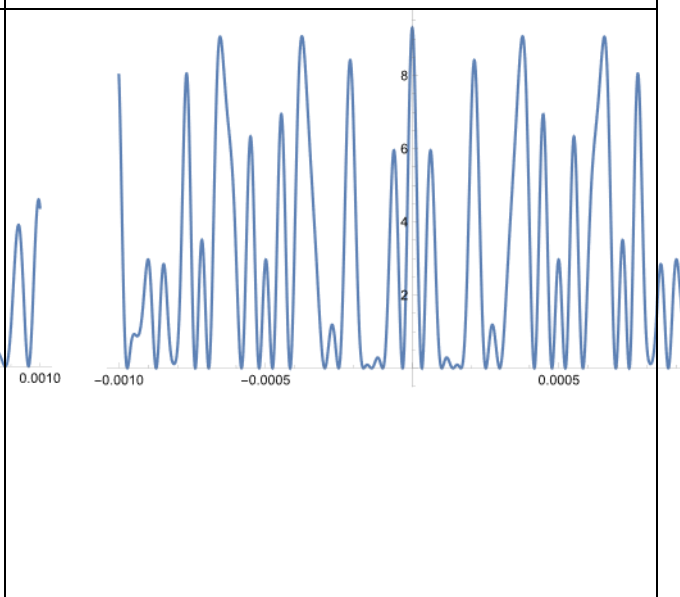
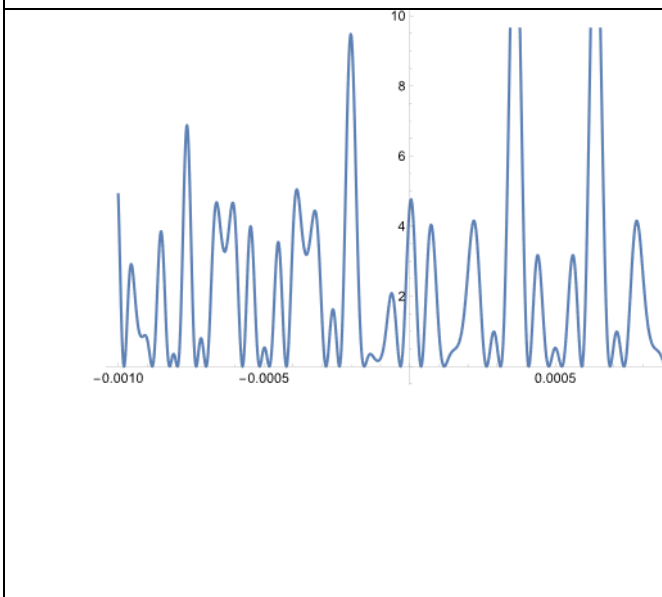
r1,2



r1-3



r1-4



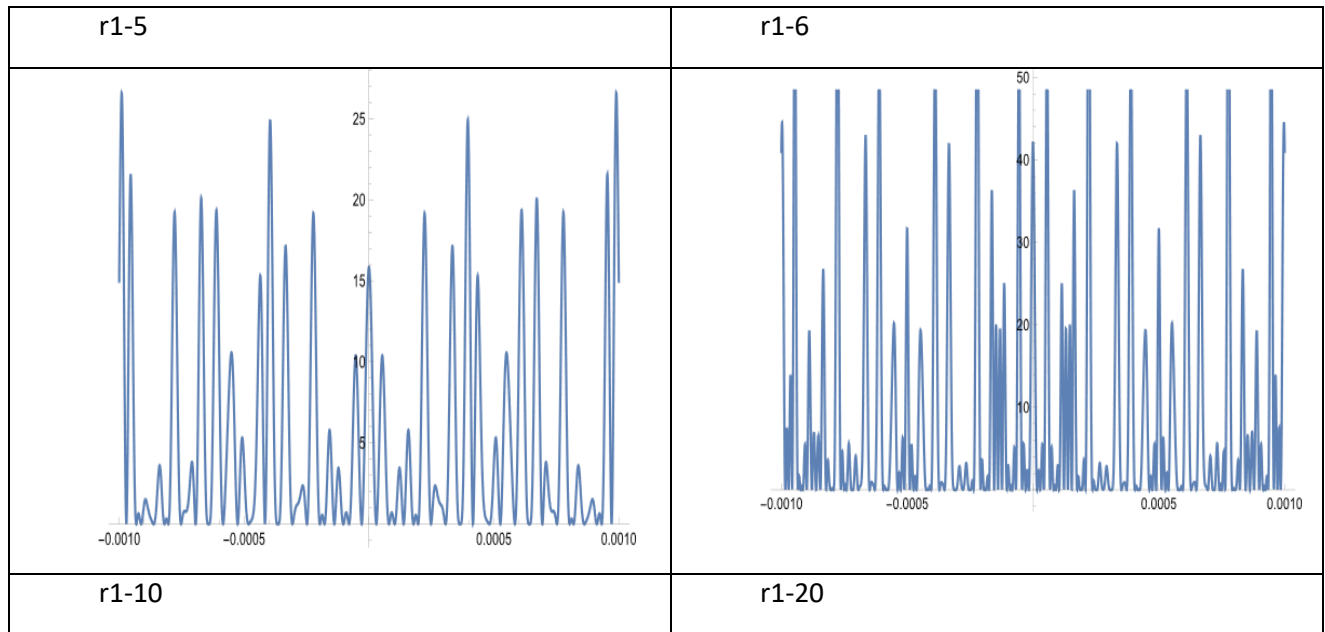


Рис. 3.1. Залежність відносної інтенсивності спеклів до інтенсивності лазера (I_S) від відстані між точками спостереження спеклів (d_S) для різної кількості точок (r).

Найвища інтенсивність спостерігається для r_{20} . При умові, коли кількість точок з кожним кроком збільшується на одну точку, кількість піків обох центрів розсіювання є нерівною, а інтенсивність спеклів лівої частини є вища за праву за виключенням r_{1-5} і r_{1-11} . При умові, коли кількість точок з кожним кроком збільшується на дві точки, то кількість і інтенсивність спеклів обох центрів розсіювання є однаковою (сторони є симетричні). У випадку присутності лише однієї точки, інтенсивність «спеклів» однакова, але їх кількість на лівій частині значно більше ніж на правій.

Як видно з Рис. 3.2, найвищий розмір спеклів спостерігається при найменшій кількості точок (r_1 та $r_{1,2}$). Різке зниження розміру спостерігається при збільшенні точок від 3 до 5. Не прослідковується залежність розміру спеклів при більшій кількості точок.

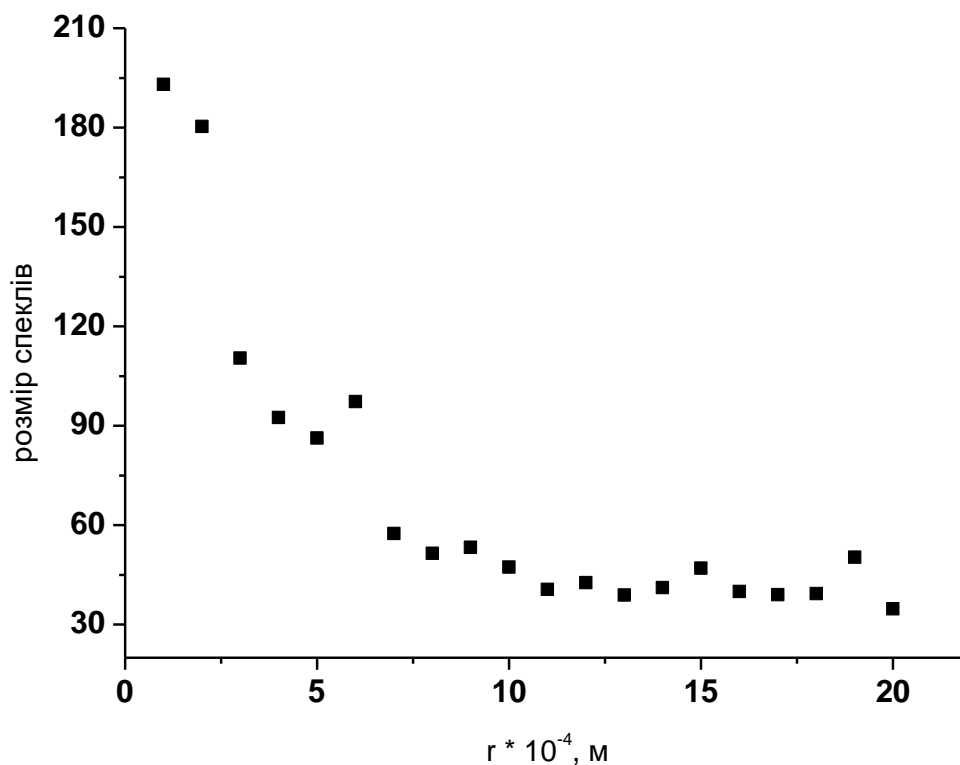
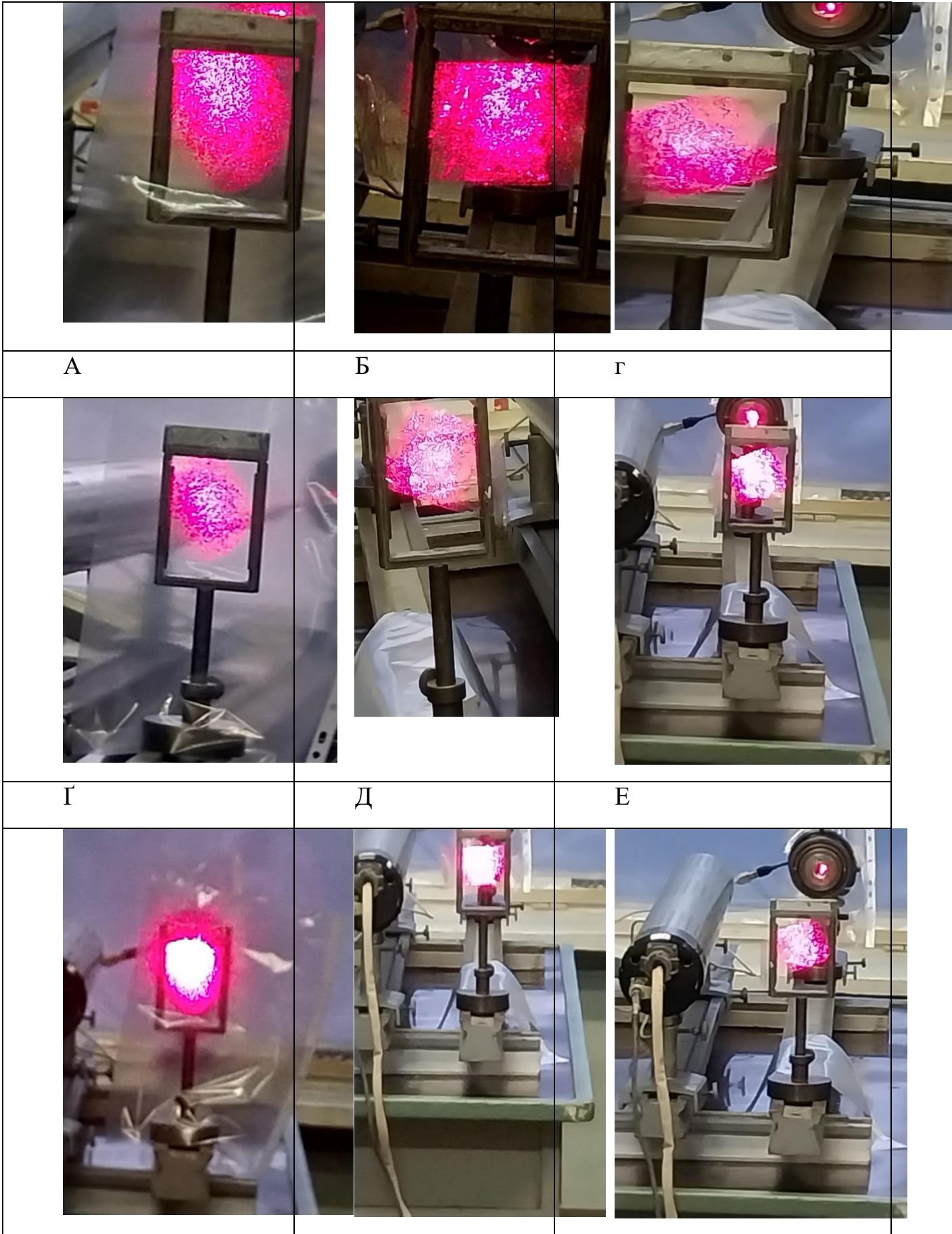


Рис. 3.2. Залежність розміру спеклів від кількості точок.

3.2 Дослідження прозорих екранів у схемі на пропускання світла.

На поверхню, яка зображена на Рис. 2.2(a) наносили два зразки порошку діоксид титану (TiO_2 , DegussaP25) і оксиду цинку (ZnO), модифікованого Al (1% ваг.) Порошки були нанесені на поліетиленову поверхню та закріплені скотчем. Щоб визначити вплив саме порошоків, в якості контрольного експерименту використовували поліетилен.

Контроль	TiO_2	ZnO
----------	----------------	--------------



Є	Ж	З
---	---	---

Рис. 3.3. Фотографії спекл-структур на різних відстаннях (30 см, 1 м, 1.5 м) при дії лазера на поверхню різних матеріалів: поліетилен (а, г, є), поліетилен + TiO₂ (б, д, ж), поліетилен + AlZnO (в, е, з).

Спостерігається вплив хімічного складу матеріалу на вигляд спекл-структур. Для більш чіткого спекл-зображення потрібна оптимальна відстань для спостереження.

Дослідження залежності відстані спостереження точок спекл зображень в залежності від діоптрії представлено в таблиці. Дослідження виконувалися для пацієнта з міопією при відхиленнях зору -4(ліве око), -3.5(праве око).

Для спостереження спекл-структури відбиваюча поверхня була статичною, в свою чергу пацієнт безперервно здійснював рухи головою. Зупинка руху спекл структури відбувалася при відстаннях L_1 і L_2 . Одержані результати показали, що при збільшенні діоптрій, відстані L_1 і L_2 є більші у порівнянні з меншими діоптіями.

Під час роботи з поверхнею (Рис 2.2, б) досліджували вплив відстані спостереження, кута спостереження, а також зміщення фокусу об'єктива на залежність розмірів та структури спекл-структур. Досліди проводили з застосуванням «зеленого» лазера з довжиною хвилі 530 нм. Спостереження проводилися на трьох відстанях L : 30 см, 1 м та 1,5 м. Кути для спостереження $\alpha = 45^\circ$ справа та зліва. Під час перевірки залежності від кута спостереження проводили без зміни відстані ($L = 30$ см). Додатково спостерігали спекли через декілька шарів досліджуваного матеріалу (від 1 до 6 шарів)

Як видно з Рис. 3.4, збільшення відстані від поверхні матеріалу приводить до меншого діаметру зображення.

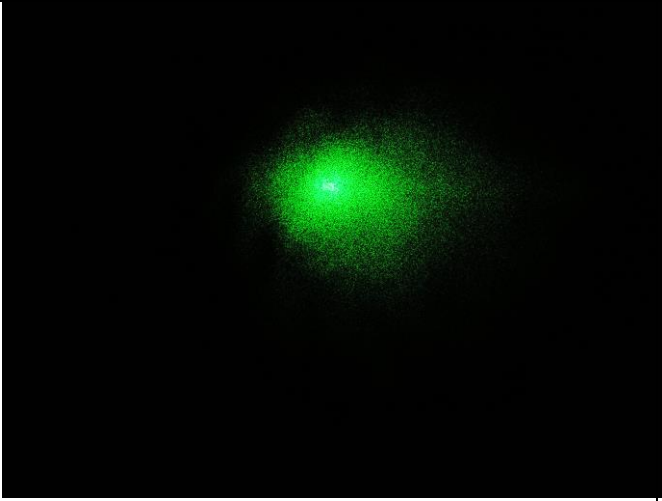

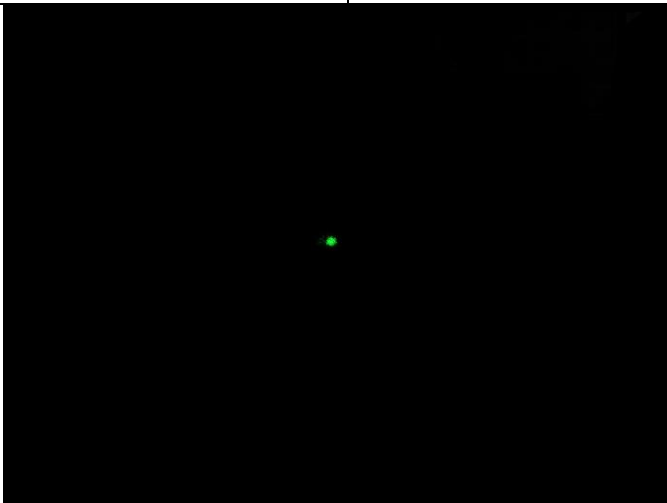
	
$L=30\text{см},$ $d = 3.24 \text{ пікселі} = 0.0854 \text{ см}$	$L = 1 \text{ м},$ $d = 3.15 \text{ пікселі} = 0.083 \text{ см}$
	
$L = 1.5 \text{ м}, d = 3 \text{ пікселі} = 0.079 \text{ см}$	

Рис. 3.4. Зображення спекл-структур на різних відстанях.

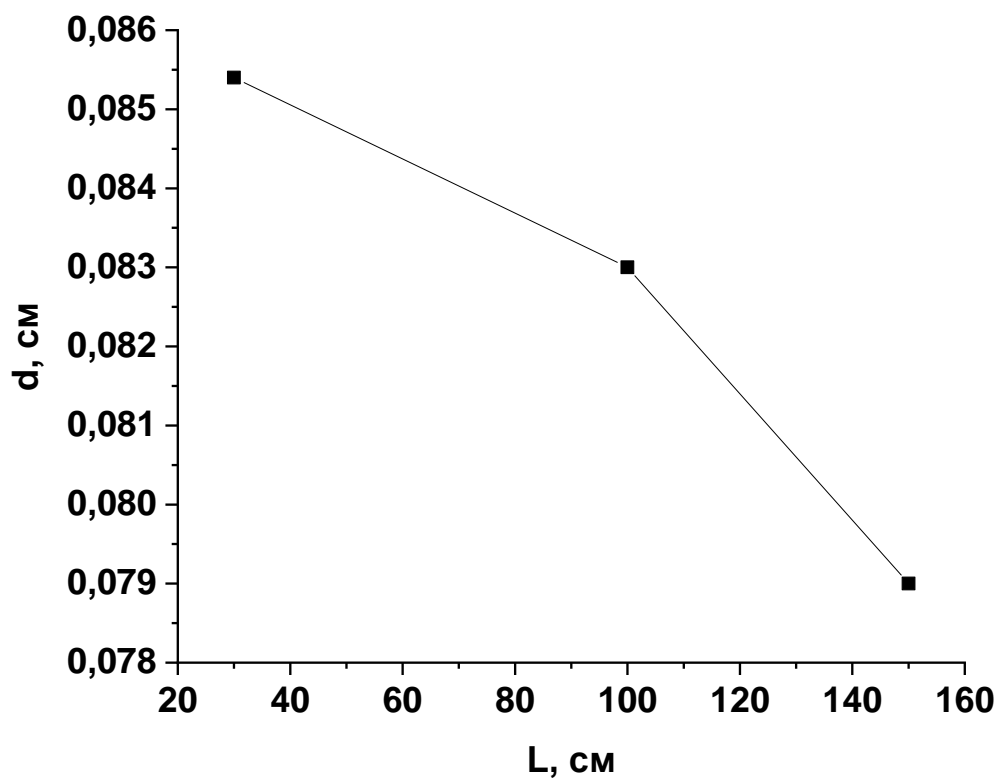


Рис 3.5 Залежність діаметр спеклів в залежності від відстані спостереження

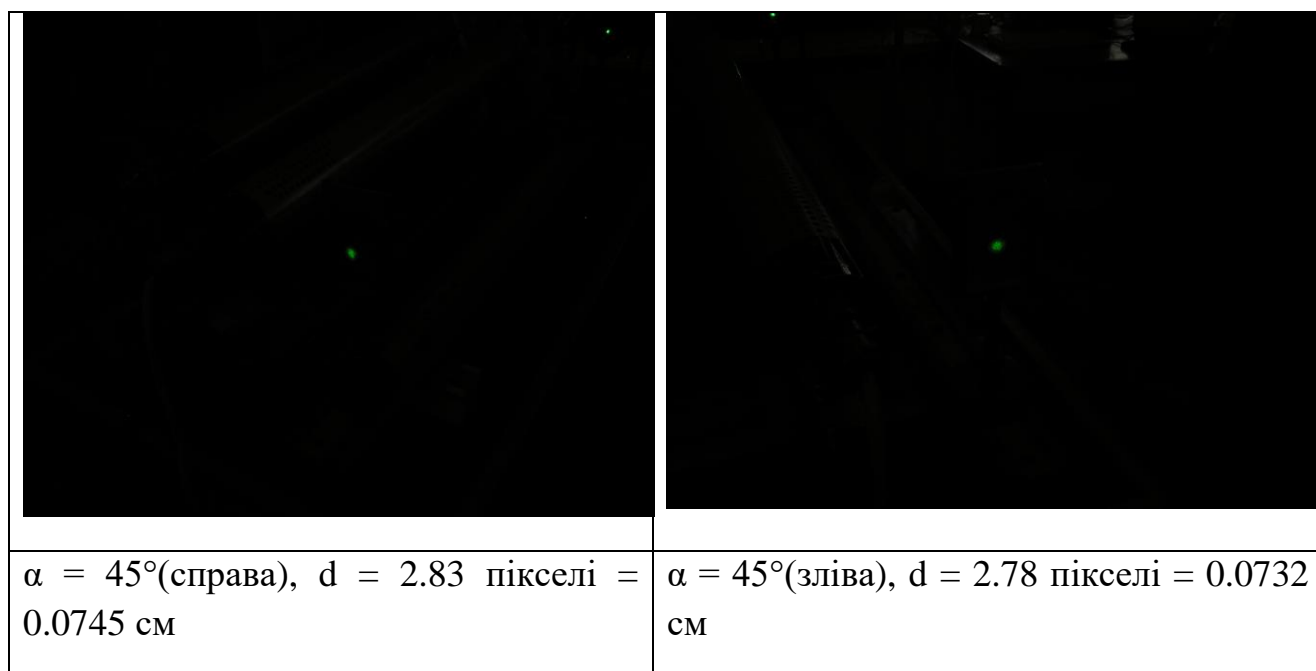


Рис. 3.6.Зображення спекл-структур при різних сторонах одержання.

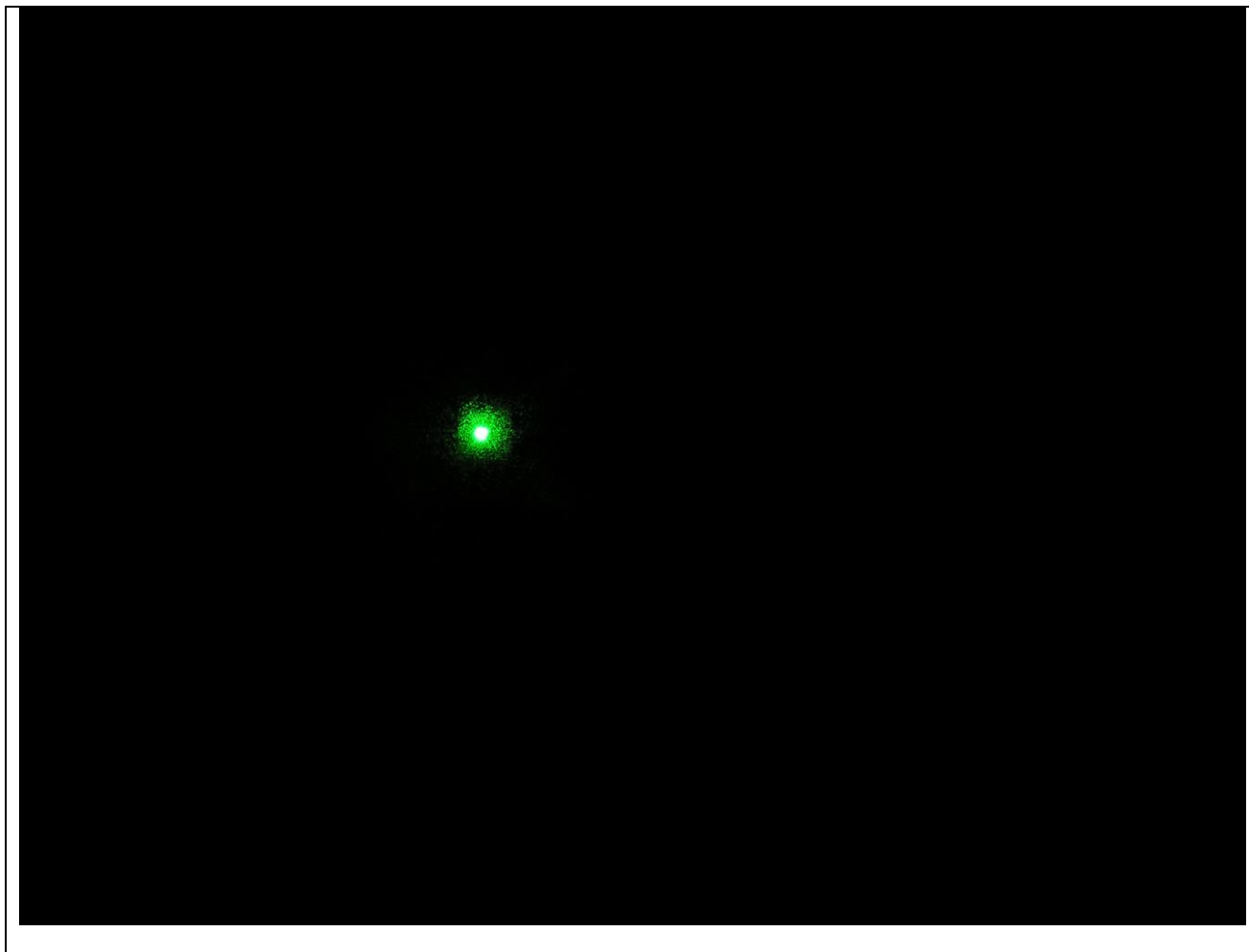
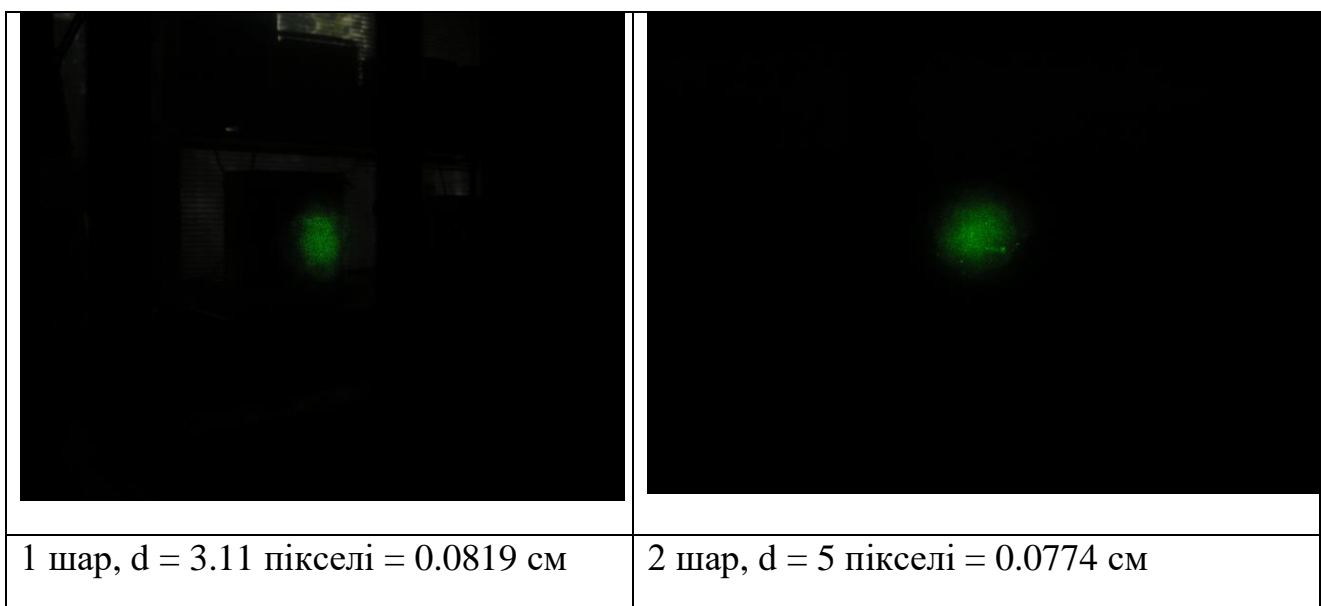


Рис. 3.7. Зображення спекл-структури при фокусуванні на інший об'єкт на відстані 1.5 м, $d = 3.16$ пікселі = 0.0832 см.




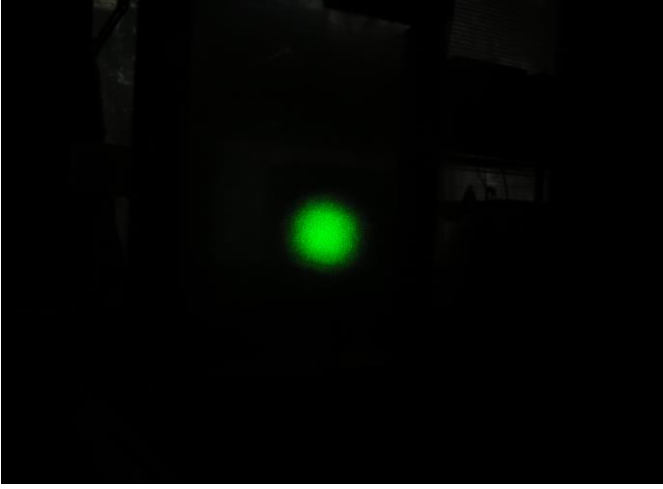
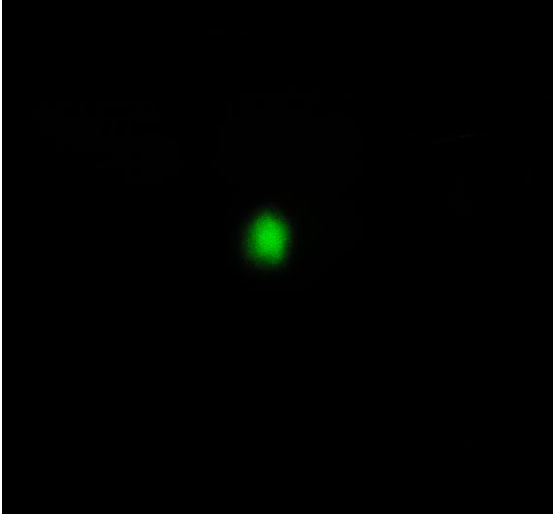

	
3 шар, $d = 4.24$ пікселі = 0.0701 см	4 шар, $d = 2.83$ пікселі = 0.0653 см
	
5 шар, $d = 2$ пікселі = 0.0557 см	6 шар, $d = 1.96$ пікселі = 0.0516 см

Рис. 3.8. Зображення спекл-структур при різних кількостях шарів матеріалу.

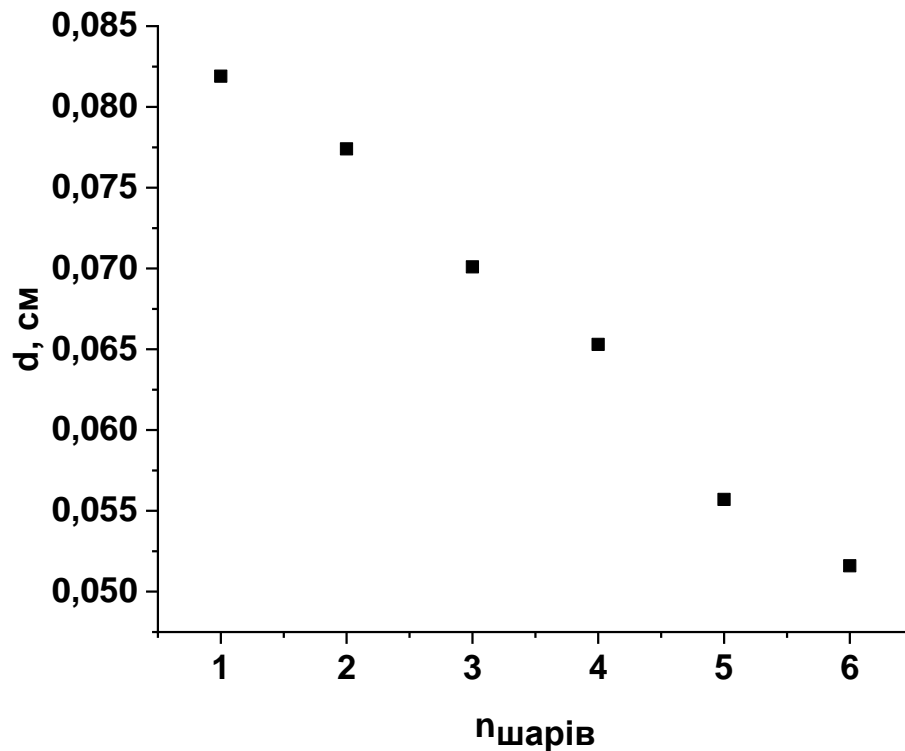


Рис. 3.9. Залежність діаметру спеклів від кількості шарів досліджуваного матеріалу

3.3 Визначення діапазону акомодатії

Для визначення діапазону акомодатії ока використовувався червоний лазер, довжина хвилі якого визначалася за допомогою формули $\lambda = d \cdot \sin \varphi$, де d – період ґратки та дорівнює для використаної ґратки 1200 штрх/мм, φ – кут першого порядку дифракції, який визначався за допомогою ганіометра. Схема експериментальної установки зображена на Рис. 2.3.

Отриманий кут $\varphi = 34^\circ 58' 38'' = 0,6105$ рад.

$\lambda = 687,93$ нм.

Також була розрахована ширина спектру випромінювання лазера ($\Delta \nu$). Вона дорівнює 0.885 нм або 8.85 Å (ангстрем).

+0,25	-0,25
$L_1 = 4\text{см}$	$L_1 = 2\text{см}$
$L_2 = 30\text{см}$	$L_2 = 13\text{см}$

+0,75	-0,75
$L_1 = 4,5\text{см}$ $L_2 = 32\text{см}$	$L_1 = 3\text{см}$ $L_2 = 15\text{см}$
+1	-1
$L_1 = 6,5\text{см}$ $L_2 = 34\text{см}$	$L_1 = 3\text{см}$ $L_2 = 17\text{см}$
+2	-2
$L_1 = 10\text{см}$ $L_2 = 38\text{см}$	$L_1 = 4\text{см}$ $L_2 = 19\text{см}$
+3	-3
$L_1 = 12\text{см}$ $L_2 = 40\text{см}$	$L_1 = 5\text{см}$ $L_2 = 21\text{см}$
+5	-5
$L_1 = 14\text{см}$ $L_2 = 43\text{см}$	$L_1 = 5\text{см}$ $L_2 = 21\text{см}$

Таблиця 1. Визначення відстані від спекул-зображення в залежності від діоптрії.

З отриманих фокусних відстаней L_1 та L_2 був розрахований діапазон акомодатії ока. На Рис. 17 та Рис. 18 зображена залежність L_1 та L_2 від додатніх та від'ємних значень діоптрій.

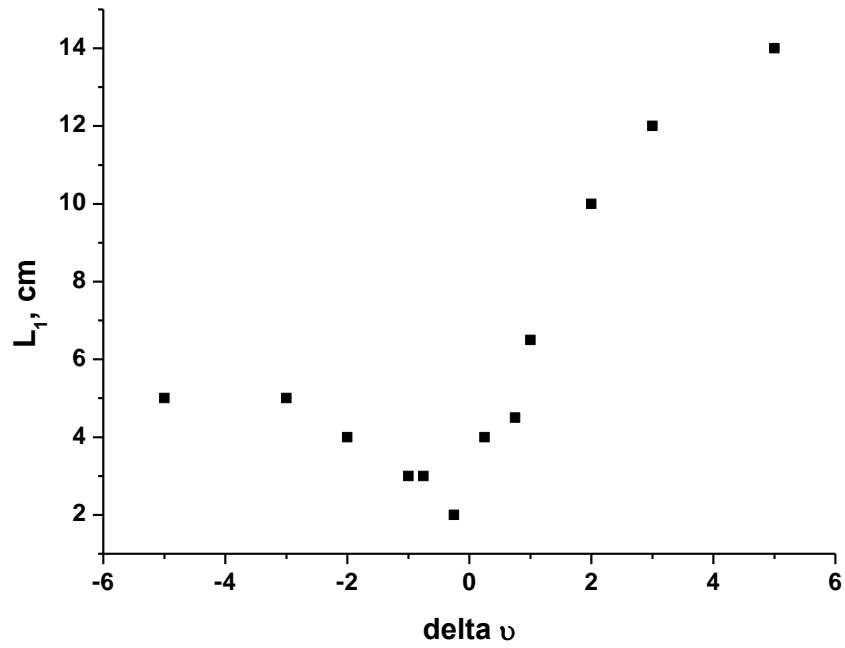


Рис. 3.10. Залежність відстані L_1 від діоптрії

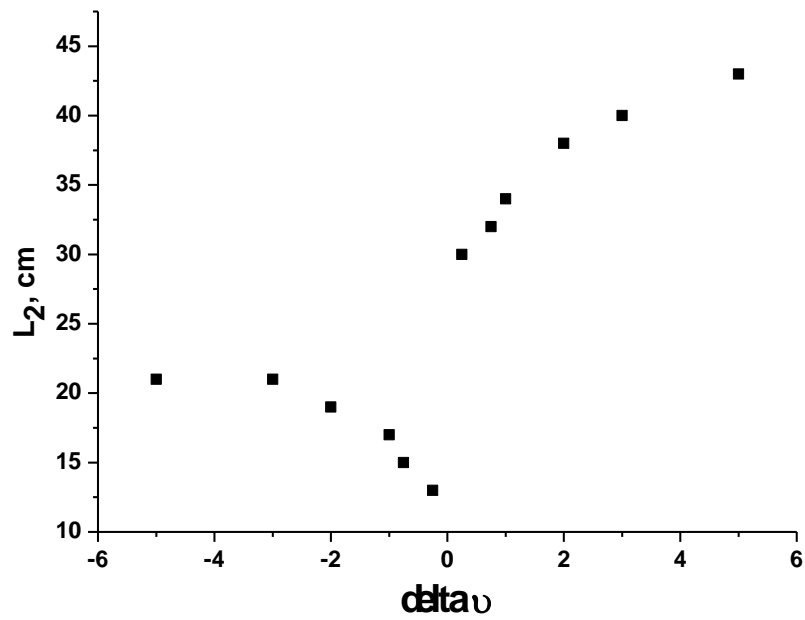


Рис. 3.11. Залежність відстані L_2 від діоптрії

ВИСНОВКИ

1. Аналітичний аналіз спеклів від регулярних структур показав їх перспективність, оскільки появляється можливість керувати розмірами спеклів.
2. Прозорі екрани є більш функціональними, особливо в комбінації з відбиваючими.
3. Для визначення діапазону акомодації рекомендується використовувати прозорі екрани для наближення до спекл-зображення

D0%BE%D1%80%D1%96%D1%81%D1%82%D1%8C-%D1%89%D0%BE-%D1%86%D0%B5-%D1%82%D0%B0-%D1%8F%D0%BA%D0%B5/

12. <https://zrenie.dp.ua/uk/services/likuvannia-korotkozorosti-miopii>
13. <https://luxoptica.ua/ua/articles/zabolevaniya-glaz/dalnozorkost-gipermetropiya/>
14. Jiang, W.; Ren, T.; Fu, Q. Deep Learning in the Phase Extraction of Electronic // Speckle Pattern Interferometry. *Electronics*. – 2024. - Vol. 13. – P. 418.
15. Wu, S., Dong, M., Fang, Y. *et al.* Universal optical setup for phase-shifting and spatial-carrier digital speckle pattern interferometry. // *J. Eur. Opt. Soc.-Rapid Publ.* - 2016. - Vol. 12. - P. 14
16. Qin J., Gao Z., Wang X., Yang S. Three-Dimensional Continuous Displacement Measurement with Temporal Speckle Pattern Interferometry // *Sensors*. – 2016. – Vol. 16(12) - P. 2020.