

Лабораторна робота №11

ЗАПИС І ВІДТВОРЕННЯ ГОЛОГРАФІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Мета роботи: вивчити особливості голографічного запису та відтворення зображень; ознайомитися з голографічними схемами; відтворити голограми й одержати зображення предметів.

Обладнання: голографічне обладнання, стандартний набір голограм.

1. Основні поняття голографії

Голографія – це запис і зчитування інформації про об'єкти за допомогою когерентного світла. Дещо точніше, *голографія* – це сукупність технологій запису і відтворення об'ємних зображень предметів. Термін «голографія» походить від давньогрецького ὅλος – «повний» і γράφω – «писати». Буквально це означає «повний запис». Голографічне зображення, на відміну від фотографічного, містить найповнішу інформацію про об'єкт. Зокрема, і найперше, голографічне зображення тривимірне. Причиною є те, що воно містить інформацію і про амплітуду світлової хвилі, яка йде від предмета, і про її фазу. А саме: інформація про амплітуду предметної хвилі, записана на голограмі, відповідає контрастові інтерференційних смуг, а інформація про фазу відповідає формі, взаємному розміщенню та просторовій частоті цих смуг.

Гологра́ма – це інтерференційна картина, утворена двома когерентними пучками світла і зареєстрована на світлочутливому матеріалі, наприклад на фотоплівці, фотопапері або сучасніших матеріалах. Один зі світлових пучків іде безпосередньо від джерела світла і його називають *опорним пучком*. Другий пучок відбивається або розсіюється від предмета, освітленого тим же джерелом. Його називають *предметним пучком*. Типовим джерелом когерентного світла є, звісно, лазер.

Отже, для *запису голограми* потрібно, аби на світлочутливий матеріал одночасно потрапили та «записалися» два когерентні світлові пучки: предметний, який іде від об'єкта, та опорний, що надходить безпосередньо від лазера. Світло обох пучків інтерферує, створюючи на голограмі деяку просторову картину дрібних темних і світлих смуг – інтерференційну картину. Цю картину необхідно якось записати на голограмі. Найпростішим та історично першим способом такого запису були спричинені дією світла зміни почорніння світлочутливого шару на фотографічній пластині. Зазначимо, що буквального «зображення» предмета на голограмі немає. Якщо ми глянемо на записану голограму в звичайному денному світлі, то побачимо щось на зразок рівномірно засвіченого фотографічного негативу. Лише під мікроскопом на голограмі можна помітити дещо неперіодичні темні та світлі смужки або плямки неправильної форми, які відповідають записаній картині інтерференції опорного та предметного пучків.

Наявність темних і світлих смужок, які чергують одна одну, означає, що голограма фактично є своєрідною *дифракційною ґраткою*, на якій потім може дифрагувати світло, яке впаде на неї. Її основна відмінність від звичайних дифракційних ґраток – це відсутність строгої періодичності.

Для *відтворення голограми* (одержання зображення предмета) її освітлюють тим же лазерним пучком, який було використано для одержання голограми. Поняття

«той же» означає незмінні колір і напрямок поширення лазерного пучка. За цих умов лазерне світло, пройшовши крізь голограму, дифрагує на ґратці, одержаній на стадії запису. За теорією, спостерігач побачить деяку дифракційну картину. Якщо голограму помістити в положення, в якому вона перебувала під час запису, то дифракційна картина виглядатиме так, наче предмет і далі перебуває на тому ж місці та в такому ж положенні, в якому він був на стадії запису. Тобто ми дістанемо 3D-зображення предмета. Чим вища якість записаної голограми, тим різючіша схожість голографічного зображення предмета із самим предметом.

2. Запис і відтворення голограми

Найпростішу схему *запису голограми* зображено на рис. 1. Розширювач 3 перетворює промінь від джерела когерентного світла (лазера 4) так, щоб цей промінь освітлював увесь предмет 1, голограму якого ми записуємо. Частина цього розширеного променя відбивається від напівпрозорого дзеркала 2 і формує т. зв. *опорну хвилю*, яка падає на голограму 5 (вертикальні стрілки донизу на рис. 1). Інша частина променя потрапляє на предмет, який розсіює та відбиває світло в напрямку до голограми 5, – утворюється *предметна хвиля* (жирна коса стрілка на рис. 1).

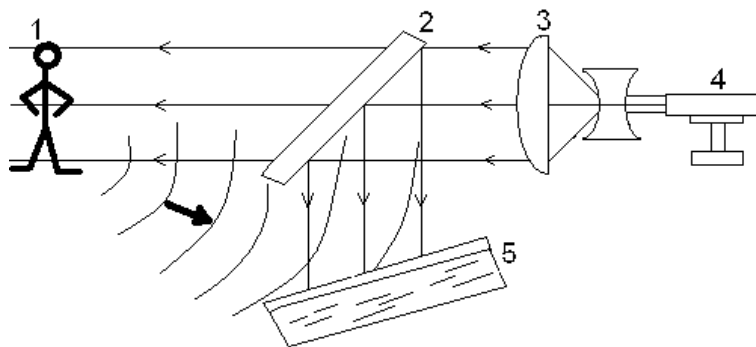


Рис. 1. Найпростіша схема запису голограми: 1 – об’єкт; 2 – напівпрозоре дзеркало; 3 – розширювач променя; 4 – лазер; 5 – світлочутлива пластинка.

Опорна та предметна хвилі когерентні, а тому інтерферують. Інтерференційна картина записується на світлочутливу пластинку 5 (голограму). *Голограму відтворюють*, ставлячи її на те ж місце, де вона була під час запису, та освітлюючи її опорною хвилею. Внаслідок дифракції опорної хвилі на квазіперіодичній дифракційній ґратці, якою є голограма, виникає точне об’ємне зображення предмета 1, хоча самого предмета немає.

Отже, для розуміння процесів запису та відтворення голограми потрібно знати два відомі оптичні явища – *інтерференцію* та *дифракцію*. Голограму записують завдяки інтерференції опорної та предметної хвиль, а на стадії відтворення ключову роль відіграє дифракція опорної хвилі на дифракційній ґратці, записаній на голограмі.

3. Деякі історичні відомості про голографію

Першу голограму в 1947 р одержав угорський і британський фізик Деніс Габор. Він використав ртутну лампу, зі спектра якої виділив вузьку смугу довжин хвиль. Звісно, ця голограма мала низьку якість, адже випромінювання ртутної лампи

не було високо когерентним. Отже, до часів винайдення лазерів голографія практично не розвивалася. Бурхливий розвиток голографічної галузі розпочався в 60-х роках ХХ століття завдяки працям Е. Лейта, Ю. Упатнієкса, С. Бентона, Л. Кроса, Ю. Денисюка та ін. Цей розвиток триває й досі. Людство усвідомило важливість голографії зі значним спізненням. Аж у 1971 р. Д. Габор був удостоєний Нобелівської премії з фізики «за винахід і розроблення голографічного методу».

4. Основні види голограм

1. Якщо голограму реєструють на поверхні деякого світлочутливого матеріалу, то одержують т. зв. *плоску (двовимірну)* голограму. Якщо ж голограму реєструють у деякому об'ємі світлочутливого матеріалу, то одержують *об'ємну (тривимірну)* голограму. Ці два альтернативні випадки розрізняють, порівнюючи товщину h світлочутливого матеріалу та просторовий період d інтерференційної картини, утвореної на голограмі, а саме: плоский запис здійснюють за умови, коли товщина h менша або схожа за величиною до d ($h < d$ або $h \sim d$). Для об'ємних же голограм є наявна протилежна нерівність: $h \gg d$.

Звернемо увагу, що обидва типи голограм – плоскі та об'ємні – завжди дають *об'ємне зображення* предмета! Дещо складніший і дорожчий запис об'ємних голограм виправданий тим, що такі голограми не обов'язково відтворювати лазерним світлом. Їх можна відтворити навіть у білому світлі, напрямок поширення якого збігається з напрямком опорного пучка. Це неабияк практична зручність.

2. Залежно від діапазону електромагнітного випромінювання, використаного для запису голограм, розрізняють *оптичні*, на яких реєструють видиме світло, а також різноманітні види *неоптичних* голограм (*радіоголограми, рентгенівські, інфрачервоні, ультрафіолетові, акустичні та ультразвуківі*).

Голограми називають *оптичними*, підкреслюючи, що їхній запис і відтворення засновані на оптичних явищах. Проте голограму можна одержати й на комп'ютері, розрахувавши її структуру та зобразивши результати розрахунку у вигляді чорно-білого або й кольорового транспаранта. Одержимо т. зв. *цифрові* голограми, перспективи майбутніх практичних використань яких надзвичайно широкі.

3. За способом запису голограм у світлочутливому середовищі розрізняють *амплітудні* та *фазові* голограми. При записі *амплітудної* голограми інтерференційну картину реєструють у вигляді змін коефіцієнтів пропускання або відбивання світлочутливого матеріалу. Іншими словами, різні ділянки голограми по-різному пропускають або відбивають світло, тобто по-різному впливають на амплітуду світла. При відтворенні зображення предмета такі голограми фактично модулюють амплітуду освітлювальної хвилі в просторі.

Водночас при записі *фазової* голограми інтерференційна картина фіксується у вигляді зміни фізичного рельєфу голограми або зміни показника заломлення світлочутливого матеріалу. При цьому голограма може бути навіть цілком прозорою! Коли зображення предмета відтворюють за допомогою такої голограми, то відбувається модуляція фази освітлювальної хвилі. Нарешті, на сьогодні відомі такі світлочут-

ливі матеріали, голограми на яких можна записати шляхом реєстрування анізотропії коефіцієнта поглинання. Це т. зв. *поляризаційні* голограми.

4. Голограму можна зберігати тривалий час, а процеси її запису та відновлення можуть бути помітно розділені в часі. Такі голограми називають *статичними*. Якщо ж голограма наявна лише доти, поки опорна та предметна хвилі опромінюють світлочутливий матеріал, а зображення предмета відтворюють практично одночасно з процесом запису, то таку голограму називають *динамічною*. Такі голограми потрібні, наприклад, у голографічних кіно або телебаченні.

5. Голограми також класифікують за методами формування предметної та опорної хвиль. Залежно від взаємного розміщення світлочутливого середовища, предмета й джерела опорної хвилі, розрізняють декілька схем запису голограм. Це *однопроменева* схема (схема Габора), *двопроменева* схема (схема Лейта та Упатнієкса), схема із зустрічними хвилями (схема Денисюка), а також схема запису т. зв. голограм Фур'є. В однопроменевій схемі частина світлового пучка від лазера розсіюється предметом і формує предметну хвилю, а друга частина пучка, яка пройшла поза предметом, утворює опорну хвилю. У двохвильовій схемі опорну хвилю формують окремо, а кут між предметним і опорним променями в точках падіння світла на голограму ненульовий. Нарешті, в схемі Денисюка опорна та предметна хвилі падають на світлочутливий шар з різних боків, так що кут між цими світловими пучками близький до 180° .

6. Голограми поділяють і за способами запису інтерференційної картини. Оскільки при освітленні описаної голограми опорною хвилею відновлена предметна хвиля поширюється назустріч освітлювальному пучку, то такі голограми називають *відбивними голограмами*. Іншими голограмами є *голограми пропускання*, які можна одержати за схемами Габора або Лейта та Упатнієкса. У записі за схемою Фур'є предмет і джерело опорної хвилі розміщені на однаковій відстані від голограми. Зокрема, якщо голограма перебуває на значній (або й безмежній) відстані від об'єкта, її називають голограмою *Фраунгофера*.

7. На ранніх стадіях розвитку голографії використовували виключно *нереверсивні* світлочутливі матеріали, тому говорять про *нереверсивні голограми*. Зміни їхніх оптичних параметрів під дією випромінювання (наприклад, почорніння класичної фотопластинки) незворотні в часі. В останні десятиліття голограми часто створюють на т. зв. *реверсивних* світлочутливих матеріалах. Зміни параметрів (наприклад, почорніння) *реверсивних голограм* зворотні, тобто їх можна «відкотити» деякими зовнішніми діями на голограму. Велетенською перевагою реверсивних голограм, порівняно з нереверсивними, є можливість повторних і навіть багатократних записів голограм на тому ж світлочутливому матеріалі, наприклад для запису інформації або в кінематографії.

5. Дифракційна ефективність голограми

Важливою характеристикою голограми є її *дифракційна ефективність* η . Вона дорівнює відношенню інтенсивності дифрагованого світла I_d , яке формує голографічне зображення предмета, до інтенсивності I_0 світла, яке падає на голограму:

$$\eta = I_d/I_0.$$

Дифракційна ефективність – це своєрідний коефіцієнт корисної дії голограми, адже, попри різкість і контрастність голографічного зображення, іншим визначальним фактором його «подібності» до предмета є яскравість зображення на фоні інших предметів, які бачить спостерігач. Цей фактор визначається саме параметром η .

Дифракційна ефективність може змінюватися від гранично можливого максимального значення 100% (для об'ємних фазових голограм) до кількох відсотків для багатьох амплітудних або поляризаційних голограм.

6. Деякі застосування голографії

Голографію широко використовують у різних сферах людської діяльності, зокрема, в медицині, науці, техніці, мистецтві, бізнесі та рекламі. Так, у разі презентації продукції використовують голографічні 3D-зображення, які наче зависають у повітрі (рис. 2) або голографічні зображення всередині т. зв. 3D-пірамід (рис. 3). Цікаві сучасні приклади використання голограм включають навіть голографічні 3D-зображення промовців.



Рис. 2. Голографічне зображення предмета, який «висить» у повітрі.



Рис. 3. Голографічні 3D-піраміди для рекламного демонстрування продукції, логотипів компаній тощо. 3D-піраміда дає змогу розглядати предмети з різних боків так, наче вони виставлені на вітрині. Голографічні зображення можуть рухатися та обертатися всередині піраміди.

Голограми використовують для створення спеціальних ефектів у деяких фільмах-блокбастерах. Є навіть окремий напрямок кіноіндустрії – *голографічне кіно*. Це виробництво і демонстрування фільмів із кольоровими, повністю об'ємними зображенням об'єктів, створеними голографічними методами. Через технічні складнощі голографічне кіно наразі ще не набуло масового поширення. Для свого розвитку воно потребує нових наукових розробок.

Багато унікальних предметів мистецтва нині мають *голографічні «копії»*. Їх використовують під час лекцій, конференцій та інших заходів.

Голографічні товарні знаки (наклейки, етикетки – див. рис. 4) – це надійний і недорогий спосіб маркування виробів, який є підтвердженням їх оригінальності і захистом від фальсифікації. Голографічні знаки також використовують для захисту документів, пропусків, персональних банківських пластикових карт тощо.



Рис. 4. Голографічні етикетки.

Одним із напрямів практичної голографії є *голографічна інтерферометрія*, яка виявляє деформації, тріщини, зсуви та інші дефекти різних конструкцій. В основі методу лежить принцип порівняння двох хвиль або хвильових фронтів, один із яких (або й обидва) записаний та відтворений за голографічним методом. Пояснимо це докладніше.

Уявімо, що ми створили голограму деякого недеформованого (еталонного) предмета. Нехай і предмет, і його записана голограма залишилися на своїх місцях. Тоді при відтворенні голограми позаду неї будуть одночасно поширюватися дві світлові хвилі – одну з них розсіює предмет-еталон, а друга дифрагує на голограмі. Ці хвилі когерентні, а тому інтерферуватимуть між собою. Зазначимо той неочевидний, але строгий факт, що дифрагована хвиля зміщена на 180° за фазою, порівняно із хвилею від предмета. Оскільки еталон і його голографічне зображення є точними копіями одне одного, то хвилі ідеально загасять одна одну – і ми спостерігатимемо повну темряву!

Нехай тепер предмет зазнав деяких деформацій після того, як з нього записали голограму, тому zdeформований предмет і голографічне зображення еталонного предмета не тотожні. Знову освітлюючи одночасно предмет і голограму еталона, замість повної темряви ми одержимо деяку інтерференційну картину – картину темних і світлих смуг, форма, розміри та взаємне розміщення яких сигналізуватимуть нам про наявність і точні характеристики деформацій, які зазнав предмет, порівняно з еталоном. Важливо, що картина інтерференції дає змогу зареєструвати навіть надзвичайно малі відхилення предмета від еталона, наприклад локальне зміщення поверхні предмета на мікроскопічні відстані ~ 10 нм. Зрозуміло, що випадок значних деформацій тут не надто цікавий і практичний, оскільки такі деформації помітні й без голографічної інтерферометрії. Сфери практичного застосування описаного методу охоплюють, зокрема, масове промислове виробництво радіодеталей, плат, мікросхем і т. ін. Тут кожен з виготовлених мікросхем щоразу перевіряють на відповідність з еталонним зображенням.

Зазначимо, що замість деформованого предмета теж можна використати його голограму. Її записують уже після того, як еталон зазнав фізичного впливу, який спричинив появу деформацій. З іншого боку, якщо з якихось причин складно або

неможливо створити оптичну голограму еталонного предмета, то замість неї використовують цифрову голограму еталона, розраховану за допомогою комп'ютера.

Окрім вирішення проблем виявлення дефектів конструкцій, голографічна інтерферометрія дає також змогу досліджувати різні швидкоплинні (динамічні) процеси – політ кулі чи ракети, поведінку авто під час краш-тесту тощо.

Є й інші галузі, в яких застосовують голографічні методи. Зокрема, на основі голографії можна створити різноманітні логічні елементи з високою швидкодією, системи оперативної пам'яті, голографічні лазери, коректори аберацій оптичних приладів, зонні пластини, голографічні дифракційні ґратки тощо.

Передбачають, що *голографічна пам'ять* переважно базуватиметься на *об'ємному записі* даних. Це порівняно нова галузь, істотно відмінна за принципами від звичайного запису (тобто *поверхневого* або *2D-запису*), який масово використовують, наприклад у жорстких дисках або оптичних дисках. Відомо, що в об'ємному світлочутливому середовищі з незначними розмірами можна записати велетенський обсяг інформації. Припустимо, що технічно здійсненним є запис одного біта інформації на просторовій ділянці з розмірами $\sim 1 \text{ мкм}^3$. Тоді в кубіку з об'ємом 1 см^3 поміститься $\sim 10^{12} \text{ б} = 1 \text{ Тб}$ інформації. Це означає граничну щільність об'ємного запису даних порядку 1 Тб/см^3 . Звісно, що носії інформації з такою ємністю нині не дивина, проте їхні розміри істотно більші за 1 см^3 . Зазначимо, що на сьогодні фактично вже досягнуто щільності об'ємного запису даних, вищі за 10 Гб/см^3 . Такий голографічний запис можна здійснити завдяки змінам кута падіння лазерного променя, його довжини хвилі, фази опорного пучка, просторовим змінам точки входу інформаційного й опорного променів у середовище запису при його зсуві чи обертанні, а також за допомогою різних комбінацій описаних способів.

Крім рекордної густини запису інформації, голографічна пам'ять додатково дає змогу використовувати мільйони одночасних потоків запису або зчитування інформації, тим самим підвищуючи *швидкість запису та зчитування* у стільки ж разів.

7. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Ознайомитися з поняттями, принципами і методами голографії. Пояснити, як відбуваються запис і відтворення голограм. Ознайомитися з установкою для відтворення голограм (рис. 5).

2. Встановити різні стандартні голограми та відтворити на них зображення.

3. Сфотографувати голографічні зображення і подати їх у звіті.

4. Описати поділ голограм на типи за різними класифікаційними ознаками.

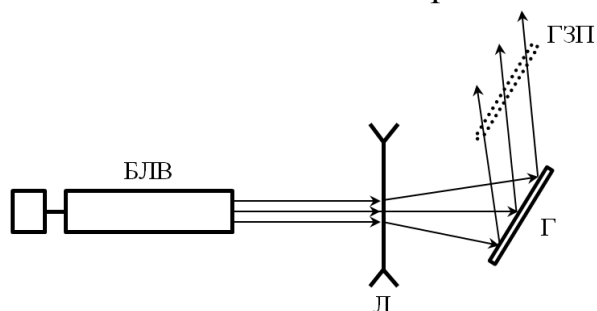


Рис. 5. Схема установки для відтворення голограм: БЛВ – блок лазерного випромінювання (лазер і блок живлення); Л – розсіювальна лінза; Г – голограма; ГЗП – голографічне зображення предмета.

5. Пояснити принципи об'ємного голографічного запису інформації.