

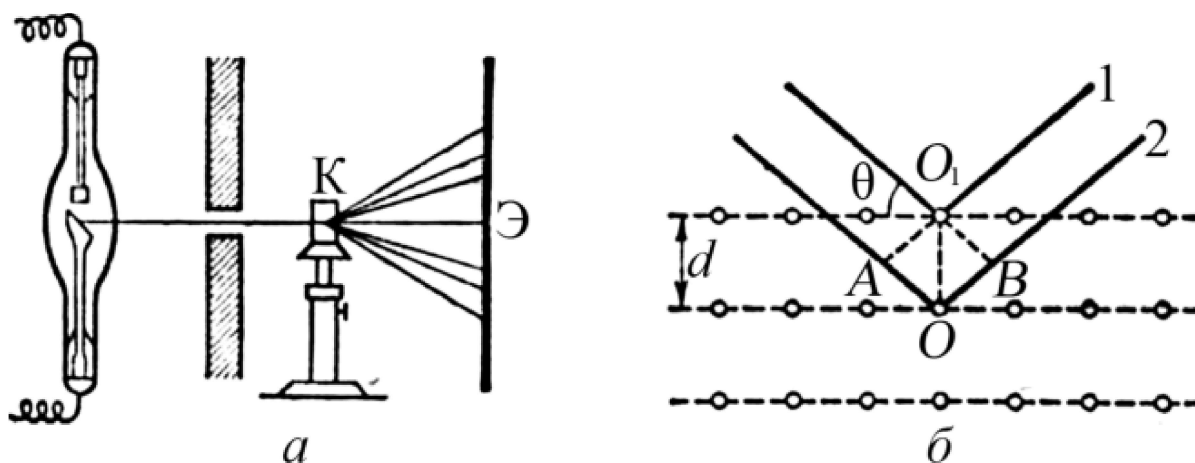
**Лекція 8. Дифракція рентгенівських променів.  
Формула Вульфа – Брегга.  
Поняття про голографію.  
Метод Денисюка**

**Дифракція рентгенівських променів.** Відомо, що для якнайкращих умов спостереження дифракційної картини постійна решітки має бути того ж порядку, що і довжина падаючої хвилі. З іншого боку, у природі існують такі просторові структури – кристали, де атоми розміщені на відстанях близько  $10^{-8}$  см. Отже, кристал є тривимірною дифракційною решіткою, в якій неоднорідності (тобто атоми, молекули, іони) регулярно повторюються у трьох вимірюваннях. Роль щілини в даному випадку відіграє елементарний осередок кристала. Цей факт допоміг М. Лауе (1912 р.) дійти висновку, що існуючі природні кристали з постійною близько  $10^{-8}$  см є дуже зручними тривимірними решітками для спостереження дифракції рентгенівських променів, що мають довжини хвиль того ж порядку. Подібні експерименти дозволили, вивчаючи дифракцію рентгенівських променів відомої довжини на просторових решітках (сукупність атомів або іонів, розташованих у кристалічних решітках на відстані близько  $10^{-8}$  см), визначити міжатомні відстані (постійні ґрати) в кристалічних решітках.

Суть ідеї Лауе при постановці відповідного експерименту полягає в наступному: кристал К, розташований на підставці, освітлюють рентгенівським випромінюванням безперервного спектра, який випромінюється рентгенівською трубкою (рис. 2.43, а). Випромінювання з довжиною хвилі, сумірної з постійною кристалічної решітки, дифрагуючи на цій решітці, дає відповідну дифракційну картину (так звану лауеграму). Аналіз лауеграми дозволяє отримати відомості про кристалічну структуру.

Можна вивести просту практичну формулу, що дає умову максимуму при дифракції від просторових решіток. Зупинимося на виведенні цієї формули.

**Формула Вульфа – Брегга.** Монохроматичне рентгенівське випромінювання, потрапляючи на кристалічну решітку і дифрагуючи на ній, розсіюється. Промені, розсіяні від взаємно паралельних площин, віддалених одна від одної на відстанях,



кратних міжплощинній відстані, є взаємно когерентними і, отже, можуть інтерферувати. Для визначення напрямів, по яких спостерігатимуться максимуми, треба знайти умову максимального посилення хвиль, які дифрагували від однієї вищезначеної площини, і хвиль, що йдуть від сукупності взаємно паралельних площин. Із принципу Гюйгенса виходить, що взаємне посилення хвиль, розсіяних окремими центрами в межах однієї площини, відбудеться у випадку, якщо кут падіння дорівнює куту відбивання. Тільки в цьому випадку вони будуть поширюватися в одній фазі і, отже, накладаючись, взаємно підсилюватимуть один одного. Щоб відбулося посилення також хвиль, що йдуть від взаємно паралельних площин, різниця ходу між променями 1 і 2, відбитими від сусідніх площин (див. рис. 2.43, б), повинна дорівнювати цілому числу довжини хвилі. Якщо кут, доповнюючий кут падіння до  $90^\circ$ , позначити через  $\theta$  (кут ковзання), то шукана різниця ходу буде  $\Delta = AO + OB = 2d \sin \theta$ . Отже, взаємне посилення відбудеться, якщо

$$2d \sin \theta = m\lambda, \quad (2.38)$$

де  $m = 1, 2, 3, \dots$ ,  $d$  – міжплощинна відстань.

При довільному напрямі падіння монохроматичного променя дифракція не виникає. В цьому випадку для спостереження дифракції необхідно, повертаючи кристал, знайти даний кут ковзання  $\theta$ . Наприклад, якщо на кристал кальциту, міжплощинна відстань в якому дорівнює  $3,029 \text{ \AA}$ , направити випромінювання з довжиною хвилі  $1,54 \text{ \AA}$ , то дифракційний максимум першого порядку спостерігатиметься під кутом

$$\theta = \arcsin \frac{\lambda}{2d} \approx 14^{\circ}40'.$$

За допомогою формули Вульфа – Брегга вирішують два завдання:

1. За відомою довжиною хвилі рентгенівського випромінювання, визначаючи  $\theta$  і  $m$ , можна обчислити  $d$ , тобто знайти міжплощинну відстань, а відтак і постійну кристалічної решітки. Рішенням цієї задачі займається рентгеноструктурний аналіз.
2. За відомою кристалічною структурою  $d$ , визначаючи  $\theta$  і  $m$ , можна обчислити невідому довжину хвилі падаючого рентгенівського випромінювання. Цей напрям фізики називається рентгеноспектроскопією.

### **Поняття про голографію**

**Фотографія.** Явища інтерференції й дифракції світла можуть бути використані для одержання об'ємних образів предметів, що принципово відрізняються від тих, які виходять при звичайному фотографуванні.

При звичайному фотографуванні світло, відбите від окремих точок освітленого об'єкта, фокусується за допомогою об'єктива в точках на поверхні фотоплівки.

Зображення точок, неоднаково віддалених від об'єктива, виходять також на різних відстанях від об'єктива. Іншими словами, якщо предмет є тривимірним, об'ємним, то і його зображення буде об'ємним. Але тому що це зображення фіксується на плоскій фотоплівці (фотоемульсія має товщину всього 6–25 мкм), то чітким виходить зображення тільки частини точок предмета, на які було здійснено наведення на різкість. Інші точки об'ємного зображення, розташовані ближче або далі, дають на фотоплівці нечіткі, розмиті плями. Правда, зі зменшенням розмірів діафрагми глибина різкості може бути збільшена, але чому ж, розглядаючи фотографію, ми все-таки одержуємо враження про просторове розташування предметів?

Відчуття об'ємності на плоскій фотографії створюється перспективою й тінями від бічного освітлення предметів, а е дається ціною втрати світла та збільшенням екс-позиції.

також «звичкою» бачити об'ємні предмети плоскими. Річ у тому, що оптична система ока й фотоапарата однакові (лінза – фотопластинка, кришталік – сітківка). Розглядаючи об'ємний предмет або його фотографію, ми одержуємо на сітківці ока однакові «плоскі» зображення. Мозок людини «звик» розпізнавати об'ємні предмети через їхні плоскі зображення.

Але об'ємний об'єкт і його фотографія все-таки мають істотні розходження відносно їх сприйняття зором. Дійсно, зміщуючись відносно предмета, можна заглянути за нього й побачити, як він виглядає збоку, позаду й що за ним знаходиться. Це переконує спостерігача в тому, що перед ним розташований реальний предмет. Зміщення ж відносно фотографії ніяких додаткових подробиць про предмети, які зображені на ній, не дає.

Таким чином, звичайна фотографія є досить умовним зображенням об'ємного предмета. У цьому зображенні бракує значної частини тієї інформації про предмет, яку можна одержати при безпосередньому розгляданні предмета.

Чим же викликана ця втрата інформації при фотографуванні? Річ у тому, що фотопластинка реєструє тільки освітленість, тобто амплітуду світлових хвиль, відбитих від різних точок предмета. Чим яскравіша точка предмета, тим світліше зображення цієї точки на позитиві. У той же час світлова хвиля в цій точці простору характеризується не тільки амплітудою, але й фазою коливань. А на почорніння фотопластинки фаза коливань не впливає.

Можна сказати, що на фотопластинці не фіксується форма хвильової поверхні, що являє собою поверхню рівних фаз. І виходить, що фотографія не несе ніякої об'єктивної інформації про відстань до різних точок об'ємного об'єкта зйомки. Адже форма хвильової поверхні, що досягає спостерігача або фотопластинки, залежить саме від цих відстаней.

Якби на фотопластинці вдалося зафіксувати не тільки амплітуду світлових хвиль, розсіюваних предметом, але й їхню фа-



зу, то при розгляді такої фотографії, що розсіює світло точно так само, як і об'єкт, спостерігач не зміг би відрізнити її від об'єкта.

Голографія. Вперше більш повну, ніж у звичайній фотографії, реєстрацію розсіяного предметом світла вдалося одержати в 1948 р. англійському фізику Д. Габору. Він назвав запропонований ним спосіб голографією (від грецького «голос» – цілий, увесь).

У чому ж сутність голографічного методу одержання зображення? Для одержання голограми використовуються широкі пучки когерентного світла. Один із шляхів одержання голограми полягає в наступному.

Широкий пучок когерентного світла розділяється на дві частини. Одна група променів досягає фотопластинки після відбивання від об'єкта. Це сигнальний пучок. Інша досягає фотопластинки після відбивання від плоского дзеркала. Це опорний пучок (рис. 2.44). У результаті накладання цих двох коге-



Д. Габор

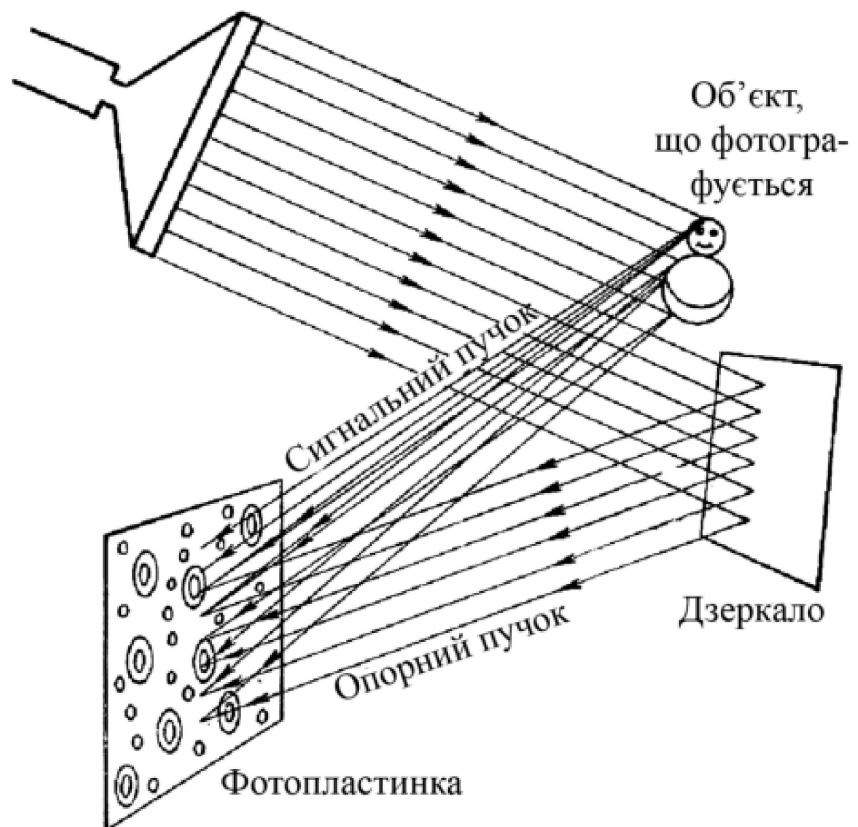


Рис. 2.44. Схема одержання голограми

рентних хвиль на фотопластинці утвориться інтерференційна картина. Фотографія цієї картини, отримана після обробки фотопластинки, називається голограмою.

Голограма містить інформацію не тільки про амплітуду хвиль, як звичайна фотографія, ще в ній закладені дані й про їхню фазу, тобто про форму хвильових поверхонь. Дійсно, у тих місцях фотопластинки, де фази опорних і сигнальних хвиль збігаються, їхні амплітуди складаються, і результуюча освітленість у таких місцях буде більша за ту, яку кожна із хвиль створює окремо. Після позитивної обробки фотопластинка в таких місцях буде більш прозора, ніж у тих місцях, у яких обидві хвилі перебувають зі зсувом по фазі.

Якщо для деяких точок фази хвиль виявляться протилежними, а їх амплітуди однаковими, то після обробки ці точки будуть чорними, непрозорими. Таким чином, явище інтерференції, перетворюючи фазові співвідношення між хвилями в співвідношення амплітуд, дозволяє зафіксувати на фотопластинці фазові співвідношення між хвилями у вигляді відповідних змін прозорості. Пряма фотографічна реєстрація фазових співвідношень хвиль неможлива, тому що фотопластинка реагує тільки на розходження в освітленості, тобто на розходження в амплітудах коливань.

Характерно, що на відміну від звичайної фотографії при голографічному способі запису зображення не застосовуються ні лінзи, ні інші пристрої, що формують зображення. *Кожна точка об'єкта, відбиваючи світло, посилає його на всю голограму, і кожна точка голограми одержує світло від усього об'єкта.*

*Отже, голограма предмета – це складний інтерференційний візерунок з нерівномірно розташованих інтерференційних ліній, що виникають при взаємодії сигнальної хвилі складної форми із плоскою опорною хвилею.* Вона містить у собі повну інформацію як про амплітуди, так і про фази хвиль, відбитих від об'єкта.

Але голограма не є фотографічним зображенням об'єкта. Розглядаючи її, зовсім неможливо здогадатися, що на ній зо-

бражено. Яким же засобом можна витягти з голограми оптичну інформацію, що міститься в ній, про об'єкт?

Процес одержання зображення за допомогою голограми називається відновленням. Процес відновлення голограми дуже простий.

Направимо на голограму точно таким же засобом, як при її одержанні, опорний пучок когерентного світла (рис. 2.45). Через неї пройдуть тільки ті ділянки опорної хвилі, які перебувають у фазі із сигнальною хвилею світла, розсіяного об'єктом при одержанні голограми. А ділянки опорної хвилі, що відрізняються по фазі від сигнальної хвилі об'єкта, будуть поглинатися (або відбиватися) непрозорими місцями голограми. Таким чином, при проходженні опорної хвилі крізь голограму з неї виключається все те, чого не було в сигнальній хвилі від об'єкта, і зберігається все те, що в ній було. У результаті відтворюється точно такий же розподіл фаз і амплітуд, що був у сигнальному пучку, який розсіяно об'єктом.

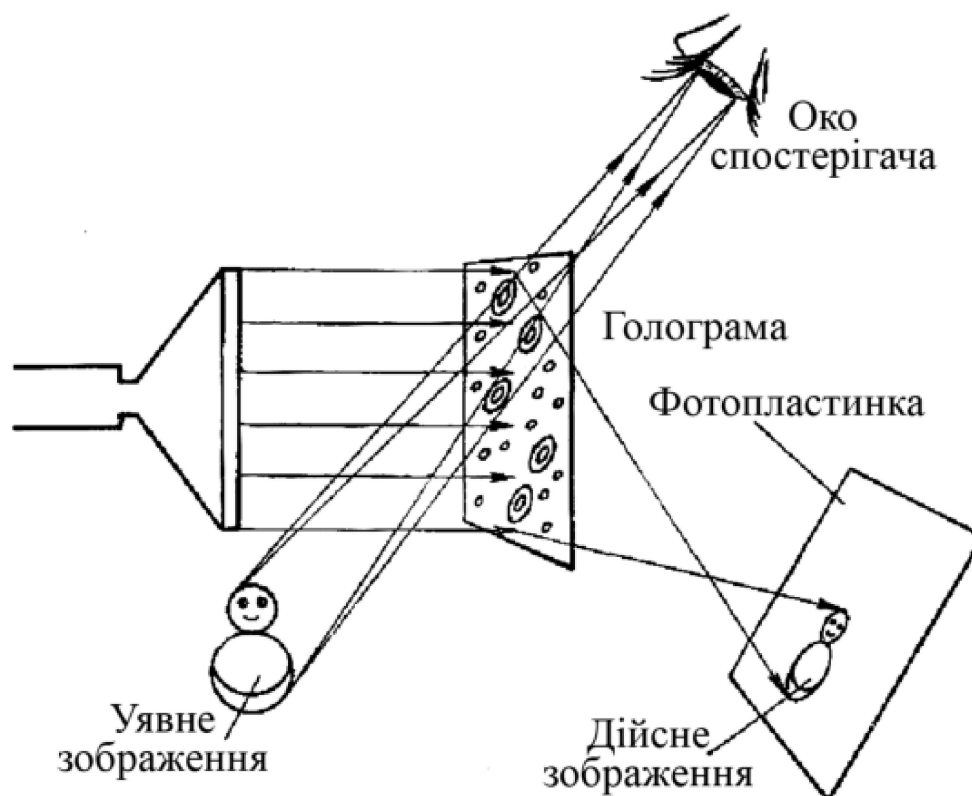


Рис. 2.45. Схема відновлення голограм

Все це відбувається відповідно до принципу Гюйгенса – Френеля. Опорний пучок, падаючи на голограму, збуджує у прозорих її місцях коливання вторинних джерел. Амплітуди цих коливань пропорційні амплітудам сигнальних хвиль у цих точках, і фази їх збігаються. За принципом Гюйгенса – Френеля вторинні джерела створюють у навколишньому просторі таку ж картину хвильових полів, яка була в сигнальному пучку від предмета.

Точний збіг відновленого хвильового фронту із сигнальним (який падав на фотопластинку під час виготовлення голограми) приводить до того, що сприйняте оком зображення за зовнішнім виглядом таке ж, як предмет.

**Голографія із записом у тривимірному середовищі.** В 1962 р. радянським фізиком Ю. М. Денисюком був запропонований цікавий і перспективний метод голографії із записом у тривимірному середовищі – метод товстошарової фотоемульсії. За цю роботу Ю. М. Денисюк був визнаний лауреатом Ленінської премії 1970 р.

Предмет освітлюється монохроматичним когерентним джерелом. Світло, розсіяне об'єктом, інтерферує з головним пучком, утворює у просторі навколо предмета стоячі хвилі.

Якщо в області стоячих хвиль розташовується шар прозорої світлочутливої емульсії, то після експонування й обробки цієї емульсії в місцях утворення пучностей стоячих хвиль, де фази опорної й сигнальної хвиль збігаються, виділяється срібло. В емульсії створюються срібні шари-дзеркала з поверхнею складної конфігурації, які точно повторюють конфігурацію розташування в просторі пучностей стоячих хвиль. Це і є тривимірна голограма Ю. М. Денисюка.

Тривимірна голограма є своєрідним оптичним еквівалентом предмета. Дійсно, якщо на цю голограму направити опорний пучок від джерела, для чого можна користуватися навіть



Ю. М. Денисюк

звичайним некогерентним джерелом світла, то, відбиваючись від дзеркал голограми, що утворилися на місці поверхонь пучностей, світло змінить напрямок поширення. Причому на поверхнях дзеркал, у місцях інтерференційних максимумів, напрямок поширення відбитих хвиль і розподіл фаз будуть такими ж, як і у хвиль, відбитих об'єктом при експонуванні голограми. Голограма відбиває світло точно так само, як і предмет. Тому спостерігачеві буде здаватися, що він бачить реальний предмет, а не його голографічне зображення.

При освітленні білим світлом голограма буде відбивати тільки хвилі таких довжин, які падали на неї при запису й утворили систему дзеркал, що відстоять одне від одного на відстані  $\lambda/2$ . Хвилі інших довжин голограма не відіб'є, і вони не візьмуть участі в утворенні зображення.

Якщо ж при одержанні голограми освітити предмет випромінюванням від трьох когерентних джерел світла з різними довжинами хвиль, то зображення, відновлене білим світлом з отриманої голограми, буде таким же кольоровим, як і предмет. Чорно-біла голограма дає кольорове зображення!

*Голограма – це матеріальна структура, що відбиває світло так само, як і знятий на ній об'єкт.* Тому голограму називають іноді оптичним еквівалентом предмета. Саме оптичним, а не дійсним. Наприклад, якщо взяти як предмет увігнуте дзеркало й одержати його голограму, то вона буде відбивати й фокусувати світло так само, як і ввігнуте дзеркало.

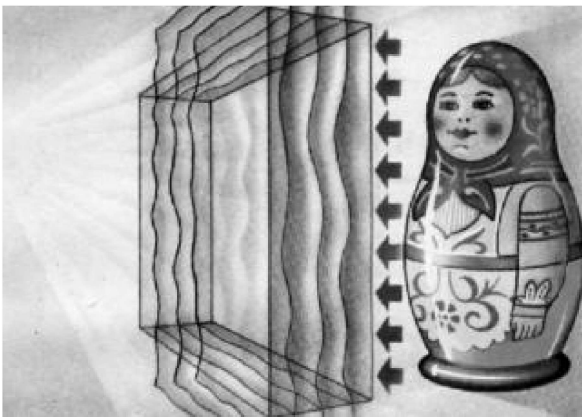


Рис. 2.46. Схема запису тривимірної голограми

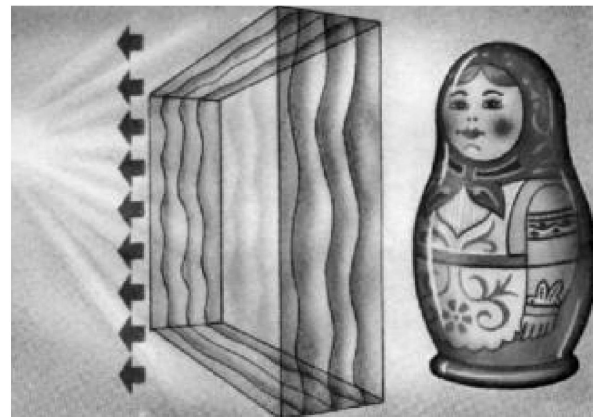


Рис. 2.47. Схема відновлення тривимірної голограми

**Властивості й особливості голограм. Застосування голографії.** Зображення, одержувані за допомогою голограм, мають дивні особливості. Частина звичайної фотографії предмета, зрозуміло, містить інформацію тільки про частини предмета. А якщо голограму розділити на кілька шматків, то при просвічуванні опорним пучком світла кожний із них окремо дає ту ж картину, що й ціла голограма. Ця властивість голограми обумовлена тим, що кожна її точка при експонуванні піддається дії світла, розсіяного всіма точками предмета, і світло, відбите кожною точкою предмета, освітлює всю поверхню голограми при експонуванні. Саме тому в кожному невеликому шматку голограми в закодованому вигляді зберігається оптична інформація про весь предмет.

Ще одна особливість голограми полягає в тому, що на одній фотопластинці можна по черзі записати кілька зображень різних предметів. Для цього після експонування одного предмета інший розташовують в іншому місці або просто змінюють напрямок опорного пучка світла. Кожне зображення відновлюється без перешкод із боку інших зображень.

Ще Д. Габор показав, що, застосовуючи при відновленні голограми розбіжний пучок світла, можна одержати велике збільшення зображення предмета без допомоги лінзи. Він же запропонував одержувати голограми за допомогою електронних пучків, а відновлювати їх видимим світлом, тому що методи одержання оптичного зображення і простіші, і більш розроблені. Вже зараз одержують голограми за допомогою рентгенівських променів, а відновлюють їх у видимому світлі. Голограмний метод дозволяє знімати копії творів мистецтва – картин, скульптур, які зовсім не відрізняються від оригіналу.

В 1977 р. в нашій країні відбулася перша експериментальна демонстрація об'ємного голографічного кінофільму.