

Хвильова оптика

Три підходи до опису світлових явищ

Геометрична оптика:

Прямолінійне поширення світла

Опис лінз, дзеркал, та інших оптичних елементів

Хвильова оптика:

Світло як хвильове явище

Інтерференція, дифракція, поляризація

Квантова оптика:

Світло на рівні фотонів

Сучасні технології, такі як лазери та оптичні комп'ютери

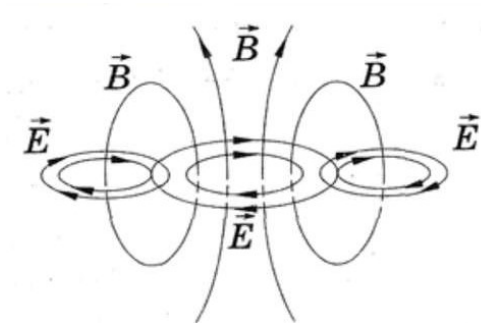
Електромагнітні Хвилі від Прискореного Заряду

Силві лінії прискореного заряду можуть відриватися.

Замкнена силова лінія створює магнітне поле.

Магнітне поле породжує нове електричне поле.

У результаті отримуємо електромагнітну хвилю.



Параметри Електро-магнітної хвилі

Частота (ν): Кількість коливань за одиницю часу.

Довжина хвилі (λ): Відстань між двома сусідніми максимумами хвилі.

Амплітуда (E_0): Максимальне відхилення поля від своєї рівноважної точки.

Вектор хвильового числа (k): $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

Кутова частота (ω): $\omega = 2\pi\nu$

Рівняння хвилі:

$$\vec{E}(x, t) = \vec{E}_0 \cos(kx - \omega t + \phi)$$

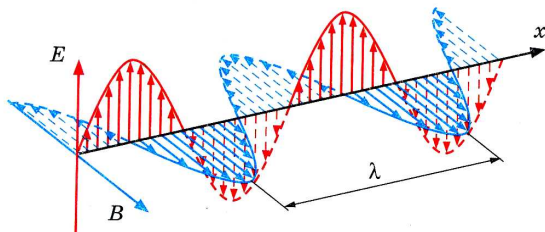


Рис.: Електромагнітна хвиля

Принципи хвильової оптики

Суперпозиція хвиль: Сума двох або більше хвильових функцій дає нову хвильову функцію.

Інтерференція: Процес зміни амплітуди результуючої хвилі через перекривання двох або більше хвиль.

Дифракція: Відхилення хвиль від прямолінійного руху, яке відбувається при проходженні через отвори або обходячи перешкоди.

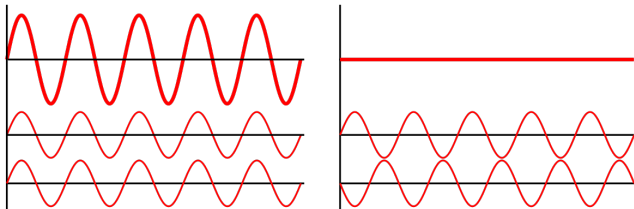
Поляризація: Орієнтація хвильового фронту у визначеному напрямку.

Інтерференція хвиль

Конструктивна інтерференція: Відбувається, коли хвилі зі збігаються у фазі, збільшуючи амплітуду.

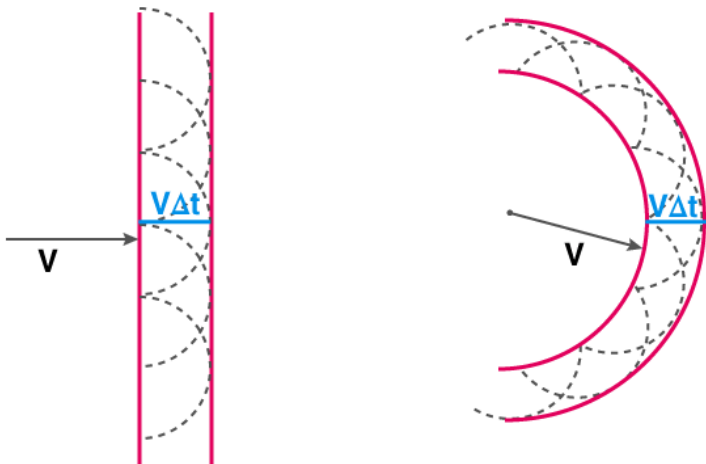
Деструктивна інтерференція: Відбувається, коли хвилі з різницею фази в π анулюють одна одну.

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\delta\phi)$$



Принцип Гюйгенса-Френеля

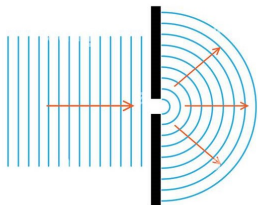
Основний принцип: Кожна точка хвильового фронту є джерелом нових сферичних хвиль.



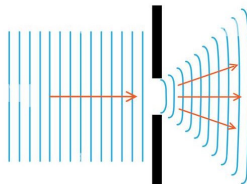
Дифракція на щілині

Зміна напрямку поширення хвилі під час проходження через щілину або обходу перешкоди.

Залежить від ширини щілини та довжини хвилі.



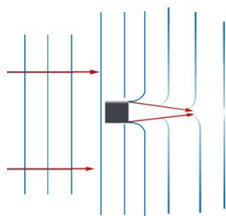
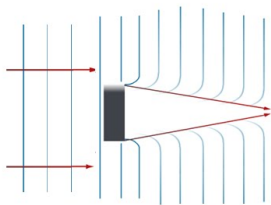
Narrow Gap



Wide Gap

Дифракція електромагнітної хвилі на перешкоді

Коли ланайні розміри об'єкта є того ж порядку, що довжна хвилі - відбувається процес "огинання"перешкоди. Такі перешкоди не відкидіють тіні та не відбиваються світло. Хвольовий фронт не змінюється при проходженні такої перешкоди.



Дифракційна межа

Дифракційна межа визначає мінімальний кут, під яким можна розділити два об'єкти, щоб вони не співпадали в одну дифракційну пляму.

Формула:

$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

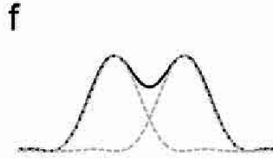
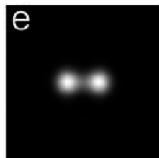
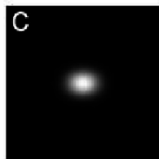
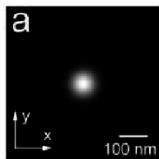
де θ - кут дифракційної межі, λ - довжина хвилі, D - діаметр апертури (або щілини).

Застосування:

Мікроскопія

Астрономія

Радіофізика



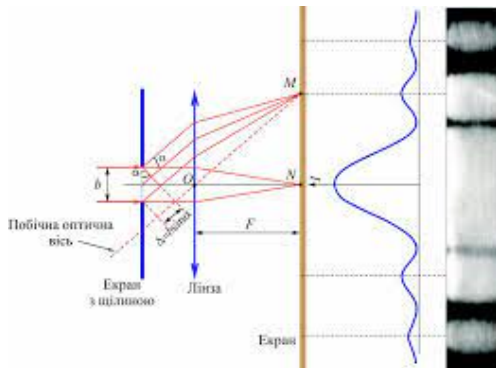
Інтерференційна картина після дифракції на щілині

Дифракція на щілині створює інтерференційну картину.

Максимуми та мінімуми: Залежать від ширини щілини, довжини хвилі, і відстані до екрану.

$$\theta_m = m \frac{\lambda}{a}, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

де θ_m — кут позиції максимумів, a — ширина щілини, λ — довжина хвилі.

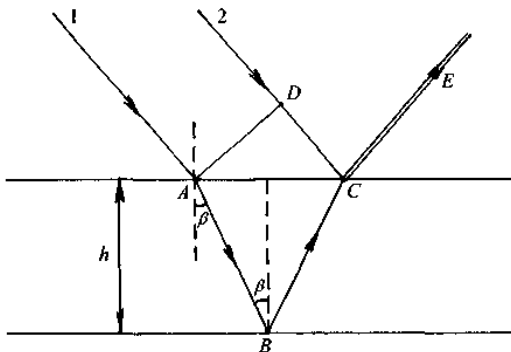


Інтерференція на плівці

Інтерференція на плівці спостерігається, коли світлова хвиля проходить крізь тонку плівку та відбивається від обох її поверхонь. Виходячи з плівки, хвилі можуть конструктивно чи деструктивно взаємодіяти.

$$2d \cos(\theta) = m\lambda$$

де d - товщина плівки, β - кут падіння, m - порядковий номер максимуму, λ - довжина хвилі.



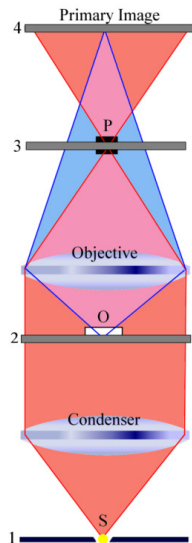
Фазово-контрастна мікроскопія

Фазово-контрастна мікроскопія це оптична техніка, яка використовується для підвищення контрасту прозорих і некольорованих зразків.

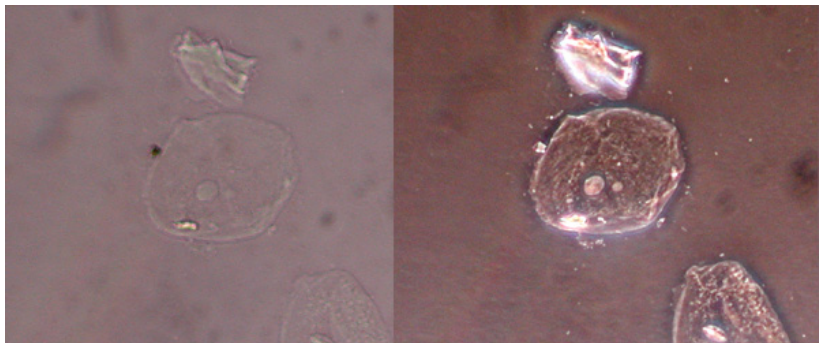
Світло, проходячи через прозорий об'єкт, зазнає фазового зсуву.

Фазовий зсув і використовується для створення контрастного зображення.

Фазово-контрастна мікроскопія дозволяє вивчати структуру і функції клітин без додаткового фарбування.



Фазово-контрастна мікроскопія



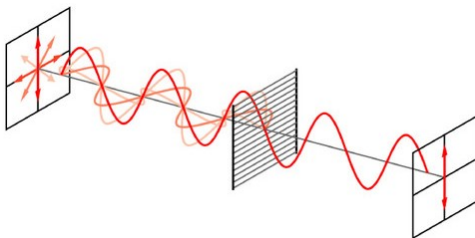
Одні і ті самі клітини, зображені за допомогою традиційної світлопольної мікроскопії (ліворуч) і фазово-контрастної мікроскопії (праворуч).

Поляризація світла

Поляризація — це характеристика хвильового руху, яка описує спрямованість коливань електромагнітного поля в хвилі.

Природне світло є не поляризованим - в ньому рівнорозподілені хвилі зі всіма можливими напрямками коливань.

У повністю поляризованому світлі існують хвилі що коливаються тільки в одному напрямку



Способи отримання поляризованого світла

Способи отримання поляризованого світла можна поділити на декілька категорій:

Використання поляризатора: Лінійний поляризатор може бути використаний для відсіювання небажаного світла.

Відбивання: При падінні на дзеркальну поверхню під певним кутом світло може стати поляризованим.

Проходження через анізотропні матеріали: Кристали, які не є центрально симетричними, можуть поляризувати світло.

Розсіяння: Світло може поляризуватися під час розсіяння на молекулах атмосфери.

Диференціальна контрастна мікроскопія (DIC)

Диференціальна контрастна мікроскопія (DIC), також відома як інтерференційний контраст Номарського, це оптична техніка мікроскопії для підвищення контрасту у незабарвлених, прозорих зразках.

DIC використовує принцип інтерферометрії для отримання інформації про оптичний шлях зразка, дозволяючи бачити інакше невидимі особливості. Метод працює на принципі взаємодії двох перекрещених поляризаційних хвиль, які проходять через зразок.

Зображення з'являється чорно-білим на сірому фоні, подібним до зображення, отриманого за допомогою фазово-контрастної мікроскопії, але без яскравого дифракційного гало.

Принципи роботи DIC мікроскопії

Неполяризоване світло поляризується під кутом 45° при вході в мікроскоп.

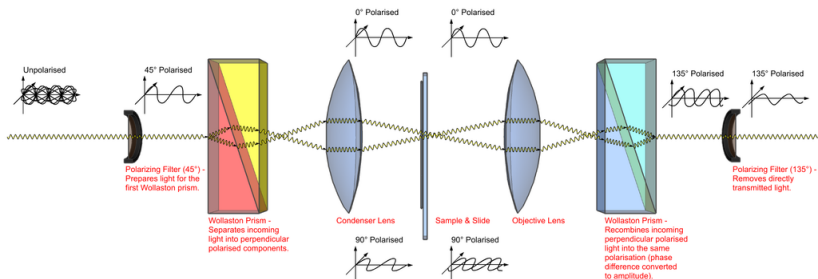
Поляризоване світло проходить через першу призму Волластона, модифіковану за методом Номарського, і розділяється на два промені, поляризовані під кутом 90° один до одного.

Два промені фокусуються конденсатором для проходження через зразок.

Промені проходять через сусідні області зразка, зазнаючи зміни фази через різну оптичну шляхову довжину.

Промені проходять через об'єктив і фокусуються другою призмою Волластона, модифіковану за методом Номарського.

Другий прим знову об'єднує два промені в один, поляризований під кутом 135° . Це призводить до інтерференції і формування кінцевого зображення.



DIC мікроскопія: Зображення

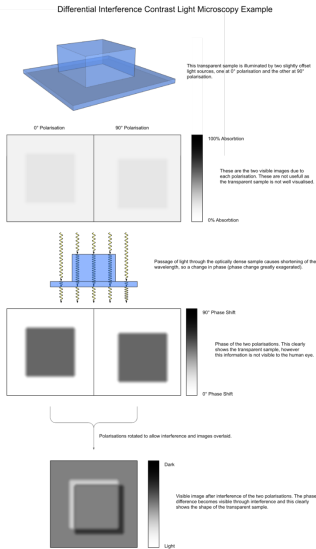
Зображення виглядає як 3D об'єкт під нахиленим освітленням, створюючи яскраві та темні тіні.

Дві яскраві поля взаємодіють із зміщенням, призводячи до інтерференції.

Фазова різниця, зазвичай, не перевищує 90° через схожість показників заломлення зразка і середовища.

Контраст можна регулювати зміною початкової фази.

Послідовно зміщені зображення можуть покращити контраст, особливо в мутних зразках.



Регуляція мікроскопічних зображень у DIC

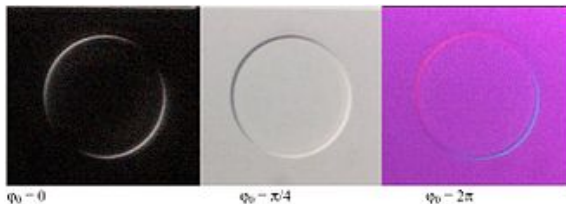


Рис.: Зміна зображення при зміні різниці фаз

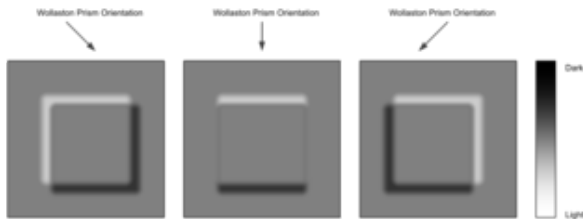


Рис.: Зміна зображення при зміні орієнтації призм Волластона

Мікроскопічні зображення DIC

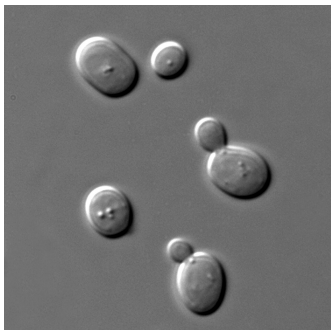


Рис.: *Saccharomyces cerevisiae* cells in DIC microscopy. Imaging was performed with the Olympus BX61 microscope and a UPlanSApo 100× NA 1.40 oil immersion objective (Olympus).



Рис.: *Micrasterias radiata* / from Shishitsuka-Pond, Tsuchiura, Ibaraki Pref., Japan / Microscope: Leica DMRD (DIC)

Volvox різними методами отримання мікроскопічних зображень

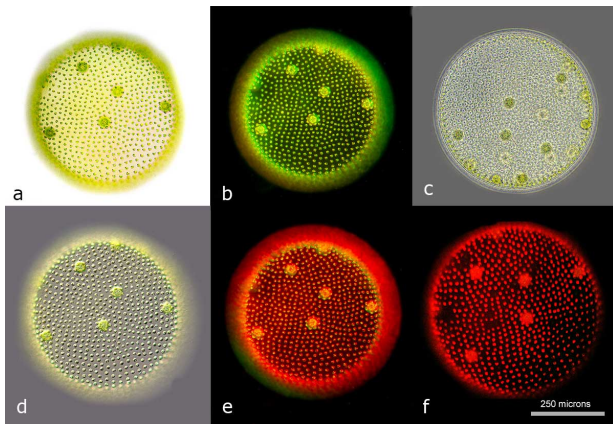


Рис.: Volvox: а) яскраво-польова б) темно-польова
с) фазова контрастна d) диференційна
інтерференційна контрастна (DIC) е) освітлення
Райнберга f) флуоресцентна мікроскопія з зеленим
збудженням.