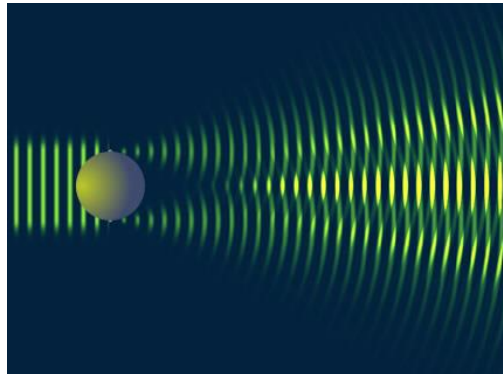
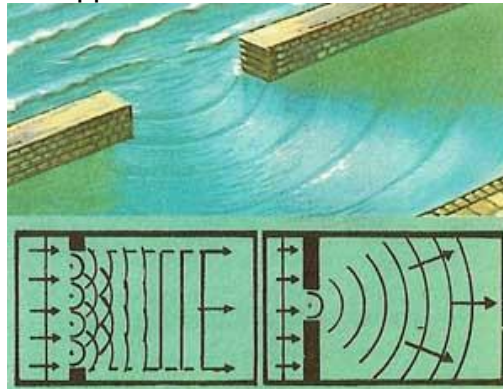


ДИФРАКЦИЯ НА СВЕТЛИНАТА

1. Дифракция на светлината



Определение: Отклонение на светлината от праволинейното ѝ разпространение в среда с резки нееднородности (прегради, препятствия, отвори и т.н.), около които възниква локално амплитудно или фазово нарушение на вълновия фронт.



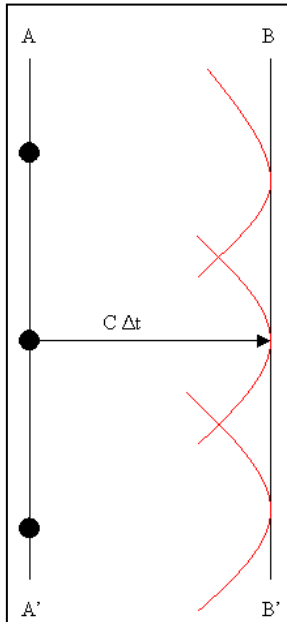
- Дифракция възниква във всички случаи, когато изменението на амплитудата или фазата не е еднакво за цялата вълнова повърхност.
- Дифракцията води до отклонението на светлинните вълни от препятствия и проникване на светлината зад прегради (в областта на геометрична сянка).
- Дифракцията не е: пречупване, отражение и преминаване през оптически нееднородни среди.
- Дифракцията определя границите на възможното подобряване на качествата на оптичните образи.
- При $\lambda \rightarrow 0$, дифракция не се наблюдава, т.к. тогава действа законът на геометричната оптика за праволинейно разпространение на светлината.

Между интерференцията и дифракцията няма съществени физически различия. Същността на двете явления се заключава в преразпределение на светлинния поток в резултат на суперпозицията на кохерентни вълни.

По исторически причини преразпределението на интензитета, възникващо в резултат на суперпозицията на вълни, възбудени от краен брой дискретни кохерентни източници е прието да се нарича **интерференция на вълните**.

Преразпределението на интензитета, възникващо вследствие на суперпозиция на вълни, възбудени от кохерентни източници разположени непрекъснато е прието да се нарича **дифракция на вълните**.

Затова се говори за интерференчна картина от два тънки процепа и за дифракционна картина от един процеп.



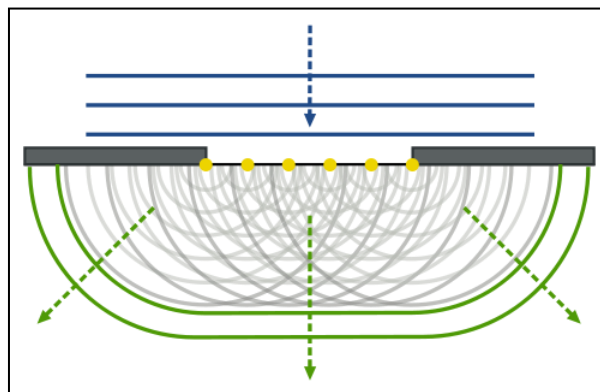
2. Принцип на Хюйгенс

Всяка точка от вълновия фронт става център на елементарна вторична сферична вълна, а обвивката на тези елементарни вълни е новият вълнов фронт.

Този принцип обяснява посоката на разпространение на вълната, т.е. проникването на светлинната вълна в областта на геометрична сянка.

Не обяснява как се пресмята амплитудата и фазата в дадена точка и съответно големината на интензитета, а от там и разпределението на интензитета.

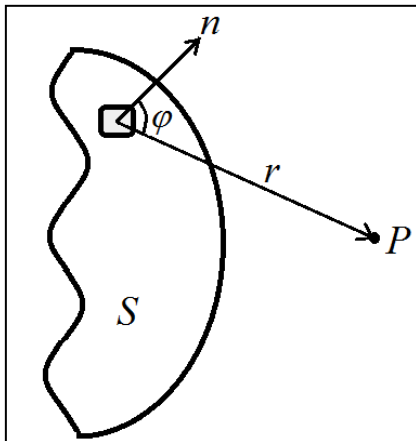
3. Принцип на Хюйгенс-Френел



Френел допълва принципа на Хюйгенс с твърдението, че вторичните вълни интерферират помежду си.

Отчитането на амплитудите и фазите на вторичните вълни и принципа на суперпозиция позволява да се намери амплитудата на резултантната вълна във всяка точка от пространството, а от там и разпределението на интензитета.

Съчетанието на принципа на Хюйгенс с принципа за интерференцията се нарича принцип на Хюйгенс-Френел.



Според принципа на Хюйгенс-Френел, всеки елемент от вълновата повърхност S е източник на вторична сферична вълна с амплитуда, пропорционална на площта на елемента dS.

Амплитудата на сферичната вълна намалява с разстоянието от източника по закона $1/r \Rightarrow$

От всеки участък dS на вълновата повърхност в т.Р, лежаща пред нея достигат трептения:

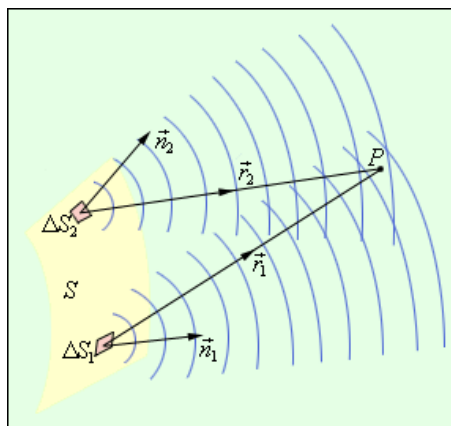
Вторичната вълна, изпусната от всеки елемент dS.e:

$$(1) \quad dE = k \frac{a_0 dS}{r} \exp[i(\omega t - k.r + \alpha_0)]$$

a_0 - амплитуда на трептене в мястото, където е dS.

$k = k(\varphi)$ - коефициент, зависещ от ъгъл φ между нормалата към dS и направлението от dS до т.Р.

$$k = k(0) = \max ; k = k\left(\frac{\pi}{2}\right) = 0$$



Резултатното трептене в т.Р е суперпозиция от трептения (1) за цялата вълнова повърхност S:

$$(2) \quad E = \int_S k(\varphi) \cdot \frac{a_0}{r} \exp[i(\omega t - k.r - \alpha_0)] \cdot dS \quad \text{- Принцип на Хюйгенс-Френел}$$

Формула (2) е аналитичен израз на принципа на Хюйгенс-Френел.

СЪЩНОСТТА НА ПРИНЦИПА НА ХЮЙГЕНС-ФРЕНЕЛ

Амплитудата на трептене в т.Р, породено от светлинна вълна, разпространяваща се от реален източник, източникът може да се замени със съвкупност от вторични източници, разположение по вълновата повърхност S.

4. Френелова и Фраунhoferова дифракция

Различават се два вида дифракция:

А) Дифракция на Френел

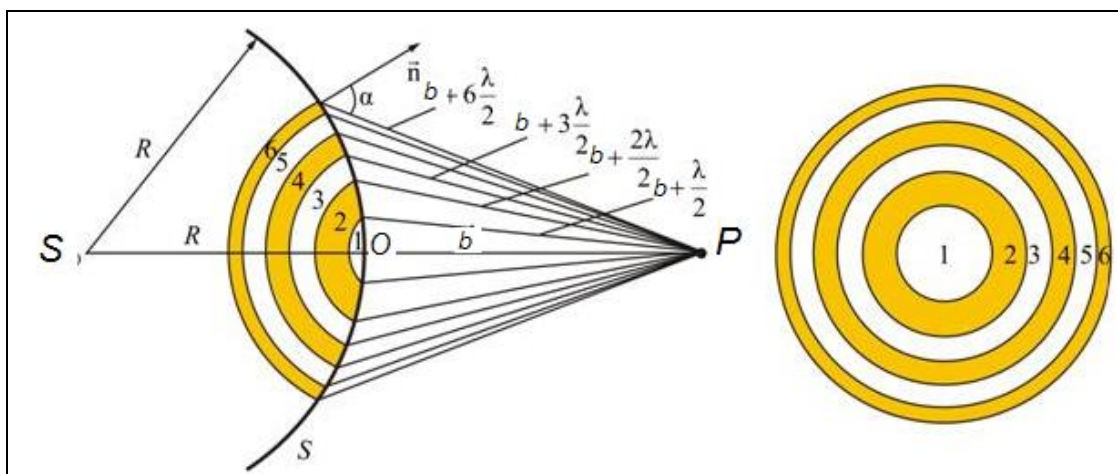
- Ако източникът на светлина и точката на наблюдение не са разположени твърде далече от препятствието (преграда, отвор и т.н.), се наблюдава дифракция на сферични вълни.
- Наблюдава се без оптична система.
- Наблюдава се дифракционен образ на препятствието.

В) Дифракция на Фраунhofer

- Ако източникът на светлина и точката на наблюдение са разположени от препятствието толкова далече, че лъчите образуват практически успореден сноп лъчи, се наблюдава дифракция на плоски вълни.
- Може да се наблюдава като след източника О и пред точката на наблюдение т. Р се поставят лещи, така че т.О и т.Р да са във фокалните равнини на лещите.
- Наблюдава се с оптична система - леща пред екрана.
- Наблюдава се дифракционен образ на източника.

5. Зони на Френел

Трябва да се определи амплитудата на светлинното трептене в т.Р, възбудено от сферична вълна, разпространяваща се в избрана еднородна среда от точков източник S. Вълновата повърхност на тази вълна е симетрична спрямо правата SP. Разделяме вълновата повърхност на кръгови зони.



(3)
$$b_m = b + m \cdot \frac{\lambda}{2}$$
 - разстояние от края на m-та зона до т.Р

b – разстояние от върха на вълновата повърхност до т.Р

Резултантните трептения създавани от всяка зона ще са в противофаза с тези, създадени от съседните зони, т.е ще са с $\Delta = \lambda/2$, разлика в оптичните пътища за две съседни зони или $\delta = \pi$, разлика във фазите за две съседни зони.

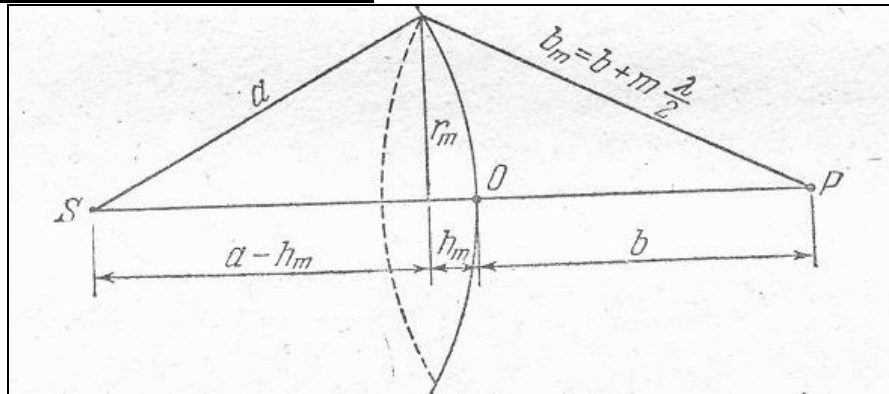
Амплитудата на резултатното трептене в т.Р е:

$$(4) \quad A = A_1 - A_2 + A_3 - A_4$$

$$A = \frac{A_1}{2} + \frac{A_m}{2}, \quad m - \text{нечетно}$$

$$A = \frac{A_1}{2} - \frac{A_m}{2} \quad m - \text{четно}$$

Нека изчислим площта на m зона



$$(5) \quad \Delta S_m = S_m - S_{m-1}$$

S_m - площта на сферичен сегмент с височина h_m , отделен от вълновата повърхност от външната граница на m -та зона

S_{m-1} - сегмент отделен от външната граница на $(m-1)$ -та зона

$$(6) \quad S_m = 2\pi \cdot a \cdot h_m, \quad h_m = ?$$

$$(6.1) \quad r_m^2 = a^2 - (a - h_m)^2 = \left(b + m \cdot \frac{\lambda}{2}\right)^2 - (b + h_m)^2$$

r_m - радиус на външната граница на m -та зона

$$(7) \quad h_m = \frac{b \cdot m \cdot \lambda + m^2 \cdot \frac{\lambda^2}{4}}{2(a + b)}$$

Ако m не е много голямо, λ^2 може да се пренебрегне като безкрайно малко.

$$(8) \quad h_m = \frac{b \cdot m \cdot \lambda}{2(a + b)}$$

От (6) и (8) \Rightarrow

$$(9) \quad S_m = \frac{\pi \cdot a \cdot b}{a + b} \cdot m \cdot \lambda$$

От (5) и (9) \Rightarrow

$$(10) \quad \Delta S_m = \frac{\pi \cdot a \cdot b}{a + b} \cdot \lambda - \text{площта на френеловата зона не зависи от } m$$

Площите на зоните на Френел са равни при неголям брой зони m .

Да изчислим радиуса на френеловата зона

От (6.1) \Rightarrow

$$(11) \quad r_m^2 = 2 \cdot a \cdot h_m - h_m^2, \quad h_m^2 \rightarrow 0$$

$$\text{От (8) и (11) } \Rightarrow \quad r_m^2 = \frac{a \cdot b \cdot m \cdot \lambda}{(a + b)}$$

$$(12) \quad r_m = \sqrt{\frac{a \cdot b}{a + b} \cdot m \cdot \lambda} - \text{радиусът на френеловата зона зависи от } \sqrt{m}$$

Да определим броя на откритите зони на Френел - m .

От условието, че радиусът на $m^{\text{тата}}$ френелова зона съвпада с радиуса на отвората $r \Rightarrow$

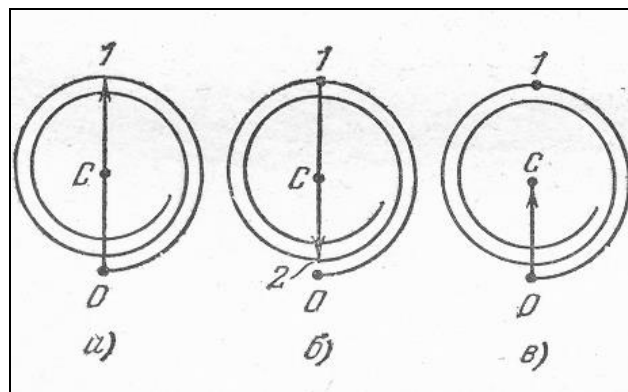
$$(13) \quad r = \sqrt{m \cdot \frac{a \cdot b}{a + b} \cdot \lambda} \Rightarrow r^2 = m \cdot \frac{a \cdot b}{a + b} \cdot \lambda$$

$$(14) \quad m = \frac{r^2 \cdot (a + b)}{a \cdot b \cdot \lambda},$$

т.е. броят на френеловите зони зависи от големината на отвората r , дължината на вълната λ , от радиуса на сферичната вълна a и от разстоянието от т.О до екрана (в т.Р) $\rightarrow b$.

Следователно, изменяйки b ще се изменя и броят на френеловите зони, които ще се виждат от т.Р. С нарастване на b ще намалява m , ще се откриват по-малко зони.

6. Графическо събиране на амплитудите



Спирала от малки крайни вектори на трептене от много малки зони много по-малки от една зона на Френел.

а) Участъка от спиралата 0-1 съответства на I френелова зона.

01 векторът изразява трептенето в т. Р, възбудено от I френелова зона

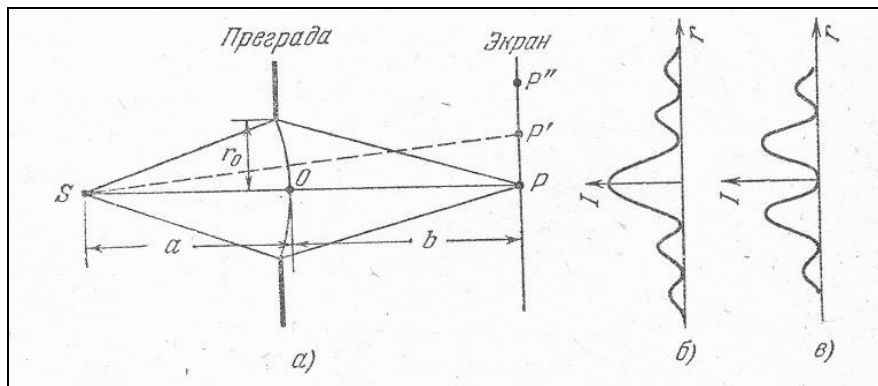
б) 1-2 – II зона

12 вектор – амплитудата в т. Р от II зона.

01 и 12 са в противофаза, т.к. трептенията възбудени от I и II зона на Френел са в противофаза.

в) ОС – трептенията в т.Р възбудени от цялата вълнова повърхност.

7. Дифракция от кръгъл отвор



Поставяме зад сферична вълна преграда с изрязан отвор, кръгъл с радиус r_0 .
Както показахме във ф-ла (14), откриват се m на брой зони:

$$m = \frac{r^2}{\lambda} \cdot \frac{(a+b)}{a \cdot b}$$

В т.Р от (4) за амплитудата се получава:

$$(15) \quad A = \frac{A_1}{2} + \frac{A_m}{2}, \quad m - \text{нечетно}$$

$$A = \frac{A_1}{2} - \frac{A_m}{2}, \quad m - \text{четно}$$

А/ За много малки m , например 1,2,3,4,5

а) нечетно: $I = c \cdot A_1^2$

$m = 1, A = A_1;$

$m = 3, A = \frac{A_1}{2} + \frac{A_3}{2} \approx A_1, A_1 \approx A_3$

б) четно: $I = 0$

$m = 2, A = \frac{A_1}{2} - \frac{A_2}{2} \approx 0, A_1 \approx A_2;$

$m = 4, A = \frac{A_1}{2} - \frac{A_4}{2} \approx 0$

Б/ Ако премахнем преградата, $m \rightarrow \infty$.

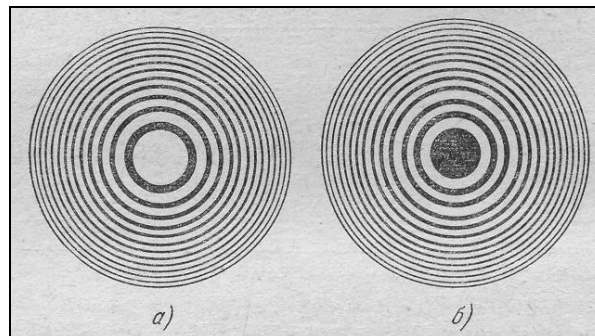
В т.Р: $A_\infty = \frac{A_1}{2} \pm \frac{A_\infty}{2}, \quad A_\infty = \frac{A_1}{2}, \quad I_\infty = c \cdot \frac{A_1^2}{4} = \frac{I}{4}$

⇒ преграда с неголям, нечетен брой открити зони на Френел ($m=1;3$) увеличава осветеността в т.Р почти 4 пъти, т.к. амплитудата е 2 пъти по-голяма.

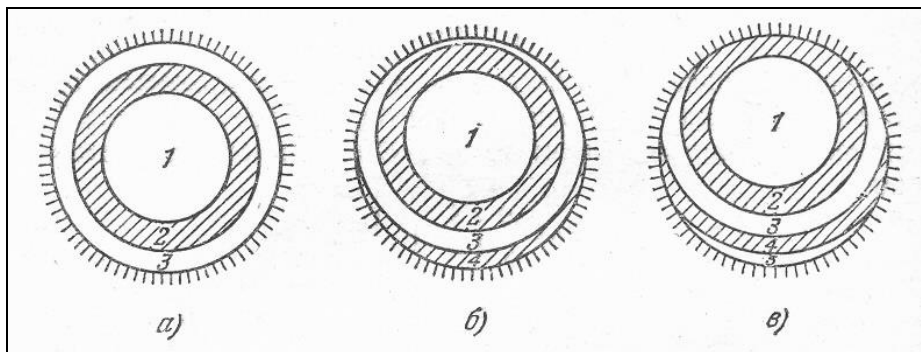
$$A = A_1, I = c \cdot A_1^2 \text{ - с преграда}$$

$$A_\infty = \frac{A_1}{2}, I_\infty = c \cdot \frac{A_1^2}{4} \text{ - без преграда}$$

Дифракционната картина от кръгъл отвор е редуващи се светли и тъмни концентрични кръгове. В център ще е светло петно (нечетно m) – фиг. а) или тъмно петно (четно m) – фиг. б).



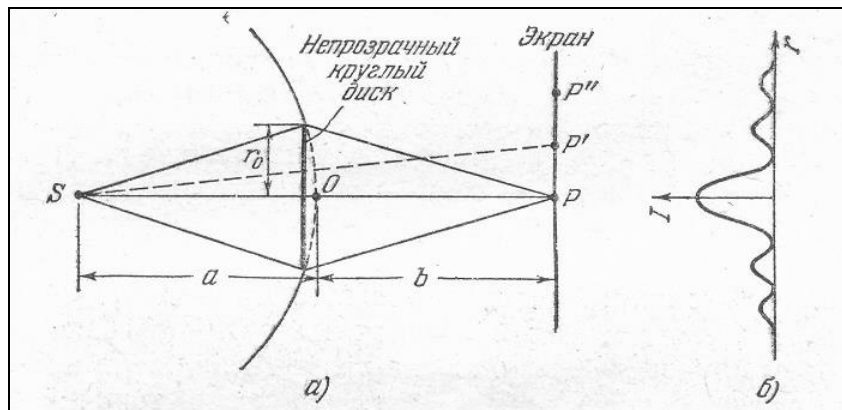
Броят открити зони за различните точки от екрана е показан на фигурата: фиг. а) – т.Р; фиг. б) – т. Р', фиг. в) – т. Р''



За $m < 1$: Открита е само част от централната зона на Френел. На екрана се наблюдава размито светло петно, без редуващи се тъмни и светли кръгове

За $m \rightarrow \infty$: Открити са голям брой зони. Редуващи се светли и тъмни кръгове се наблюдават само в много тясна област на границата на геометричната сянка. Вътре в тези области осветеността се оказва практически постоянна.

8. Дифракция зад кръгъл непрозрачен екран



Поставяме зад източника S непрозрачен кръгъл екран с радиус r_0 . Той закрива първите m зони на Френел

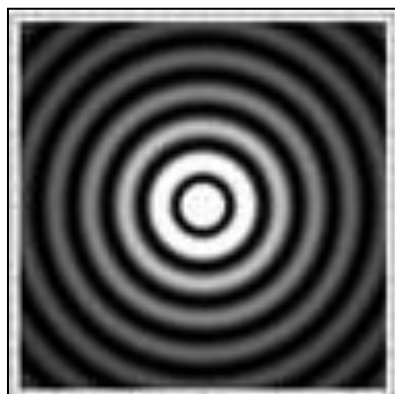
$$\text{В т. Р: } A(P) = A_{m+1} - A_{m+2} + A_{m+3} - \dots = \frac{A_{m+1}}{2} + \left(\frac{A_{m+1}}{2} - A_{m+2} + \frac{A_{m+3}}{2} \right) + \dots$$

Изразът в скобите е $\sim 0 \Rightarrow$

$$A(P) = \frac{A_{m+1}}{2}, \quad I(P) = \frac{1}{4} c \cdot A_{m+1}^2$$

$$\text{Ако } m \text{ е малко: } I_{\infty} = c \cdot \frac{1}{4} A_1^2$$

$A_{m+1} \approx A_1, \quad I(P) \approx I_{\infty}(P)$ - при отсъствие на преграда.



Дифракционната картина е редуващи се светли и тъмни концентрични кръгове. Винаги в центъра има светло петно – петно на Пуасон. То зависи от броя на френеловите зони.

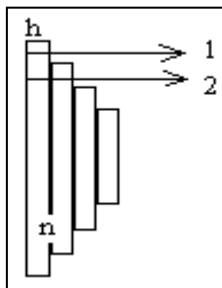
9. Зонални решетки

а) Амплитудна зонална пластина (решетка на Соре)

Трептенията от четните и нечетните зони на Френел са в противофаза \Rightarrow взаимно се отслабват. Ако на пътя на светлинната вълна се постави пластина, която закрива всички четни или нечетни зони, то интензитетът на светлината в т. Р силно нараства. Тази пластина се нарича амплитудно-зонална или решетка на Соре и действа подобно на събирателна леща.

б) фазова зонална пластина (решетка)

Още по-добър ефект се постига не чрез закриването на четните (нечетните) зони, а чрез изменение на фазата на четните спрямо нечетните с π . Това става чрез прозрачна пластина, чиято дебелина се изменя стъпаловидно, така, че фазовата разлика между съседните зони да се измени с π .



$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot h(n - n_0)$$
$$\pi = \frac{2\pi}{\lambda} h \cdot (n - 1) \Rightarrow h = \frac{\lambda}{2 \cdot (n - 1)}$$

Чрез подходящ избор на h и n се постига това равенство.

Това е стъпалчеста фазова зонална решетка. По сравнение с амплитудната зонална решетка, фазовата дава допълнително увеличение на амплитудата два пъти, а интензитета на светлината – се увеличава четири пъти.