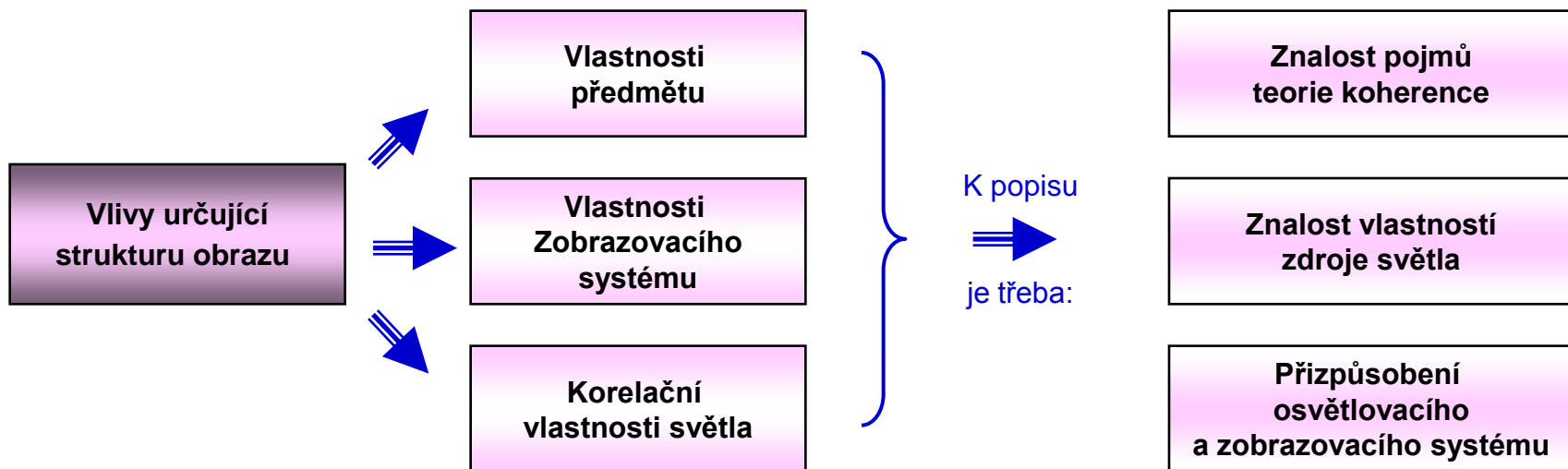
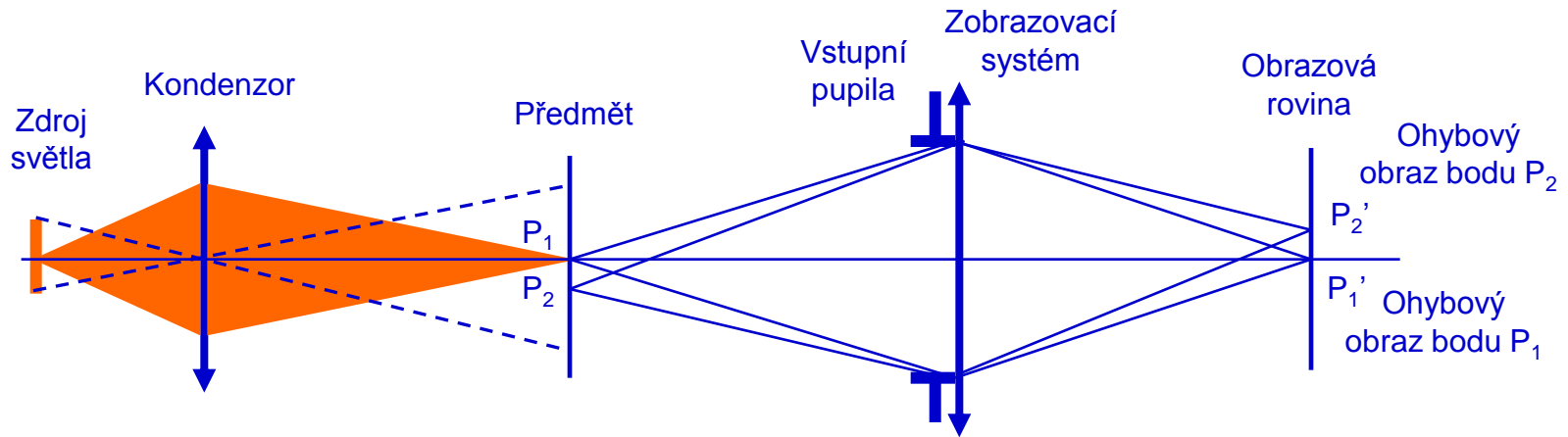


Zobrazování částečně koherentním světlem



Při zobrazování částečně koherentním světlem je nutné analyzovat optický řetězec tvořený osvětlovacím a zobrazovacím systémem. Rozlišovací schopnost řetězce závisí jen na koherenčních vlastnostech světla, které prosvětluje pozorovaný předmět a na optickém výkonu zobrazovacího systému. Optické vady osvětlovacího systému na rozlišovací schopnost nemají vliv.

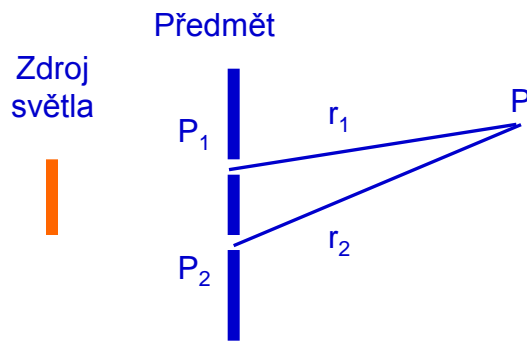
Kritické osvětlení



Osvětlení předmětu a vznik obrazu:

Zdroj monochromatického, prostorově nekoherentního záření je zobrazen do předmětové roviny a prosvětluje přitom pozorovaný předmět. Korelační vlastnosti světla vyslaného zdrojem se šířením vylepšují, takže záření v rovině předmětu je částečně koherentní. Jednotlivé body předmětu se stávají sekundárními zdroji a jsou optickým systémem zobrazeny. Bodům předmětu P_1 a P_2 pak odpovídají ohybové obrazce, které mají svá centra v paraxiálních obrazových bodech P_1' a P_2' . Velikost ohybových obrazců je určena geometrickými a optickými vlastnostmi zobrazovacího systému (v případě fyzikálně dokonalého systému jde o Airyho disk). Ohybové obrazce blízkých bodů se překrývají. Způsob jakým se signály sečtou závisí na míře koherence (sladění fáze) světla v odpovídajících bodech předmětu. Existují dva limitní případy: světlo je v uvažovaných bodech předmětu úplně korelované (koherentní) nebo úplně nekorelované (nekoherentní). Jsou-li předmětové body korelované, v obrazové rovině se sčítají komplexní amplitudy signálů v překrytých ohybových obrazcích. Výsledná intenzita je ovlivněna fázovým rozdílem signálů a říkáme, že ohybové obrazce interferují. V případě nekoherentních předmětových bodů se sčítají intenzity ohybových obrazců bez ohledu na fázi. V obecném případě jde o světlo částečně koherentní – výsledná intenzita překrytých ohybových obrazců je určena interferenčním zákonem pro částečně koherentní světlo.

Základní pojmy teorie koherence



E_P ... kompl. ampl. v bodě P
 E_j ... kompl. ampl. v bodě P_j

$$E_P(t) = E_1(t - t_1) + E_2(t - t_2)$$

$$t_1 = r_1 / c, \quad t_2 = r_2 / c$$

Intenzita zaznamenaná v bodě P:

$$I = \langle E_P(t) E_P^*(t) \rangle$$

Obvyklé předpoklady:

Signál je stacionární – děje nejsou závislé na posunutí v čase, $t - t_1 \rightarrow t$, $t - t_2 \rightarrow t + \tau$, $(t_1 - t_2 = \tau)$

Signál je ergodický – souborové středování lze nahradit středováním časovým (výsledek středování mnoha opakovaných realizací je stejný jako dostatečně dlouhé pozorování jediné realizace).

$$I = I_1 + I_2 + 2 \Re \{ \Gamma_{12}(\tau) \}$$

I_j ... intenzita, kterou do bodu P přispívá předmětový bod P_j, Γ_{12} ... funkce vzájemné koherence

Funkce vzájemné koherence:

$$\Gamma_{12}(\tau) = \langle E_1(t) E_2^*(t + \tau) \rangle$$

Vzájemná intenzita:

$$\Gamma_{12}(0) = \langle E_1(t) E_2^*(t) \rangle$$

Intenzita:

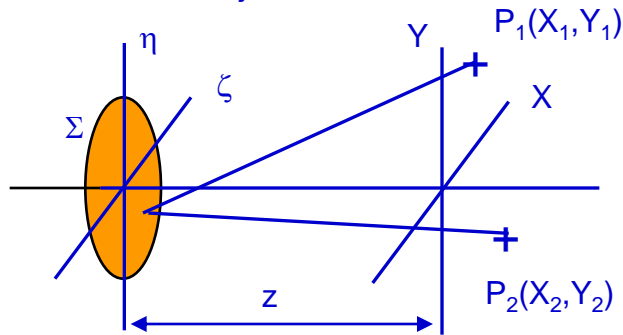
$$I_j \equiv \Gamma_{jj}(0) = \langle E_j(t) E_j^*(t) \rangle$$

Van Cittertův – Zernikeův teorém

Pro analýzu optického řetězce pro zobrazování částečně koherentním světlem je nutné vědět, jak se při šíření volným prostorem mění korelační vlastnosti světla vyzářeného kvazimonochromatickým prostorově nekoherentním zdrojem.

Tyto změny jsou dány Van Cittertovým – Zernikeovým teorémem.

Prostorově
nekoherentní zdroj



Intenzita zdroje: $I(\xi, \eta) \neq 0$ pro $(\xi, \eta) \in \Sigma$

$I(\xi, \eta) = 0$ pro $(\xi, \eta) \notin \Sigma$

Van Cittertův – Zernikeův teorém:

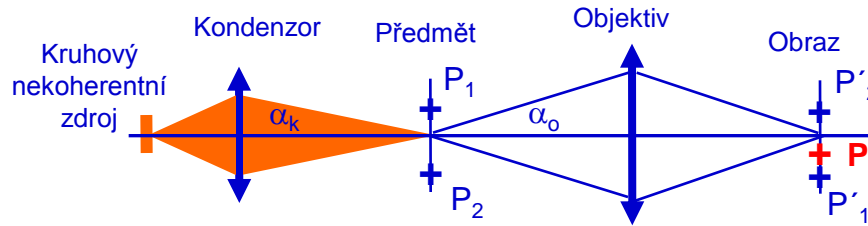
Stupeň koherence světla vyzářeného prostorově nekoherentním zdrojem je při jeho šíření prostorem určen jako Fourierova transformace intenzitního profilu zdroje.

Stupeň koherence v bodech P_1, P_2 :

$$\gamma(P_1, P_2) = \exp(i\psi) \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I(\xi, \eta) \exp[i2\pi(p\xi + q\eta)] d\xi d\eta}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I(\xi, \eta) d\xi d\eta}$$

$$p = \frac{X_1 - X_2}{z\lambda}, \quad q = \frac{Y_1 - Y_2}{z\lambda}, \quad \psi = \frac{\pi}{z\lambda} (X_2^2 - X_1^2 + Y_2^2 - Y_1^2)$$

Zobrazování systémem s kritickým osvětlením



Budeme-li body P_1 a P_2 předmětové roviny chápat jako bodové sekundární zdroje, pak za předpokladu fyzikálně dokonalého objektivu budou paraxiální obrazové body P'_1 a P'_2 centry difrakčně omezených obrazců (Airyho disků). Do bodu $P'(X, Y)$, který je blízký bodům $P'_1(X_1, Y_1)$ a $P'_2(X_2, Y_2)$ budou jednotlivé obrazy přispívat následující intenzitou:

Obraz zdroje je v rovině předmětu mnohem větší než Airyho disk odpovídající apertuře kondenzoru. Při této situaci je stupeň koherence v bodech P_1 a P_2 stejný jako kdyby byl předmět osvětlen prostorově nekoherentním zdrojem umístěným v rovině kondenzoru. Stupeň koherence v bodech P_1, P_2 pak lze určit přímým použitím Van Cittertova-Zernikeova teorému pro kruhový zdroj:

Intenzita, kterou předmětový bod P_j přispívá do bodu P'

$$I^{(j)}(P') = \left[\frac{2J_j(v_j)}{v_j} \right]^2, \quad j = 1, 2$$

$$v_j = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{(X - X_j)^2 + (Y - Y_j)^2} \sin \alpha_o$$

Stupeň koherence v bodech $P_1(X_1, Y_1), P_2(X_2, Y_2)$

$$\gamma(P_1, P_2) = \frac{2J_1(u_{12})}{u_{12}}$$

$$u_{12} = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2} \sin \alpha_k$$

Zobrazení dvojice bodů při kritickém osvětlení

Intenzita v bodu P' obrazové roviny (blízkém bodům P'₁ a P'₂) je určena jako superpozice příspěvků difrakčně omezených obrazů předmětových bodů P₁ a P₂. Způsob jakým se oba příspěvky složí závisí na stupni koherence v bodech P₁ a P₂. V obecném případě bude intenzita v bodu P' určena interferenčním zákonem pro částečně koherentní světlo.

Intenzita v obrazové rovině při zobrazení dvojice částečně koherentních bodů

$$I(P') = \left[\frac{2J_1(v_1)}{v_1} \right]^2 + \left[\frac{2J_2(v_2)}{v_2} \right]^2 + 2 \frac{2J_1(mv_{12})}{mv_{12}} \frac{2J_1(v_1)}{v_1} \frac{2J_2(v_2)}{v_2}$$

$$m = \frac{\sin \alpha_k}{\sin \alpha_o}, \quad v_{12} = \frac{u_{12}}{m} = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2} \sin \alpha_o$$

Speciální případy kritického osvětlení

Koherentní zobrazení

Je-li apertura kondenzoru velmi malá ($m \rightarrow 0$), pak předmětové body P₁ a P₂ jsou osvětleny koherentně a výsledná intenzita v bodu P' je dána jako:

$$I(P') = \left[\frac{2J_1(v_1)}{v_1} + \frac{2J_2(v_2)}{v_2} \right]^2$$

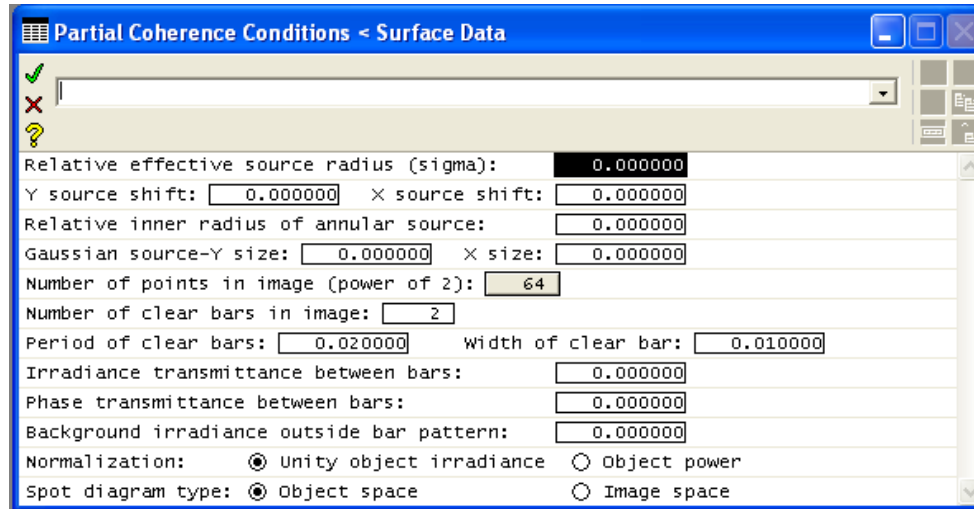
Nekoherentní zobrazení

Podmínky nekoherentního zobrazení jsou splněny pokud $m=1$ (apertury kondenzoru a objektivu jsou stejné) a v_{12} je nenulovým kořenem rovnice $J_1(v_{12})=0$ (vzdálenost obrazových bodů P'₁ a P'₂ je rovna poloměru některého z tmavých kroužků Airyho disku):

$$I(P') = \left[\frac{2J_1(v_1)}{v_1} \right]^2 + \left[\frac{2J_2(v_2)}{v_2} \right]^2$$

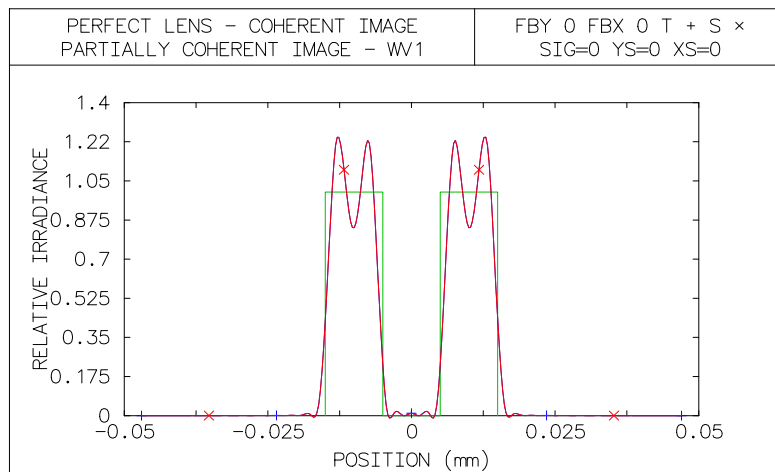
Simulace řetězce s kritickým osvětlením - OSLO

„Perfect Lens“ $f=100$, $NA=0.1$



Koherentní zobrazení

Relativní efektivní poloměr zdroje (sigma) = 0



Nekoherentní zobrazení

Relativní efektivní poloměr zdroje (sigma) > 2

