

Interferenční mikroskopie

J. Kuběna

ÚFKL Přírodovědecká fakulta Masarykovy University

kubena@physics.muni.cz

Učební pomůcka ke studiu optiky, verze 6

Úvod

Následující série obrázků je zaměřena na objasnění funkce interferenčních mikroskopů, jimiž lze **vyvolat umělý kontrast struktury preparátu**. U mikroskopu na **odraz** (Zeiss - Epival) jde o strukturu povrchového reliéfu, u mikroskopu na **průchod** (Zeiss - Peraval) může jít i o strukturu indexu lomu v objemu preparátu při jeho konstantní tloušťce.

V teoretické části presentace je na základě numerických výpočtů interferenční intenzity při dvoupaprskové interferenci demonstrován vliv koherenčních vlastností interferujících paprsků na rozložení intenzity v zorném poli mikroskopu.

V experimentální části, jsou na digitálních mikrofotografiích z mikroskopu demonstrovány jevy, s nimiž se setkáme zejména při seřizování mikroskopů. Grafy interferenční intenzity jsou zde výsledkem softwarové analýzy digitálního obrázku.

Tato presentace navazuje pojmový aparát užívaný v přednášce **Principy moderních optických zobrazovacích metod** a je zaměřena na praktickou obsluhu mikroskopů.

Schéma mikroskopu na odraz - Epival

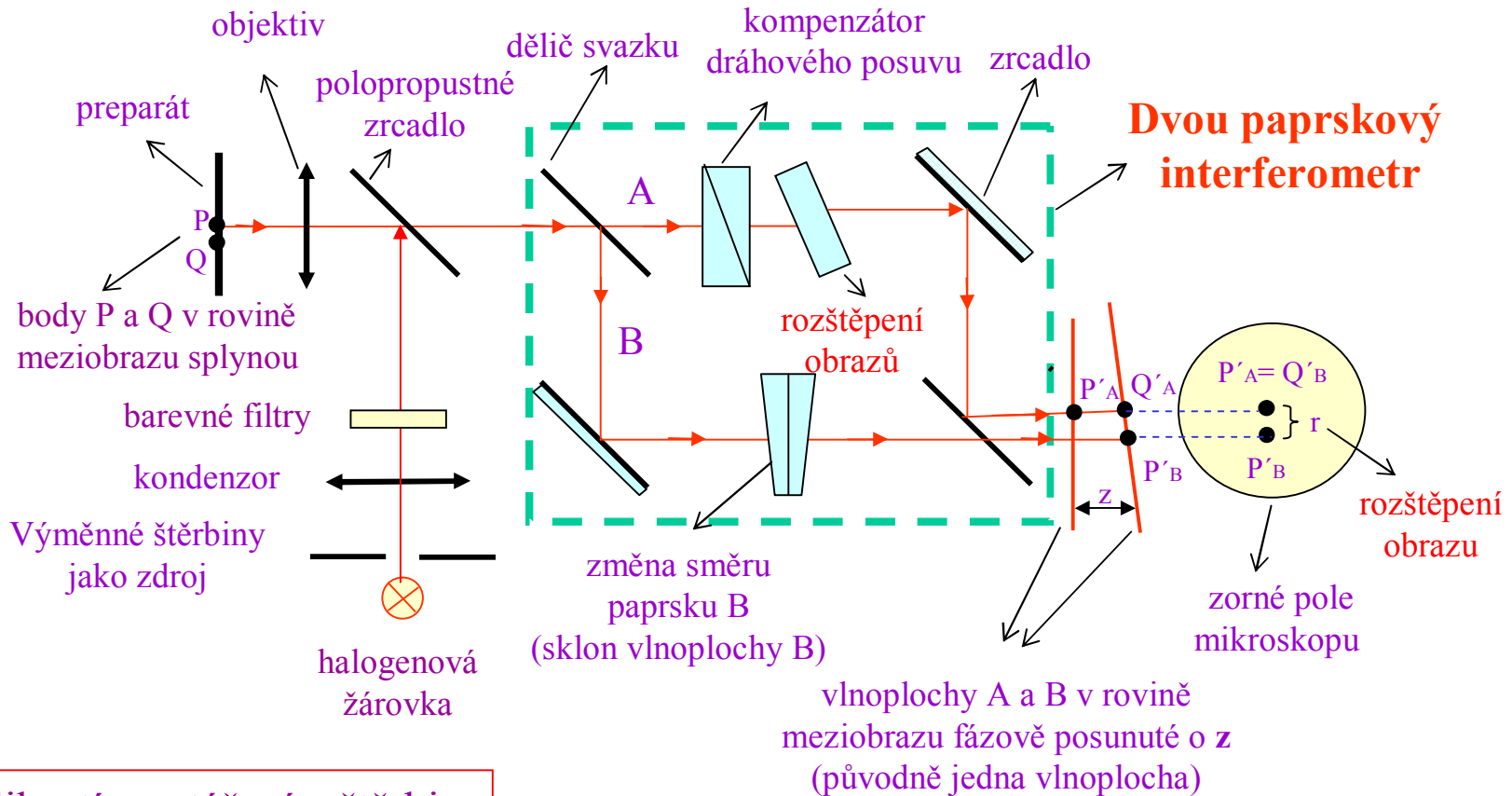
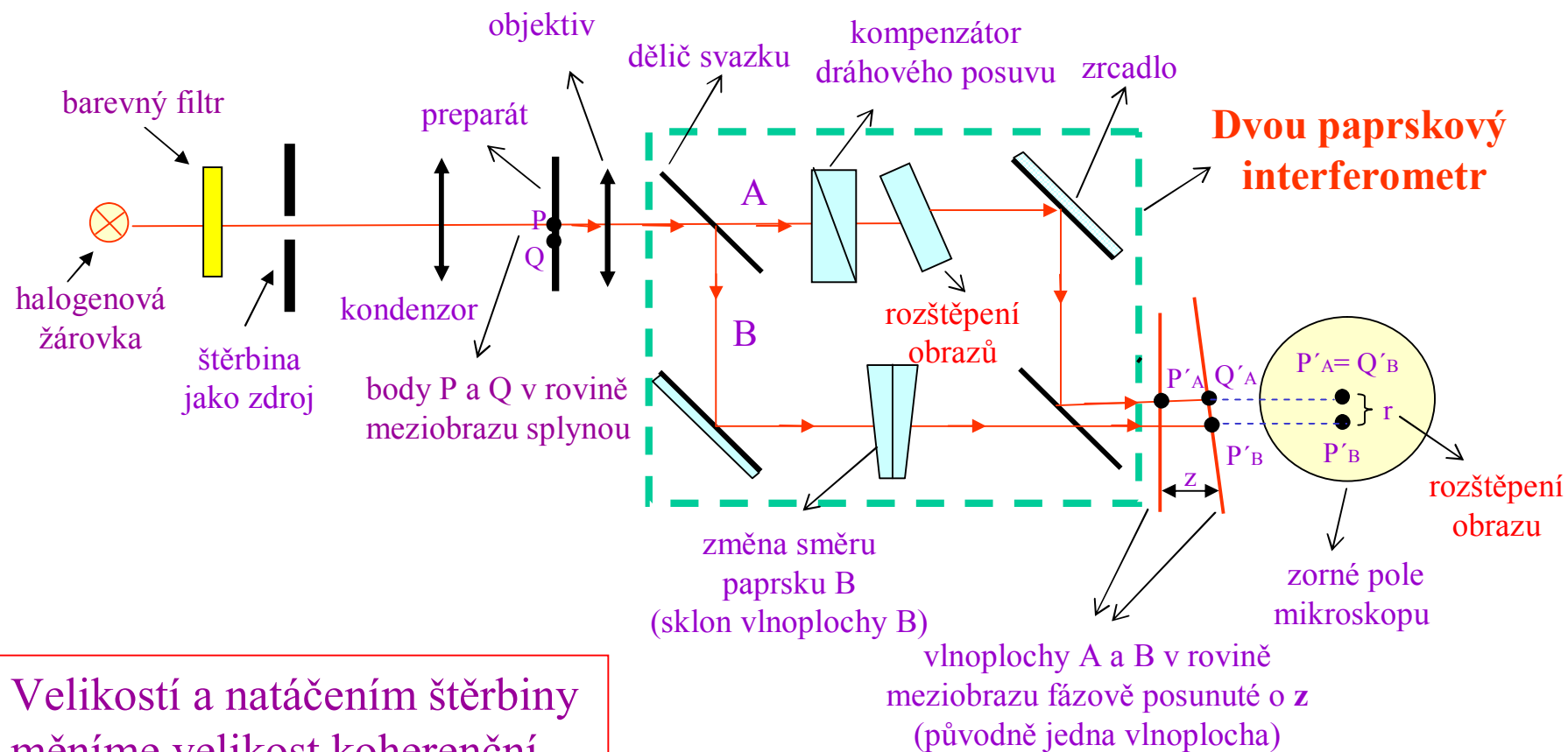


Schéma mikroskopu na průchod - Peraval



Velikostí a natáčením štěrbinu měníme velikost koherenční šířky v rovině meziobrazu

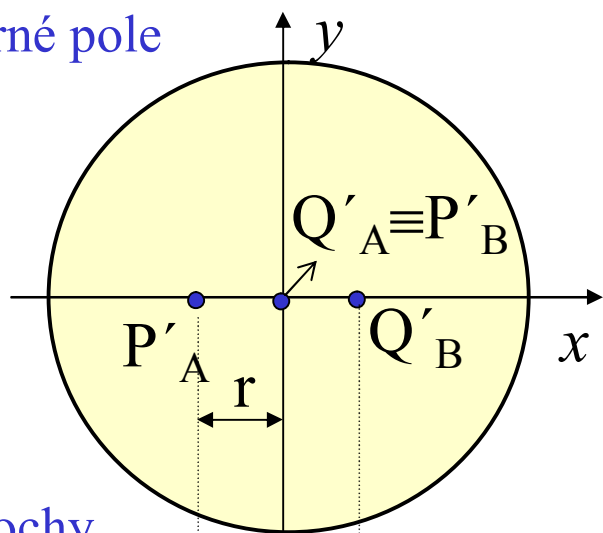
Teoretická část:

Dvoupaprsková interference

Interferenční intenzita

$$I(x, \alpha) = I_A + I_B + 2\gamma_t \gamma_s \sqrt{I_A I_B} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} z\right)$$

Zorné pole



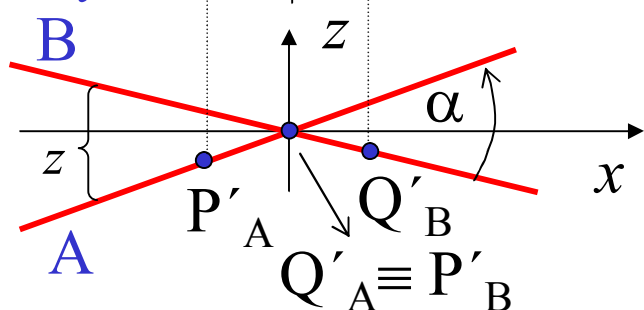
Vztah dráhového rozdílu z a souřadnice x

$$z = 2x \tan(\alpha / 2)$$

Stupeň časové koherence

$$\gamma_t(x, \delta) = \exp(-x^2 / 4\delta^2)$$

vlnoplochy

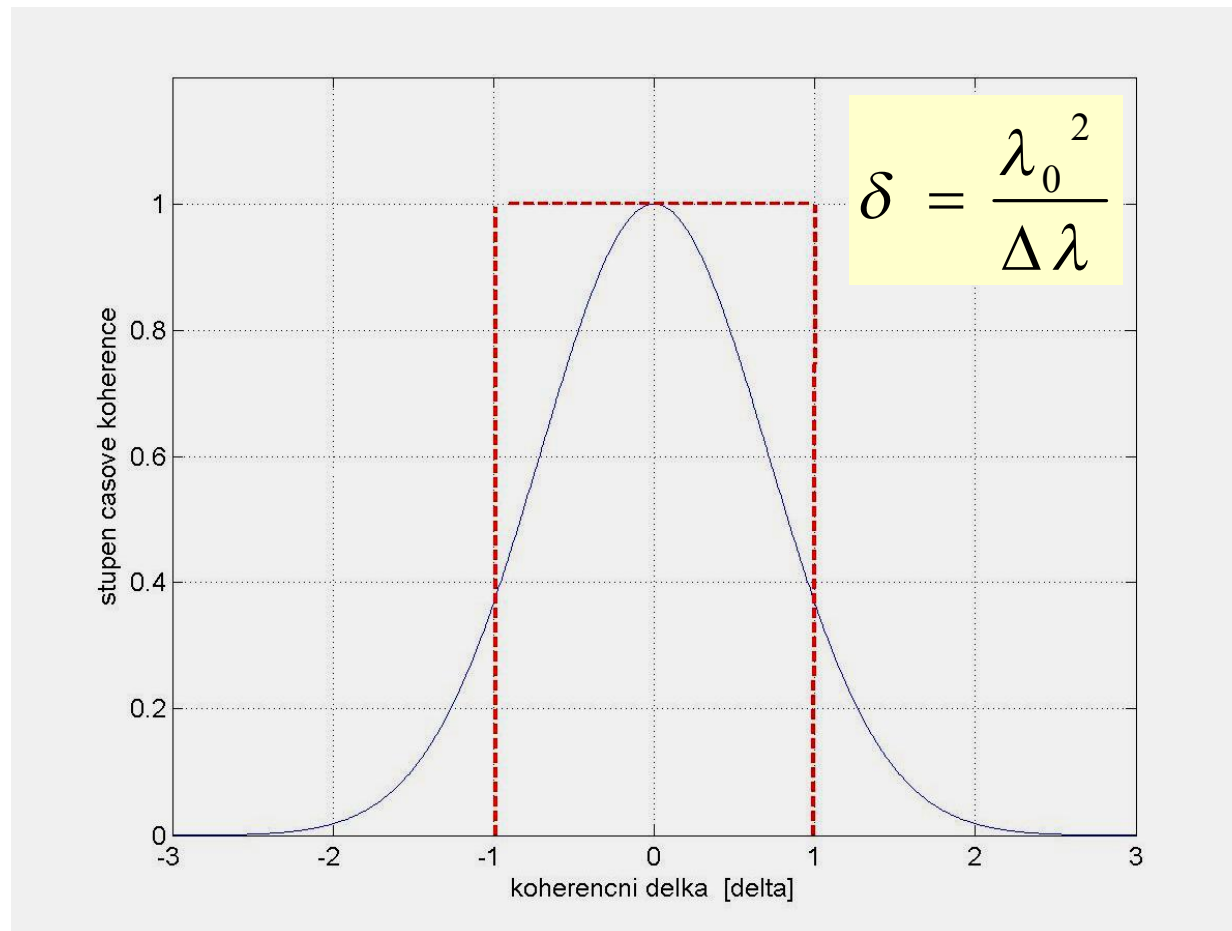


Stupeň prostorové koherence

$$\gamma_s(r, \beta) = \frac{\sin(\pi r / \beta)}{\pi r / \beta}$$

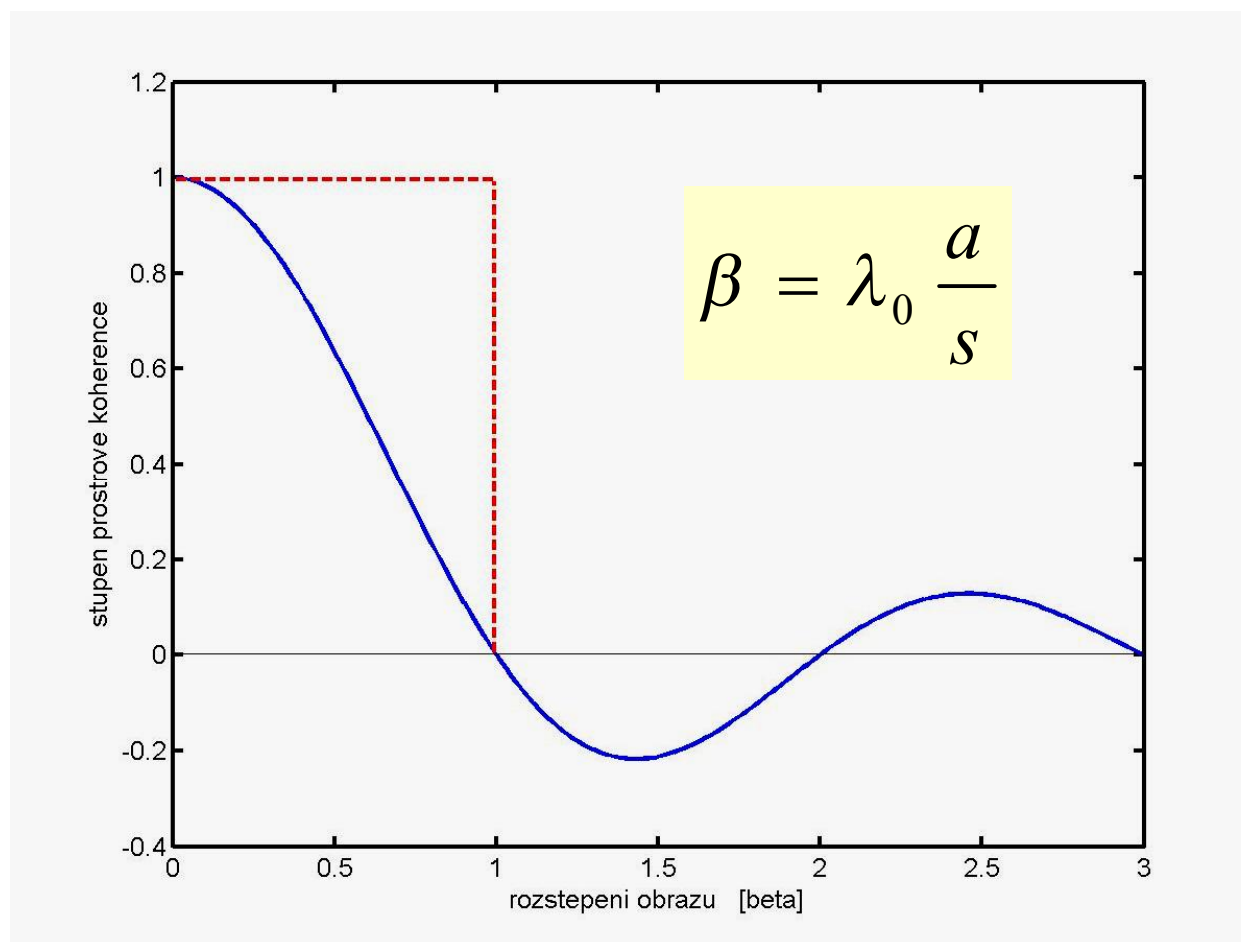
Stupeň časové koherence

Závislost stupně časové koherence na dráhovém rozdílu měřeném v jednotkách koherenční délky δ



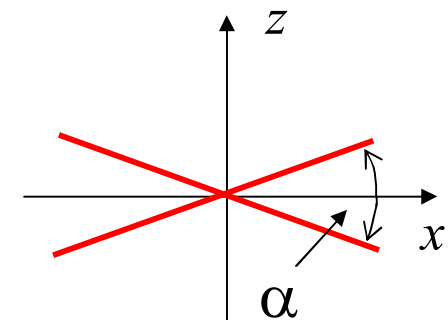
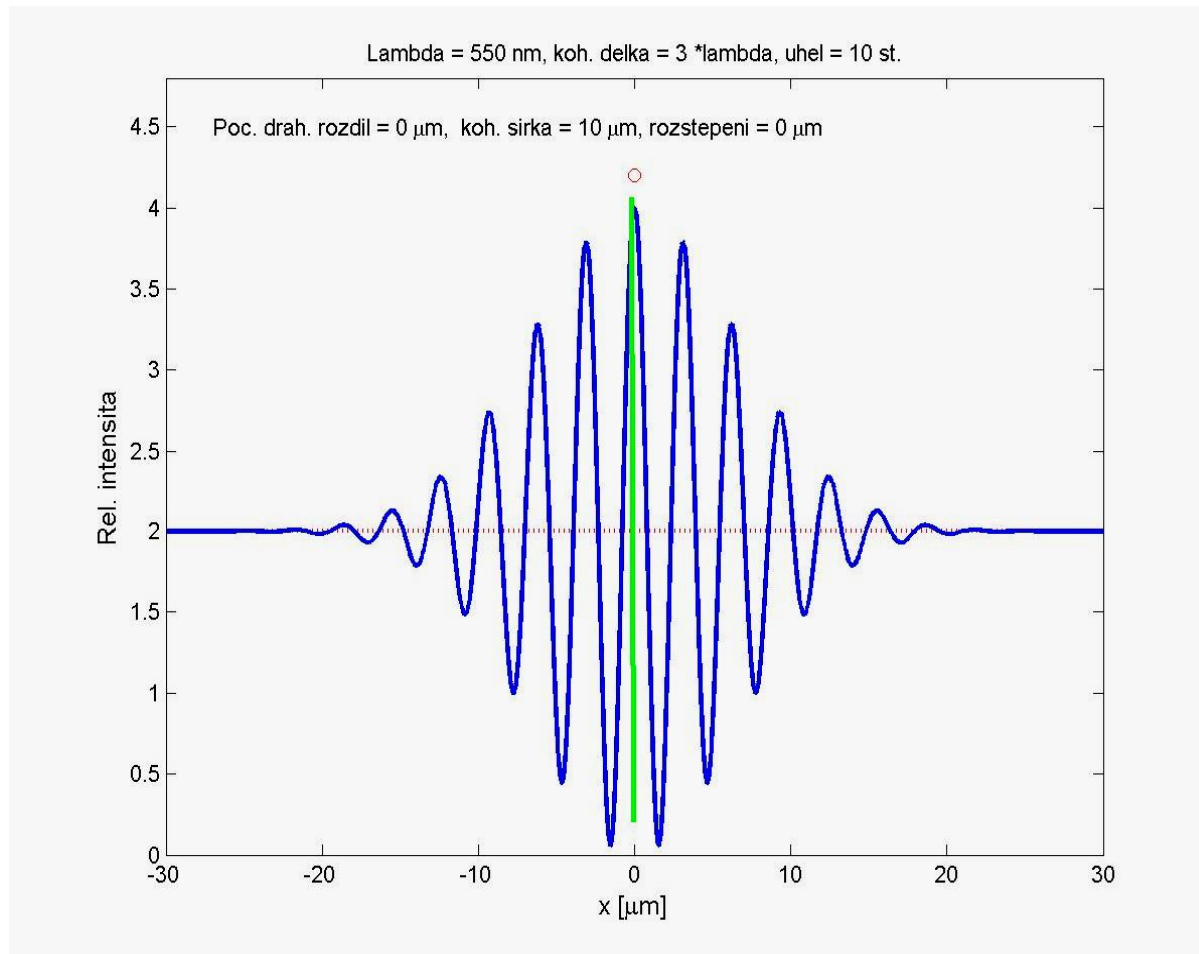
Stupeň prostorové koherence

Závislost stupně prostorové koherence na rozštěpení r
měřeném v jednotkách koherenční šířky β



Úhel vlnoploch $\alpha = 10^\circ$

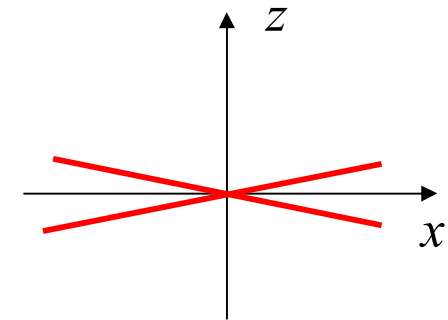
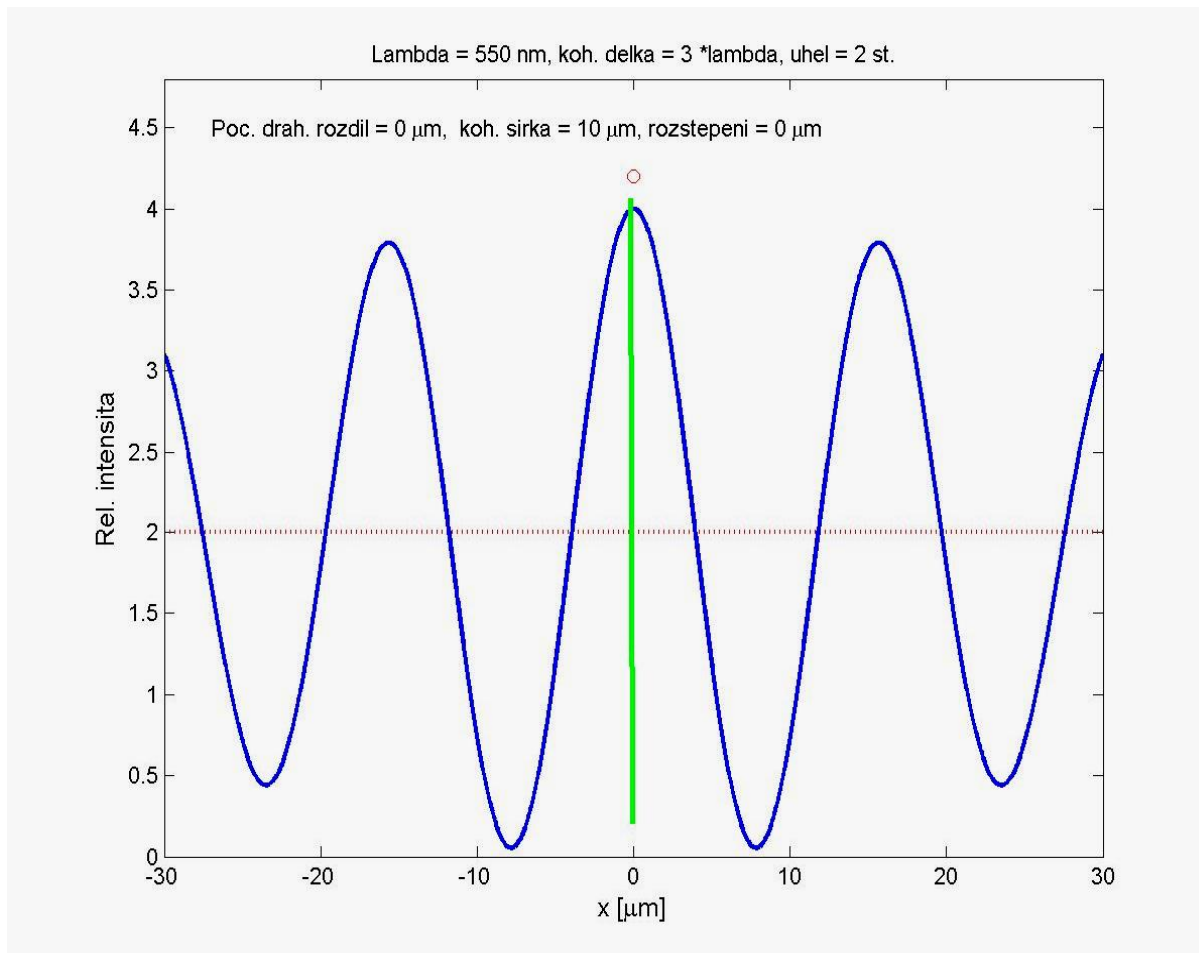
Závislost interferenční intenzity na souřadnici x pro uvedené parametry



Velký úhel způsobuje rychlé střídání maxim intenzity, malá koherenční délka (bílé světlo) pak jejich rychlý pokles.

Úhel vlnoploch $\alpha = 3^\circ$

Závislost interferenční intenzity na souřadnici x pro uvedené parametry

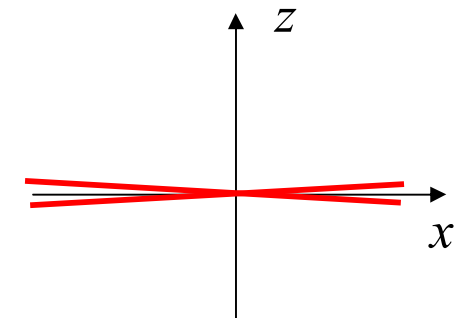
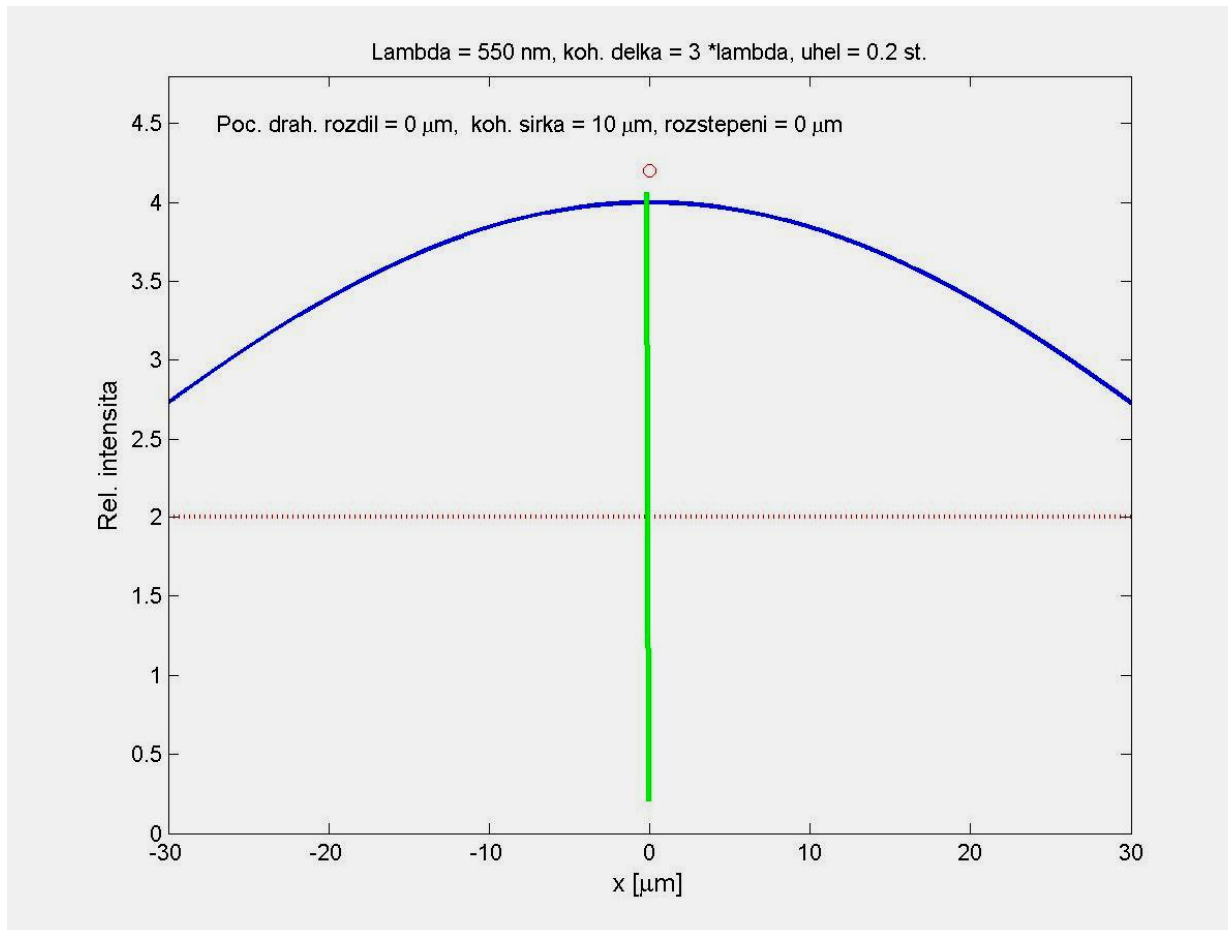


Malý úhel mezi vlnoplochami způsobí pomalé střídání maxim intenzity.

Rozštěpení obrazů je v grafech je vyznačeno červenými kroužky u intenzitní osy. Jeden kroužek znamená, že rozštěpení je nulové.

Úhel vlnoploch $\alpha = 0.2^\circ$

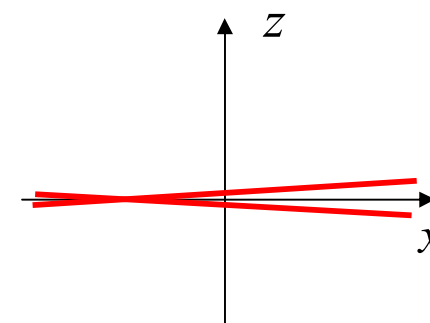
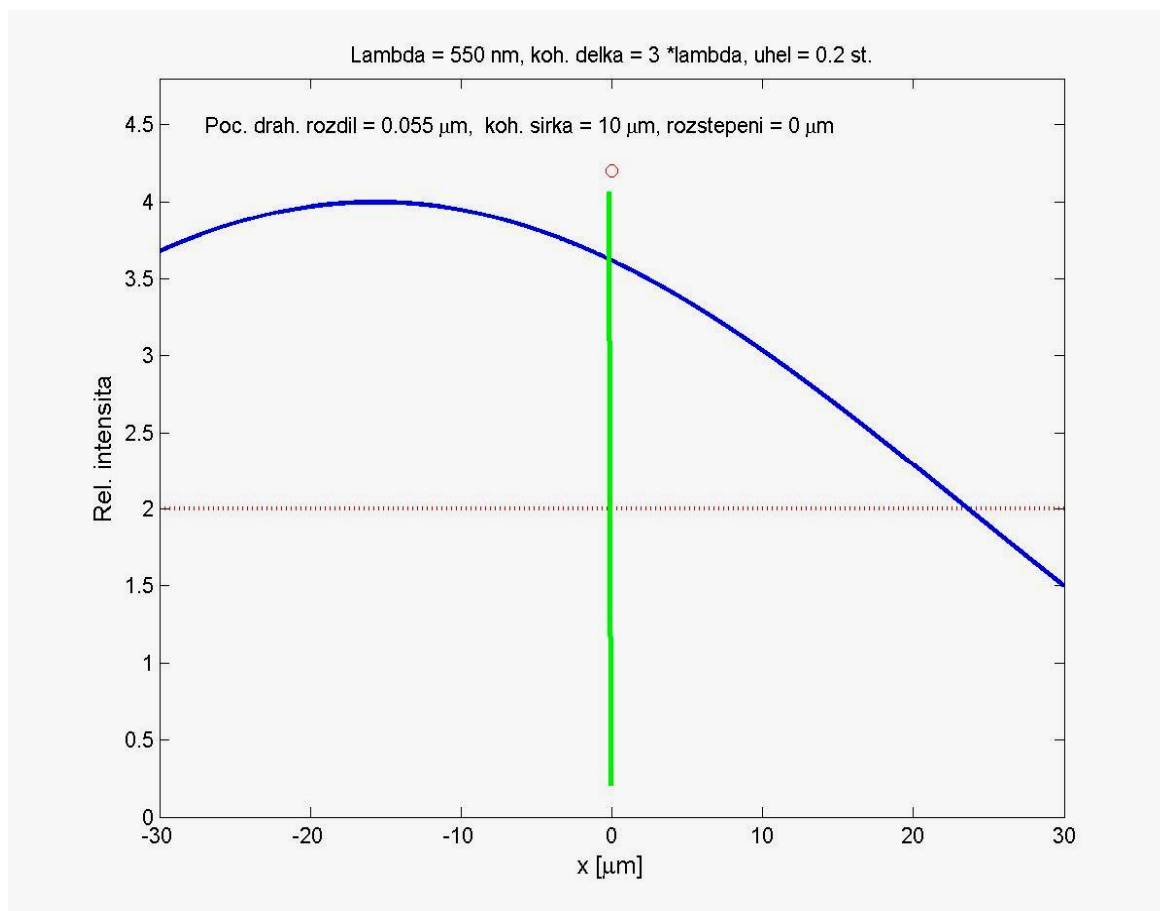
Závislost interferenční intenzity na souřadnici x pro uvedené parametry



Vlnoplochy jsou téměř rovnoběžné, intenzita k okrajům zorného pole klesá (v bílém světle nemá stejnou barvu).

Dráhový posuv pro x_0 je 0.1λ

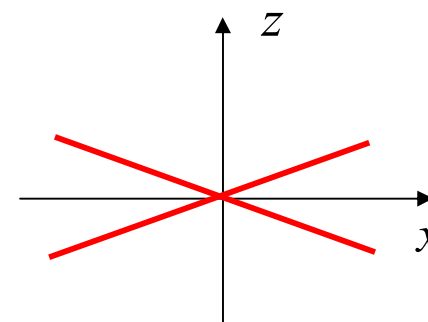
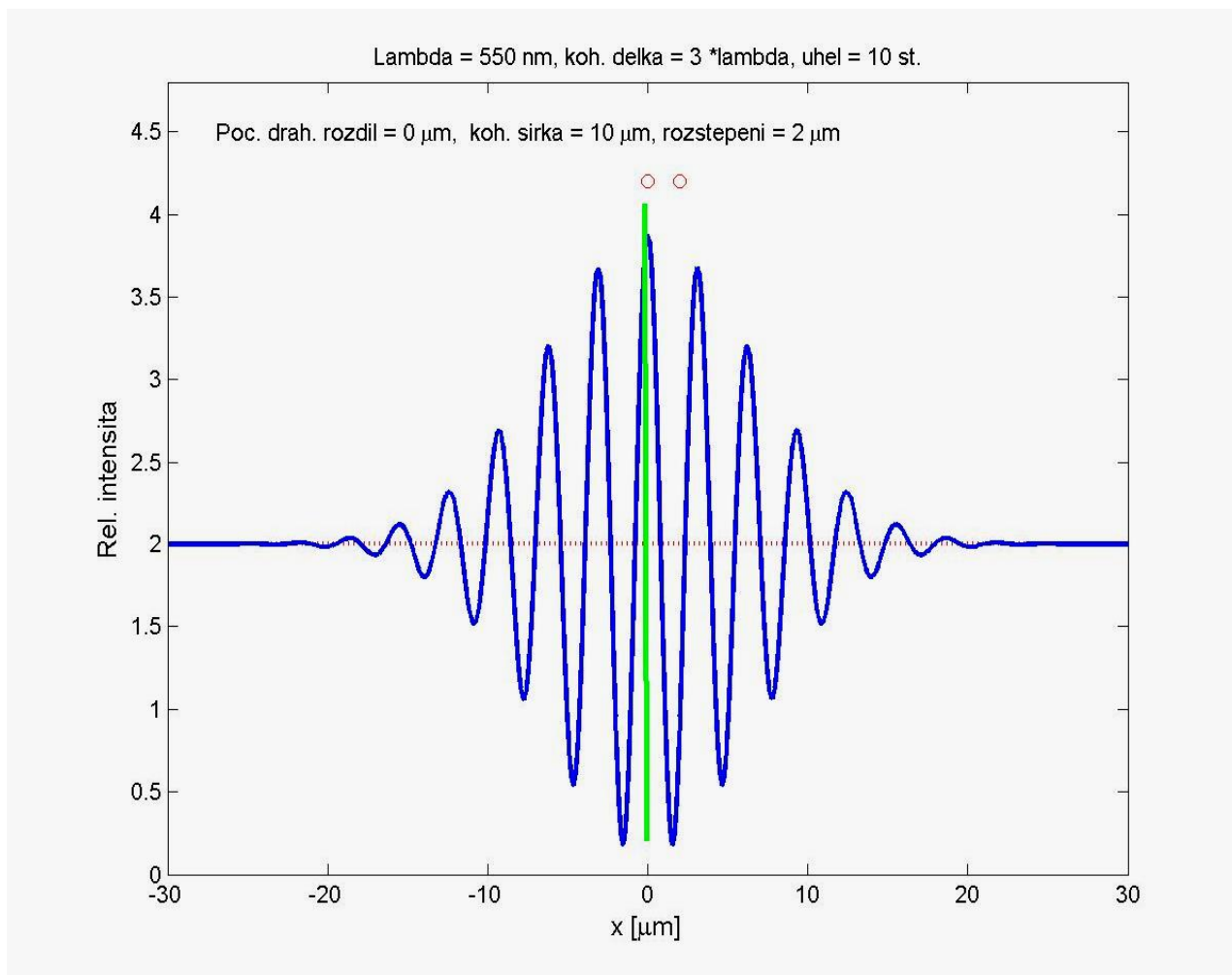
Závislost interferenční intenzity na souřadnici x pro uvedené parametry



Vlnoplochy se protínají mimo střed zorného pole. Rozštěpení obrazů zde a na předchozích grafech bylo nulové. Stupeň prostorové koherence byl roven 1.

$$\alpha = 10^\circ, \beta = 10 \mu\text{m}, r = 2 \mu\text{m}$$

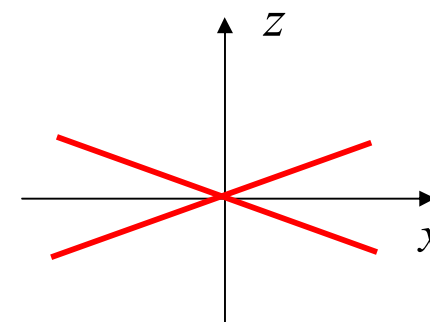
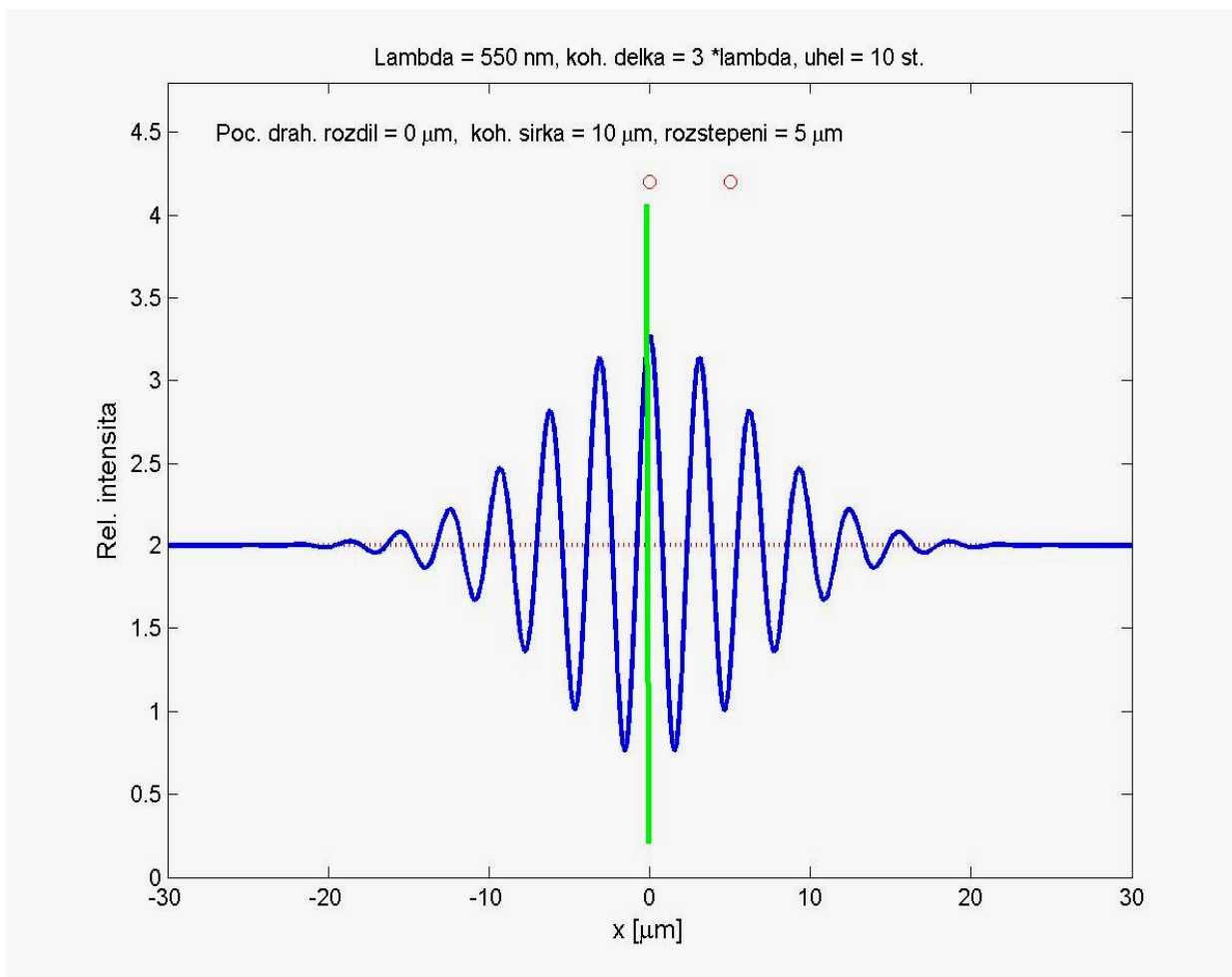
Závislost interferenční intenzity na souřadnici x pro uvedené parametry



Rozštěpení obrazů je zde 2 mikrometry, stupeň prostorové koherence klesá. V porovnání s grafem na str. 8, maximum intenzity kleslo.

$$\alpha = 10^\circ, \beta = 10 \mu\text{m}, r = 5 \mu\text{m}$$

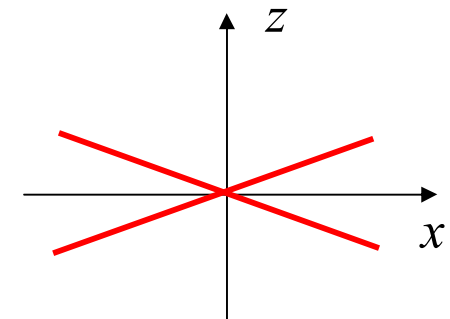
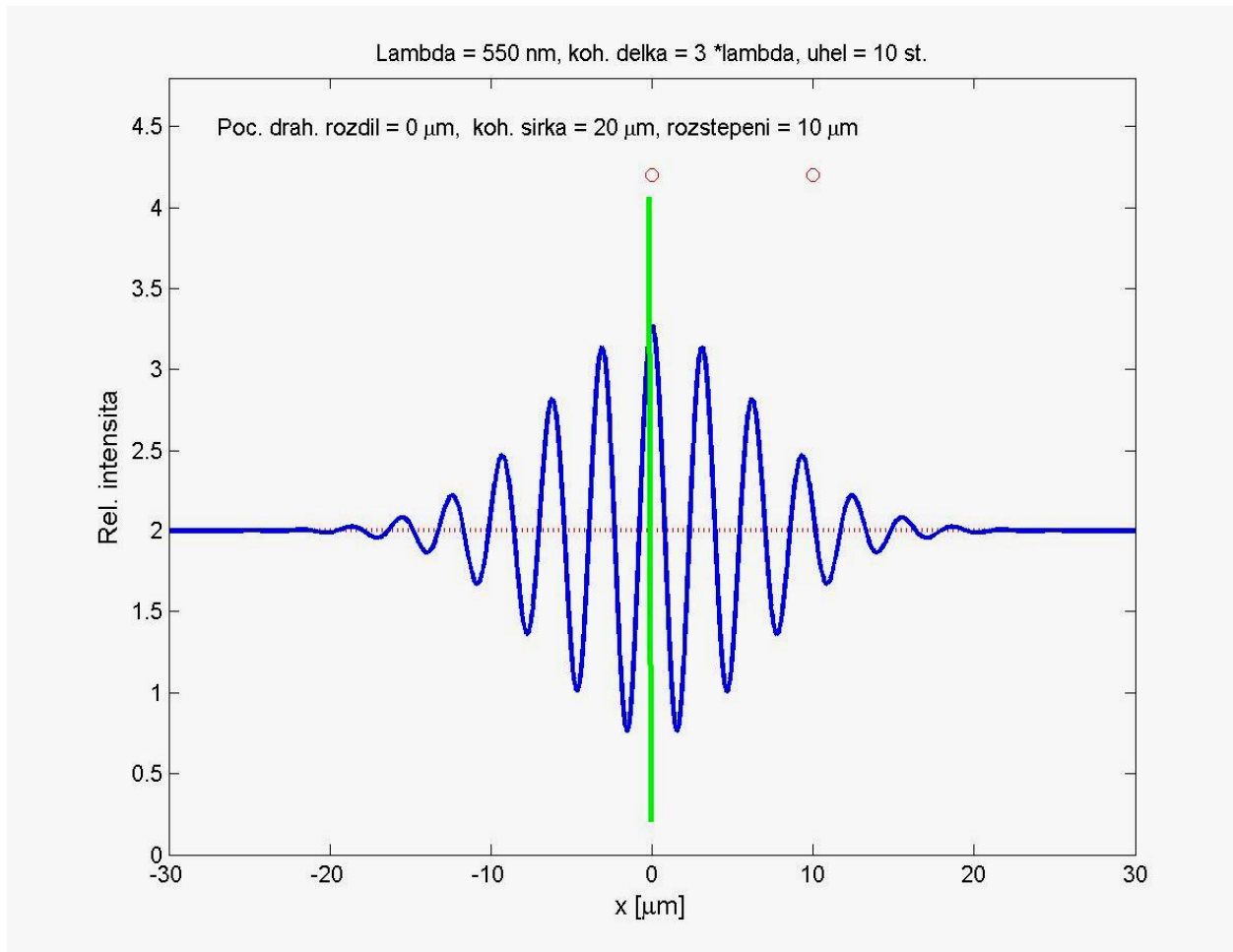
Závislost interferenční intenzity na souřadnici x pro uvedené parametry



Rozštěpení 5 mikrometrů, maximum intenzity dále kleslo, protože stupeň prostorové koherence se s rostoucím rozštěpením dále zmenšuje.

$$\alpha = 10^\circ, \quad \beta = 20 \mu\text{m}, \quad r = 10 \mu\text{m}$$

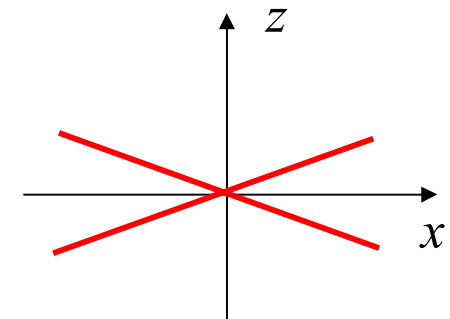
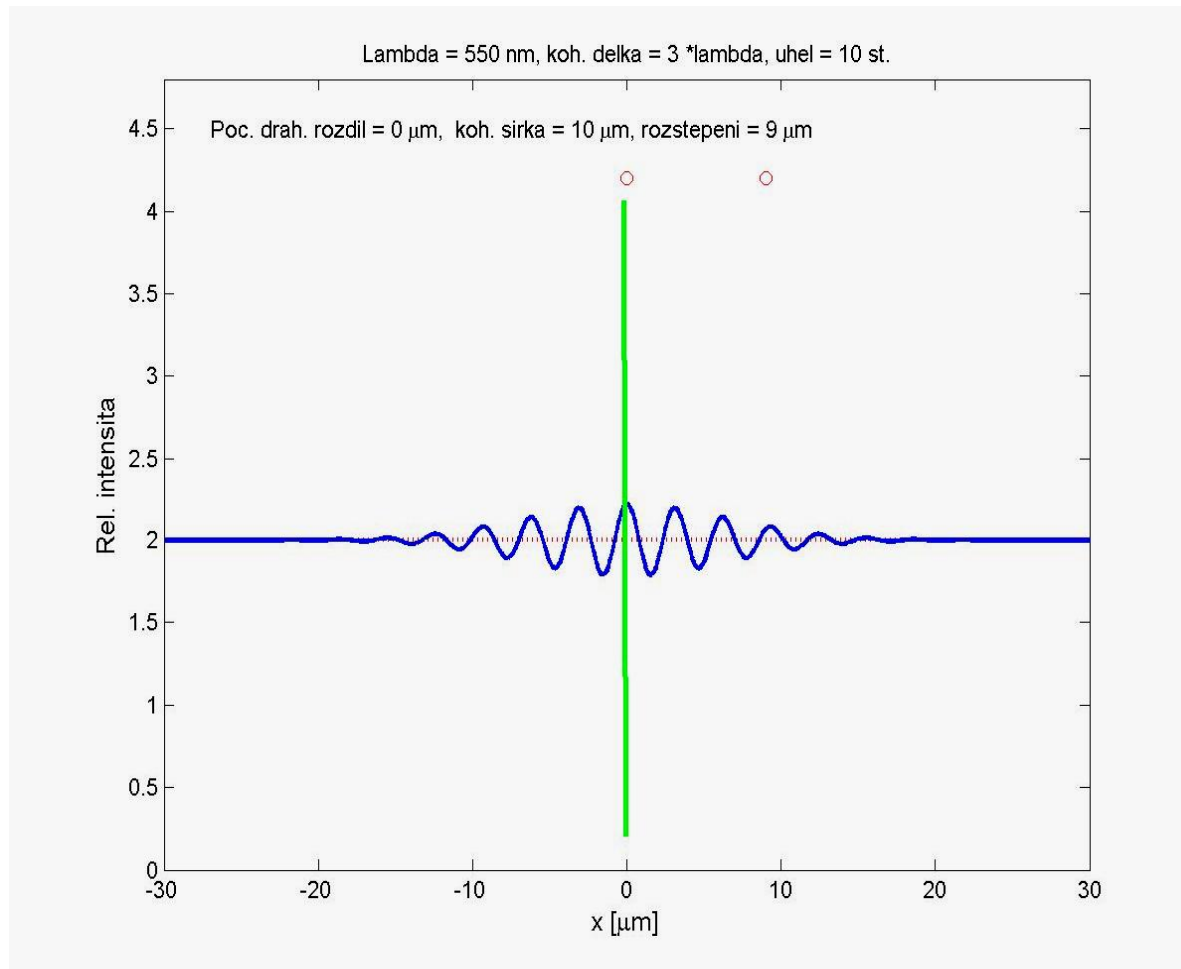
Závislost interferenční intenzity na souřadnici x pro uvedené parametry



Rozložení intenzity je stejné, jako na předchozím grafu přes to, že rozštěpení se zdvojnásobilo. Je to tím, že jsme koherenční šířku také zdvojnásobili.

$$\alpha = 10^\circ, \beta = 10 \mu\text{m}, r = 9 \mu\text{m}$$

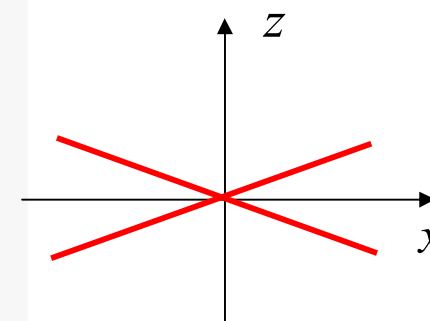
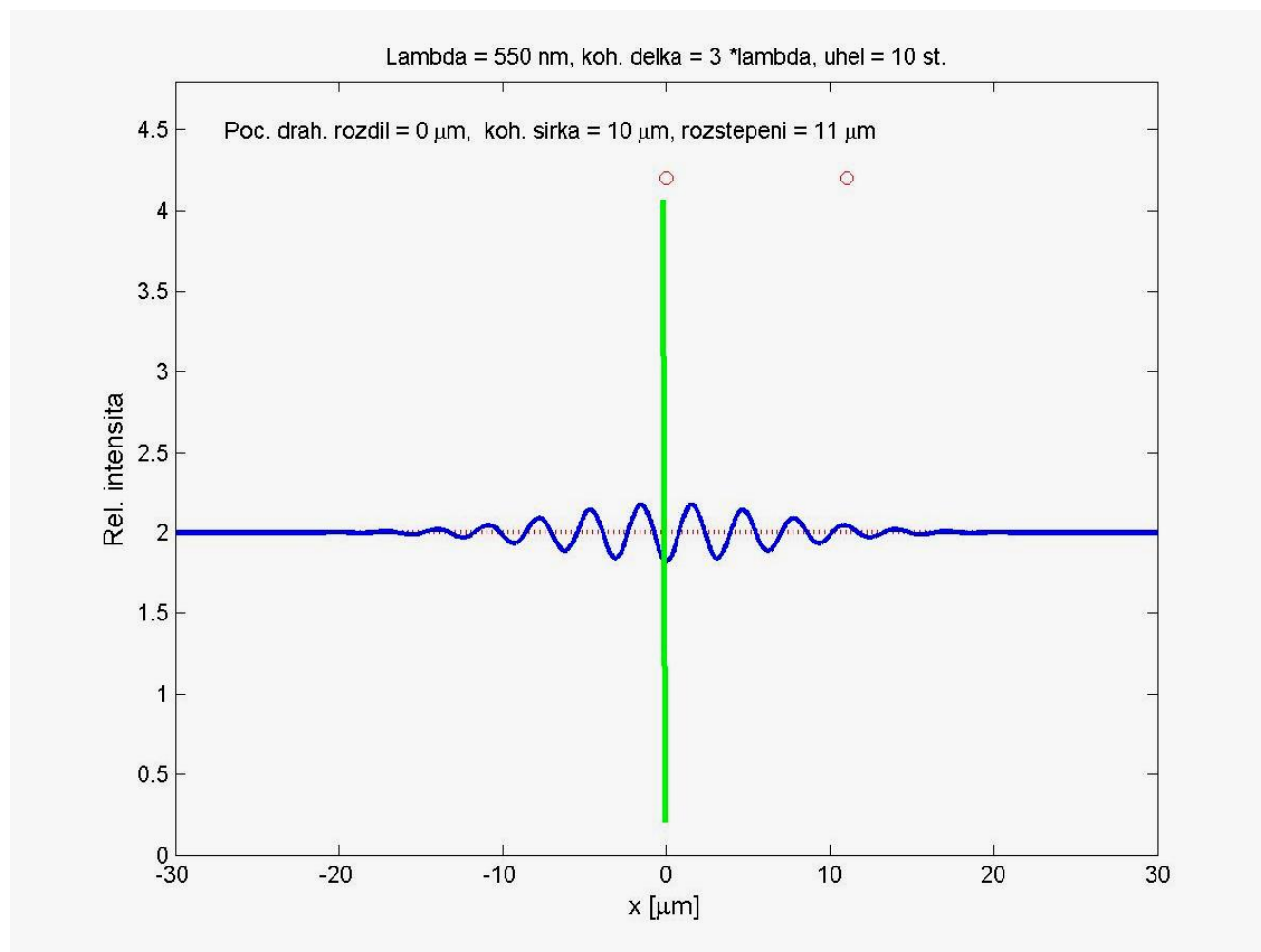
Závislost interferenční intenzity na souřadnici x pro uvedené parametry



Interferenční jev má malou **viditelnost**. Je to tím, že koherenční šířka je jen o málo větší než rozštěpení. Uprostřed zorného pole je ale stále maximum interferenčního jevu.

$$\alpha = 10^\circ, \beta = 10 \mu\text{m}, r = 11 \mu\text{m}$$

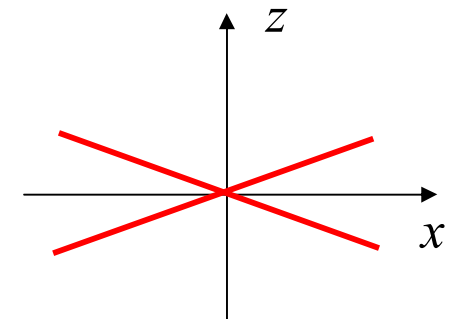
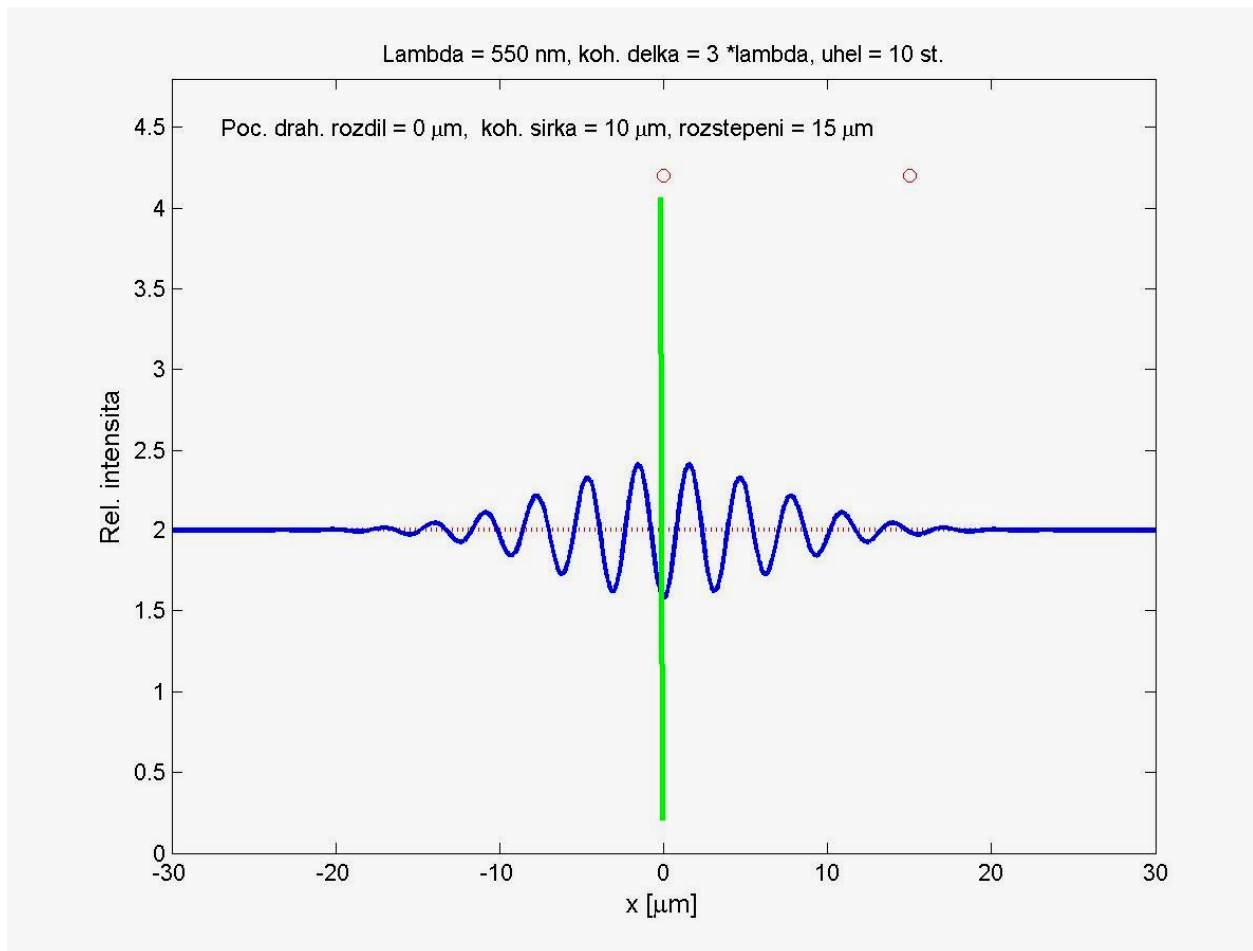
Závislost interferenční intenzity na souřadnici x pro uvedené parametry



Zde je rozštěpení jen o málo větší než je koherenční šířka. Stupeň prostorové koherence je v tomto případě záporný, a proto je uprostřed minimum.

$$\alpha = 10^\circ, \beta = 10 \mu\text{m}, r = 15 \mu\text{m}$$

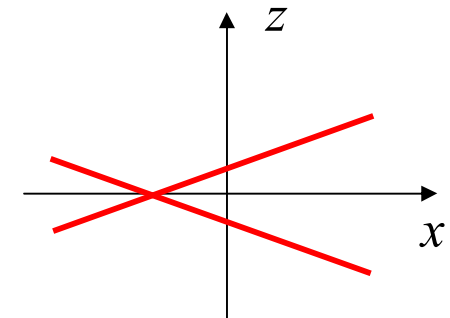
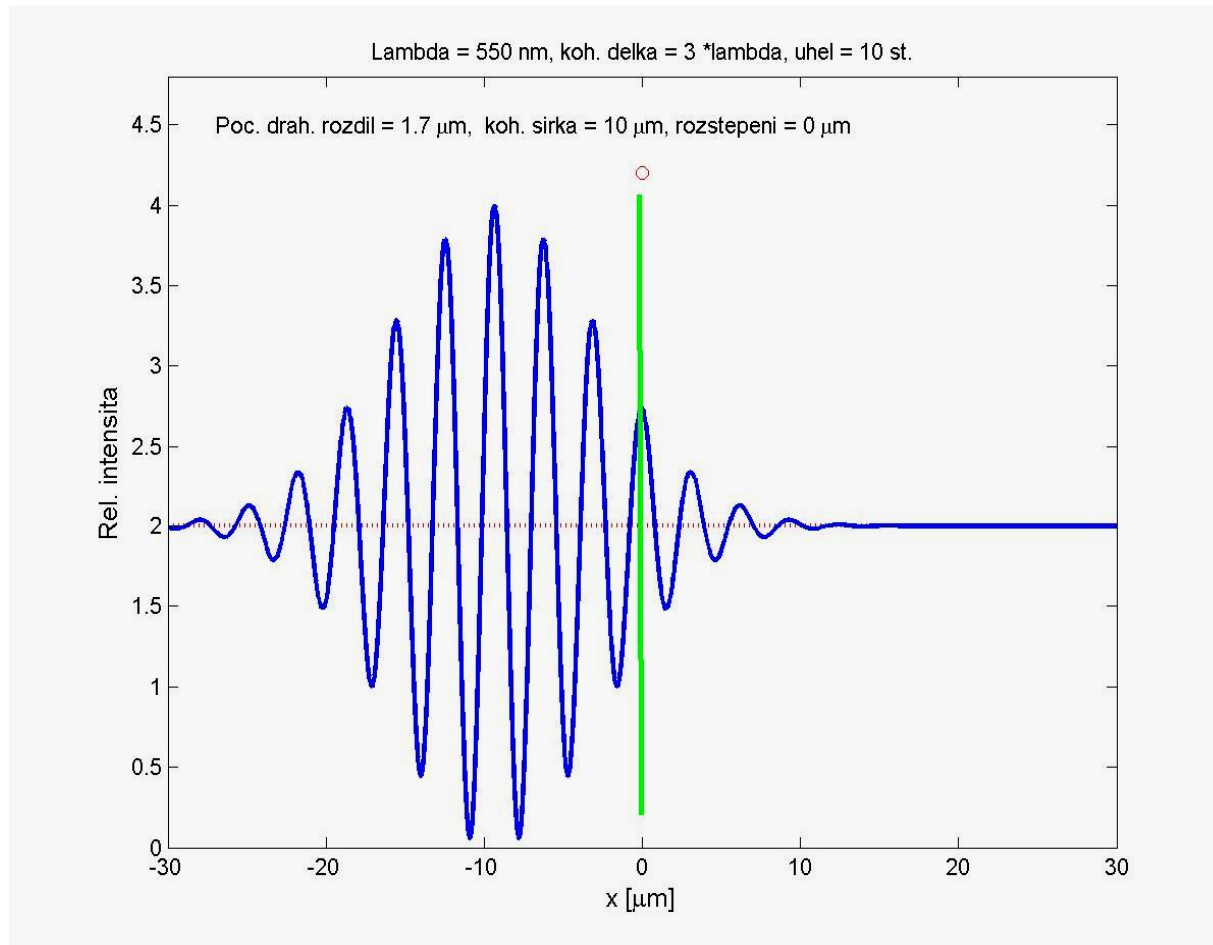
Závislost interferenční intenzity na souřadnici x pro uvedené parametry



Minimum uprostřed zůstává, interference má lepší viditelnost přes to, že rozštěpení dále vzrostlo. Stupeň prostorové koherence je asi -0.14 .

$$\delta = 3\lambda, \quad z_0 = 3\lambda, \quad r = 0 \mu\text{m}$$

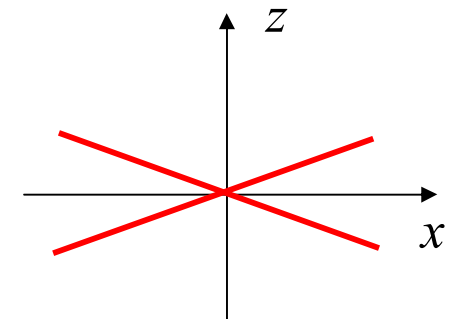
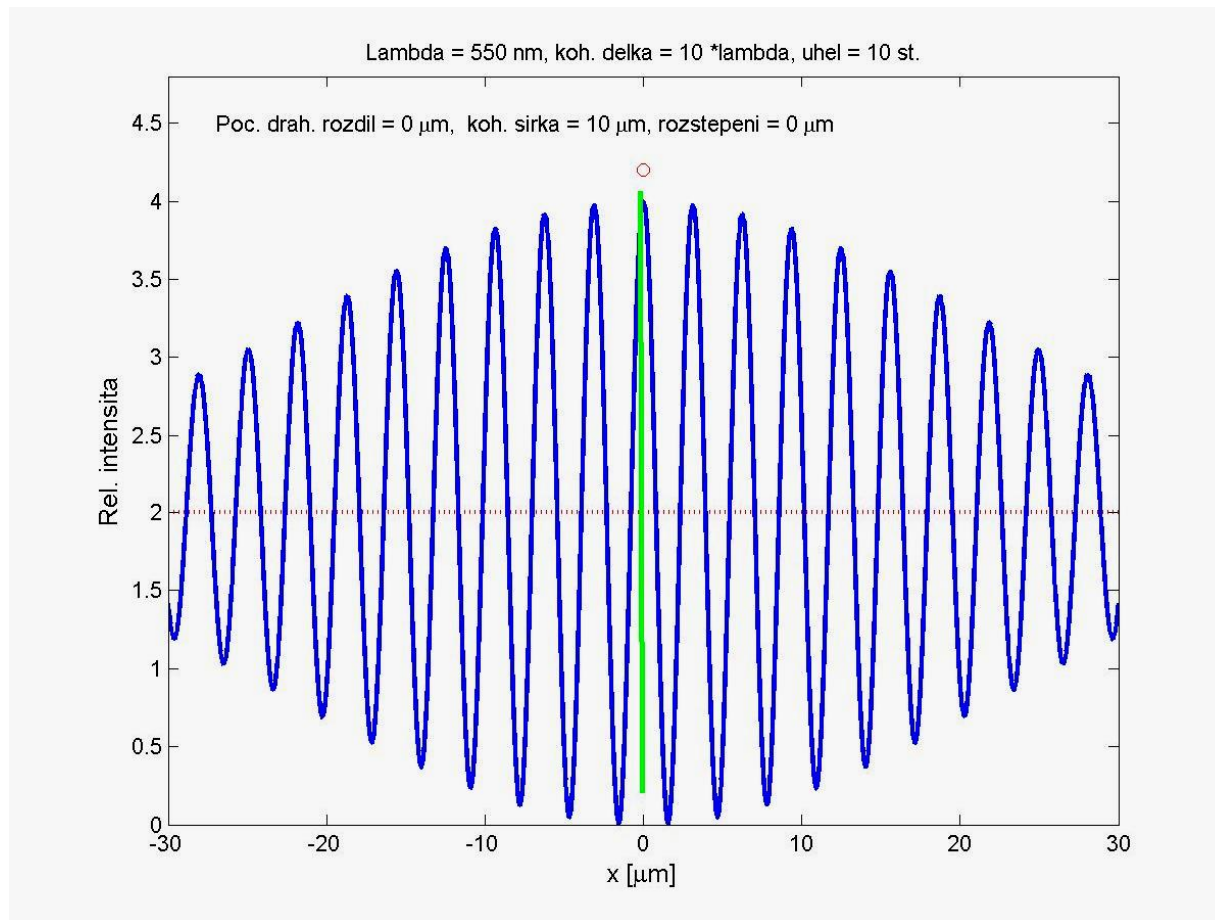
Závislost interferenční intenzity na souřadnici x pro uvedené parametry



Maximum interferenčního jevu leží mimo střed zorného pole. Posuvem jedné vlnoplochy nastavíme maximum opět do středu.

$$\delta = 10\lambda, \quad z_0 = 3\lambda, \quad r = 0 \mu\text{m}$$

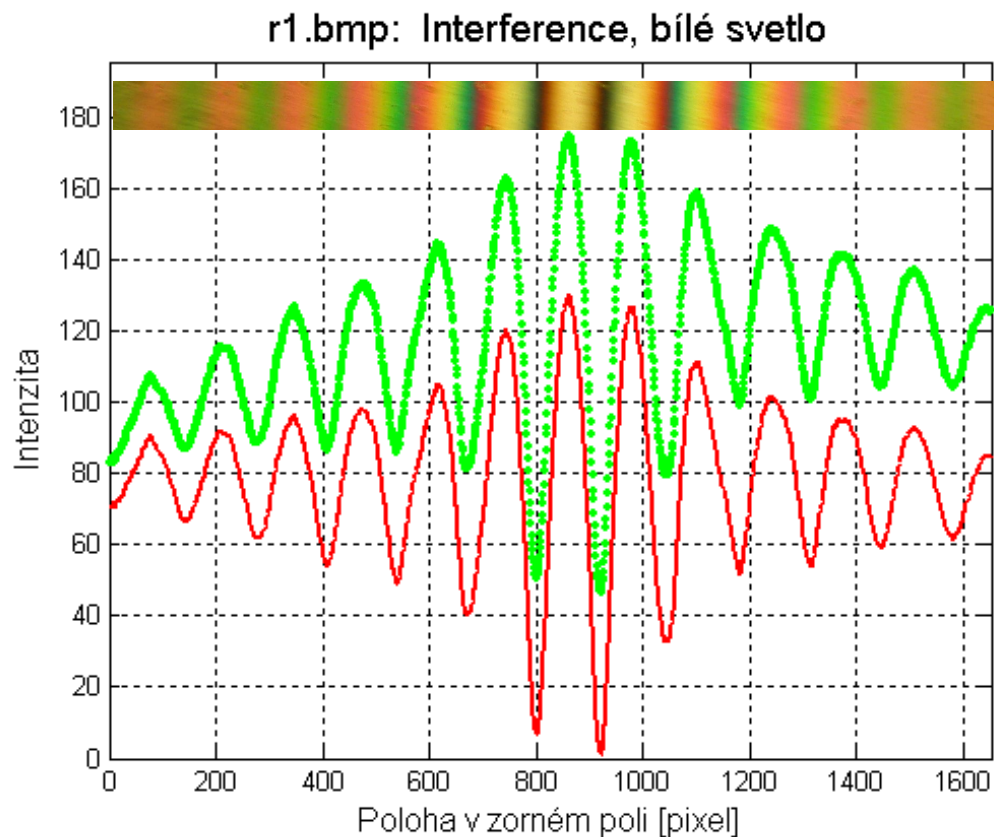
Závislost interferenční intenzity na souřadnici x pro uvedené parametry



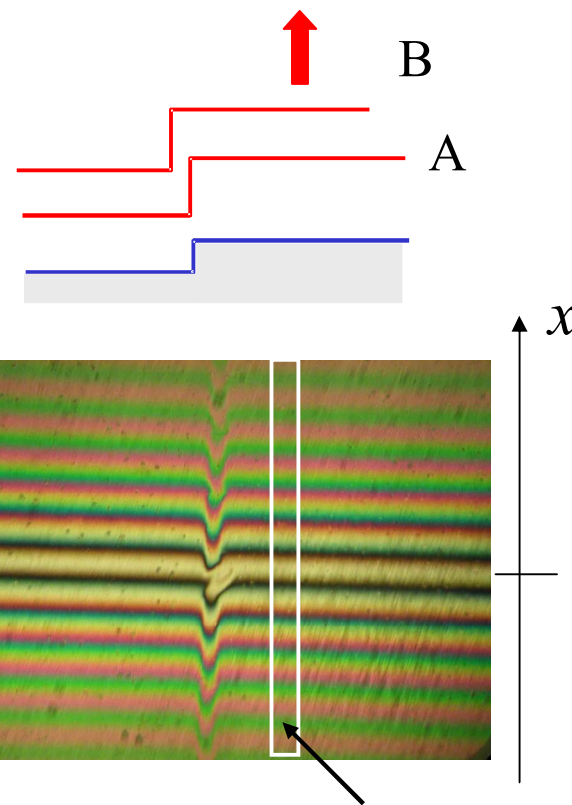
Velký počet maxim v zorném poli je důsledek velké koherenční délky (zařazení žlutého filtru).

Experimentální část:

Hrana tenké vrstvy, malé rozštěpení obrazu

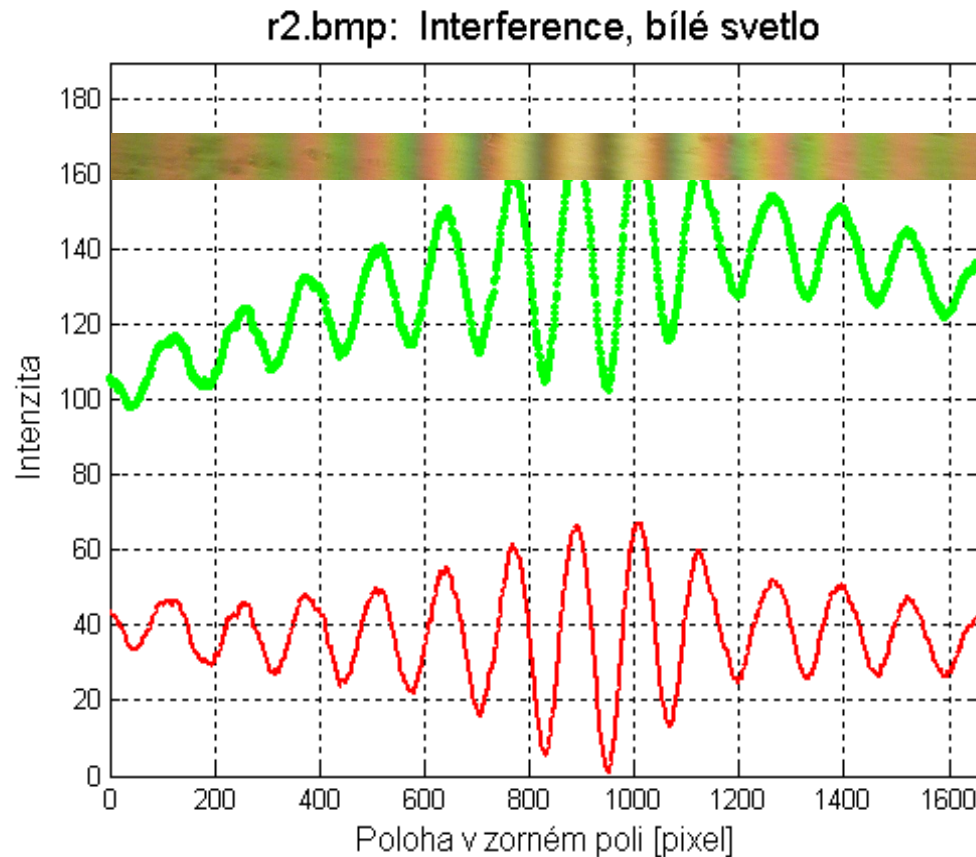


Zeleně je kreslen součet intenzit všech barev G+B+R.
Červeně intenzita po odečtení pozadí.

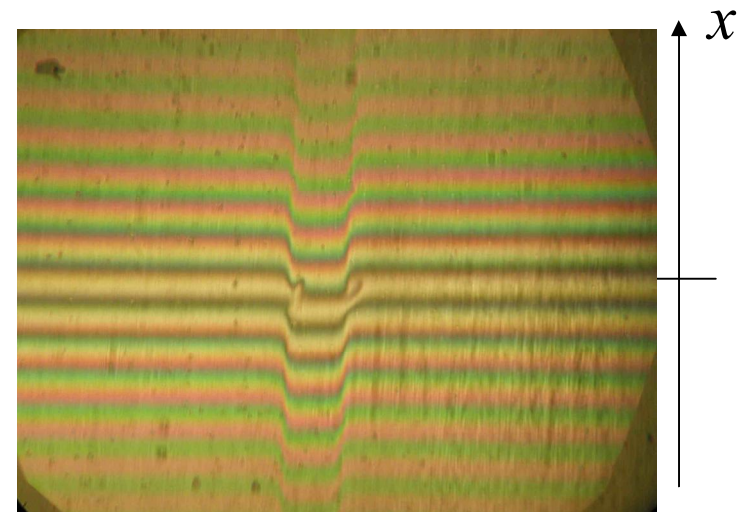


Pás pro analýzu
intenzity z digitální
fotografie

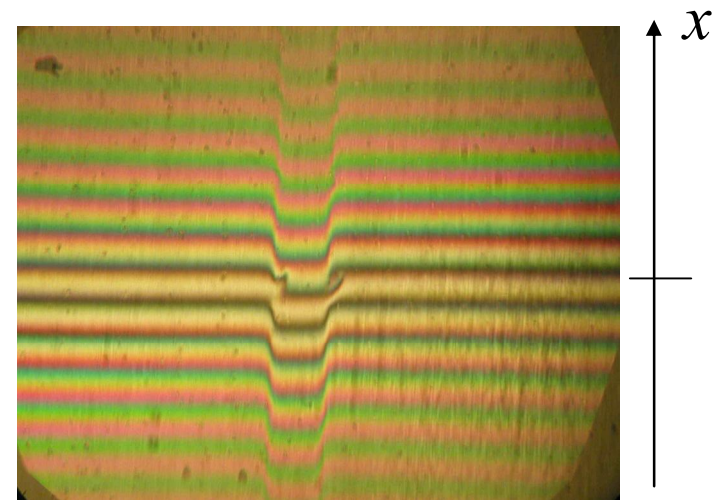
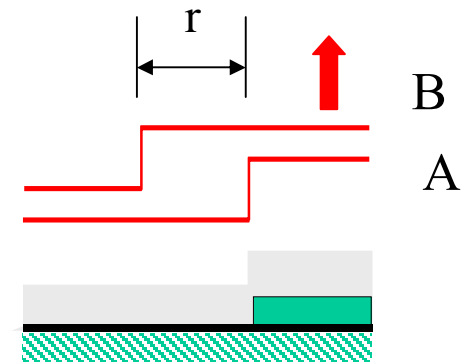
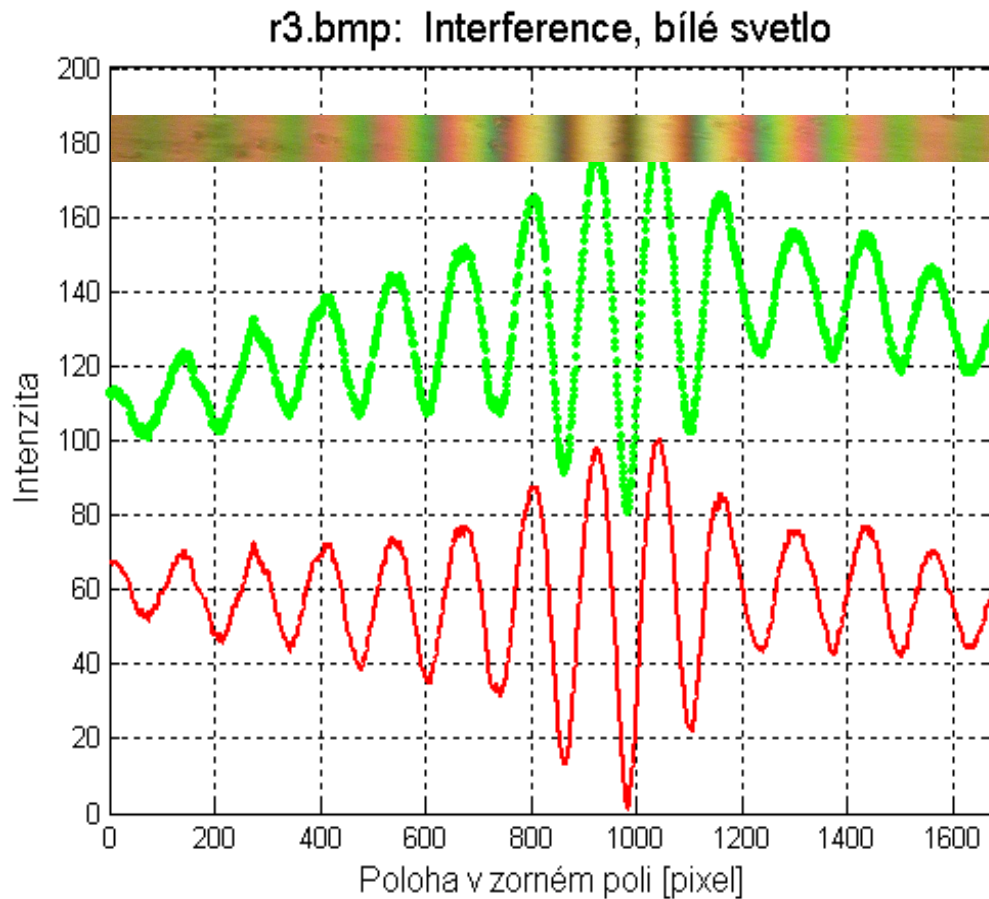
Hrana tenké vrstvy, větší rozštěpení obrazu, viditelnost interferenčního jevu poklesla



Nastal pokles viditelnosti.
Větší rozštěpení obrazu
způsobilo pokles stupně
prostorové koherence.



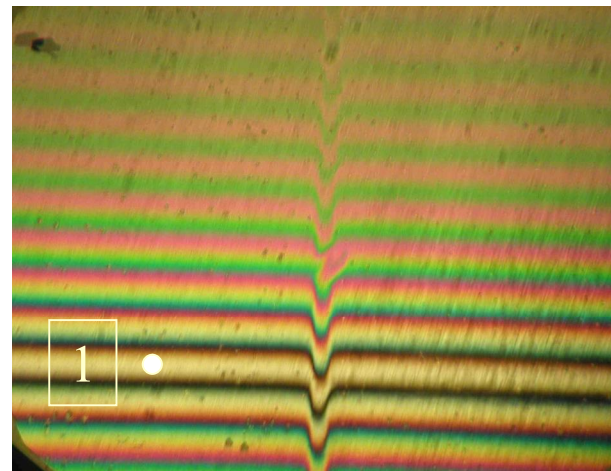
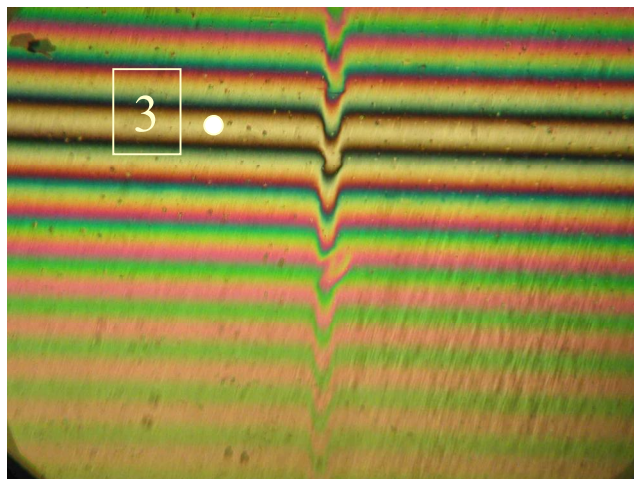
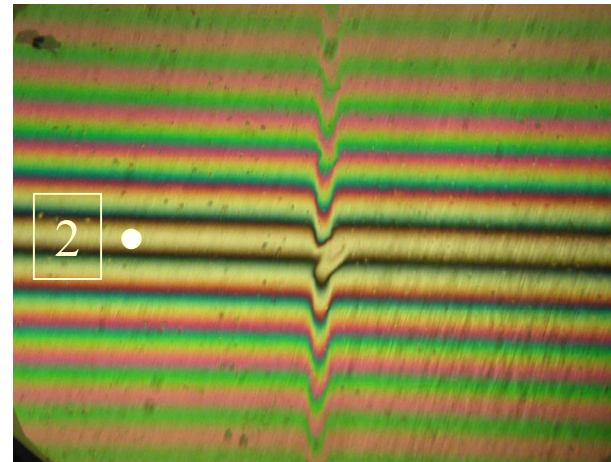
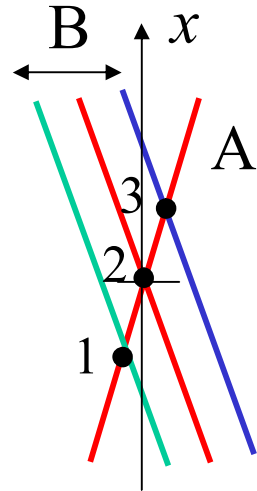
Hrana tenké vrstvy, větší rozštěpení obrazu, užší štěrbinina, viditelnost se zlepšila



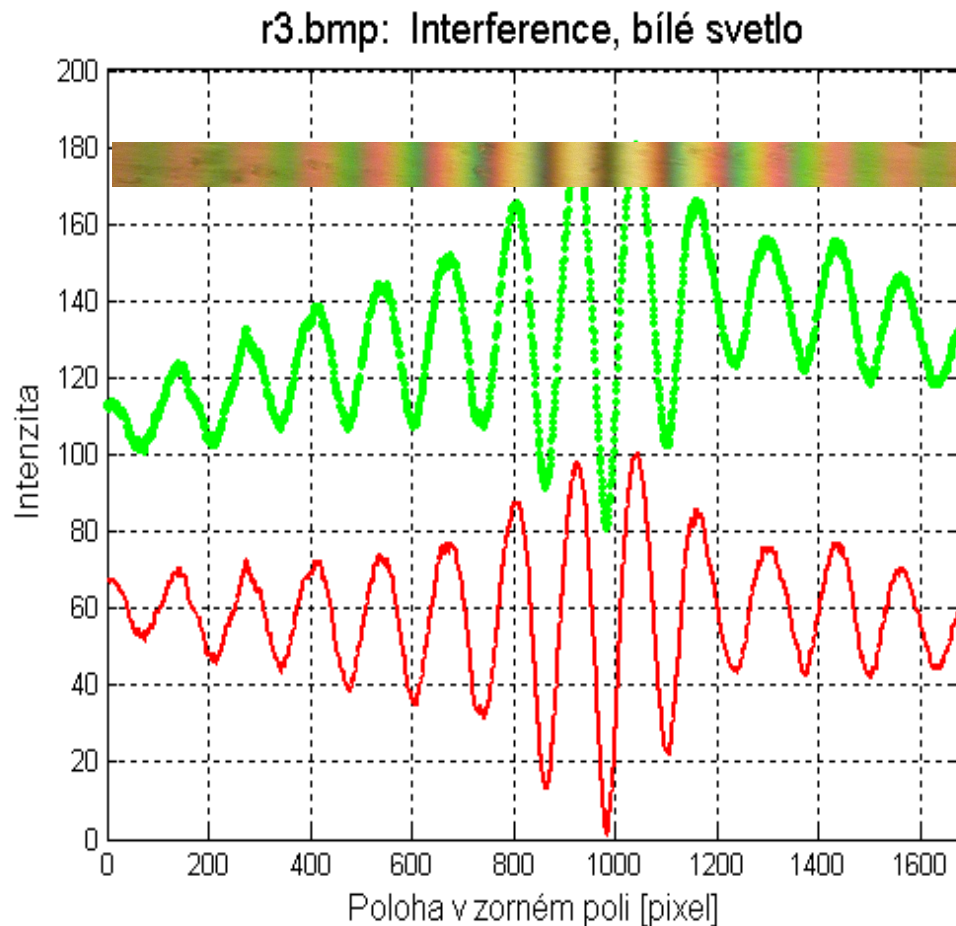
Vliv posuvu vlnoplochy B, stejný úhel

Vlnoplocha se posunuje

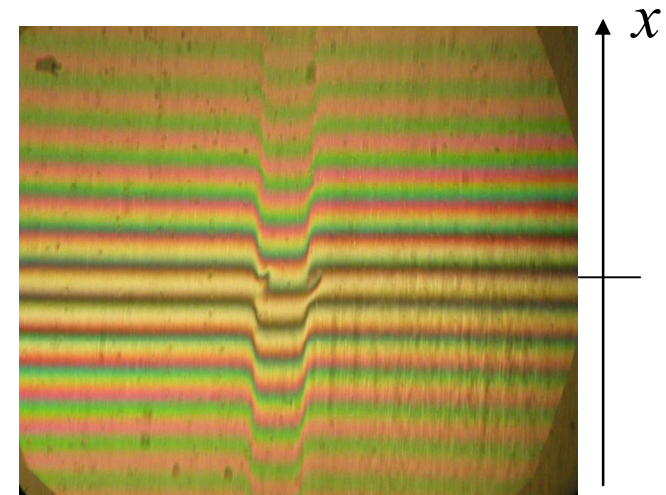
Body nulového fázového rozdílu odpovídají I_{\max}



Bílé světlo

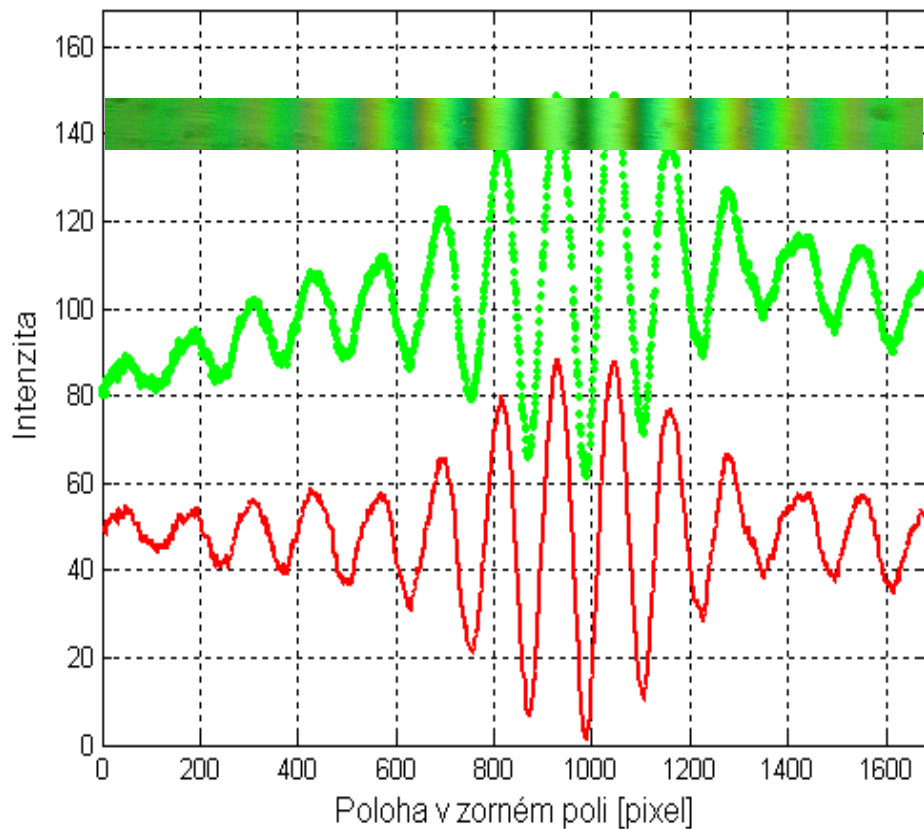


Všimněte si symetrického rozložení barev kolem nultého interferenčního řádu, který je bílý. Hloubka zoubku dobře patrná v bílém světle je důležitá pro měření tloušťky vrstev větších než $\lambda/2$.

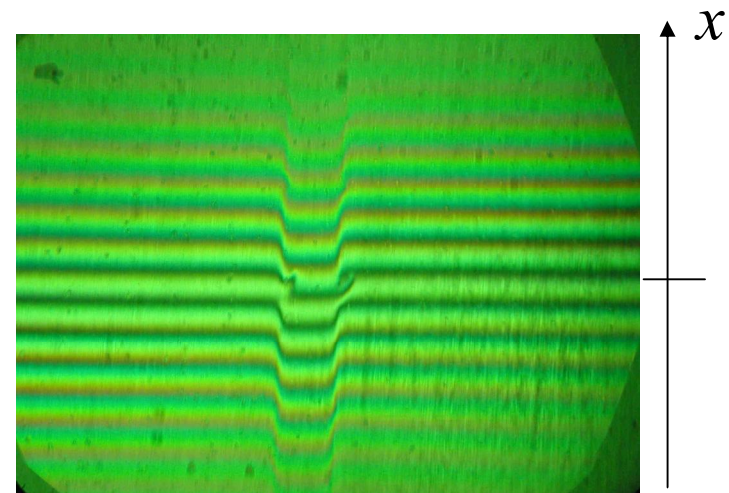


Zelený filtr

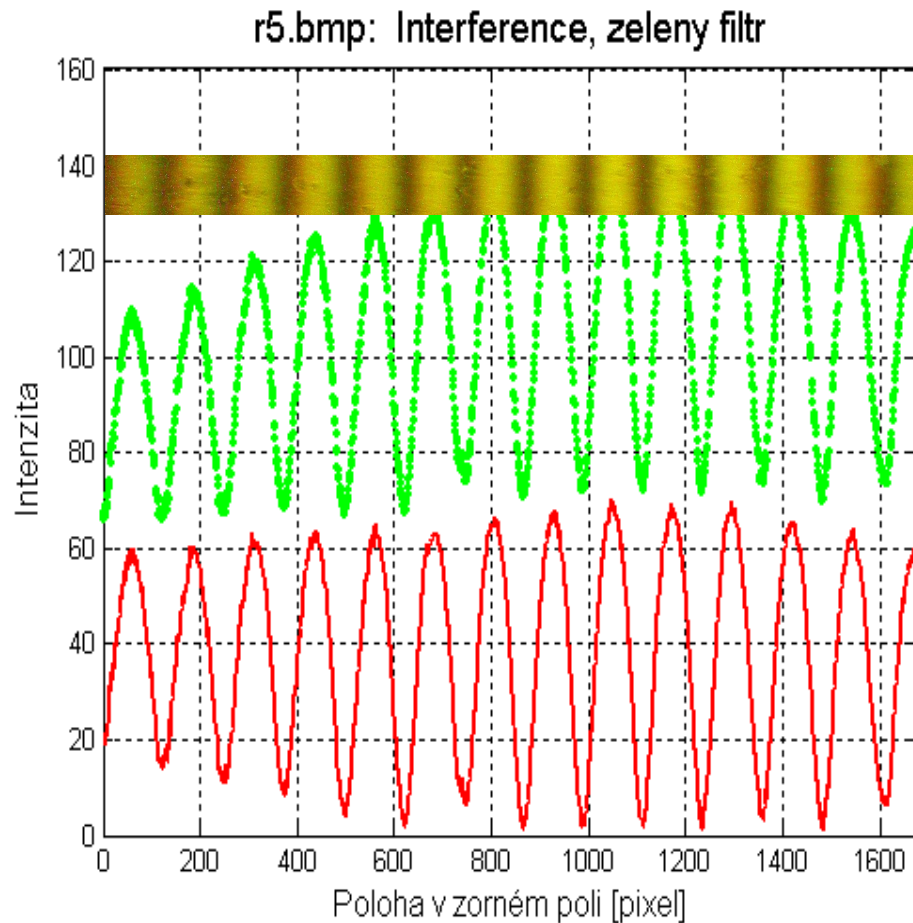
r4.bmp: Interference, zeleny filtr



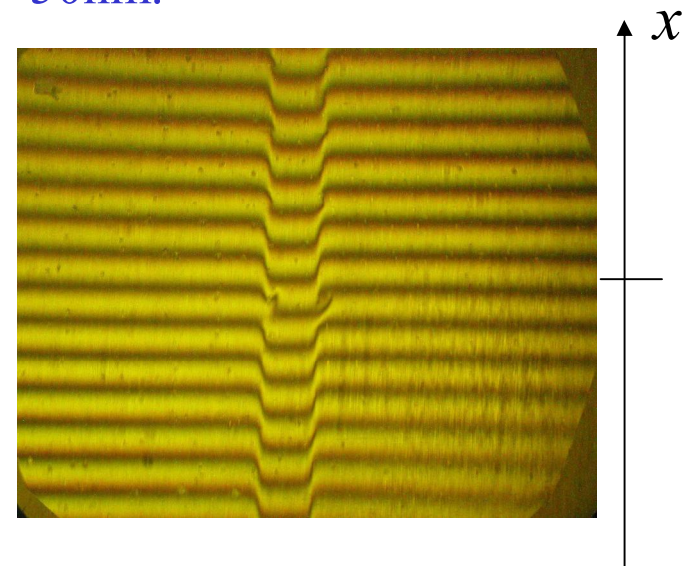
Trochu větší koherenční délka
dosažena vložím zeleného filtru.
Výsledný interferenční jev však
určuje nejen propustnost vloženého
filtru, ale i filtry ve fotoaparátu.



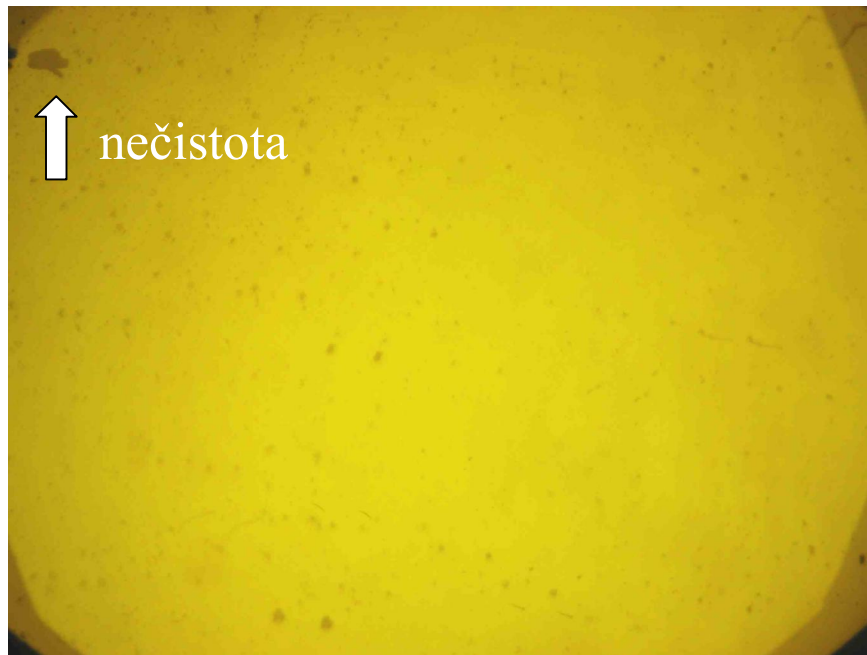
Žlutý filtr



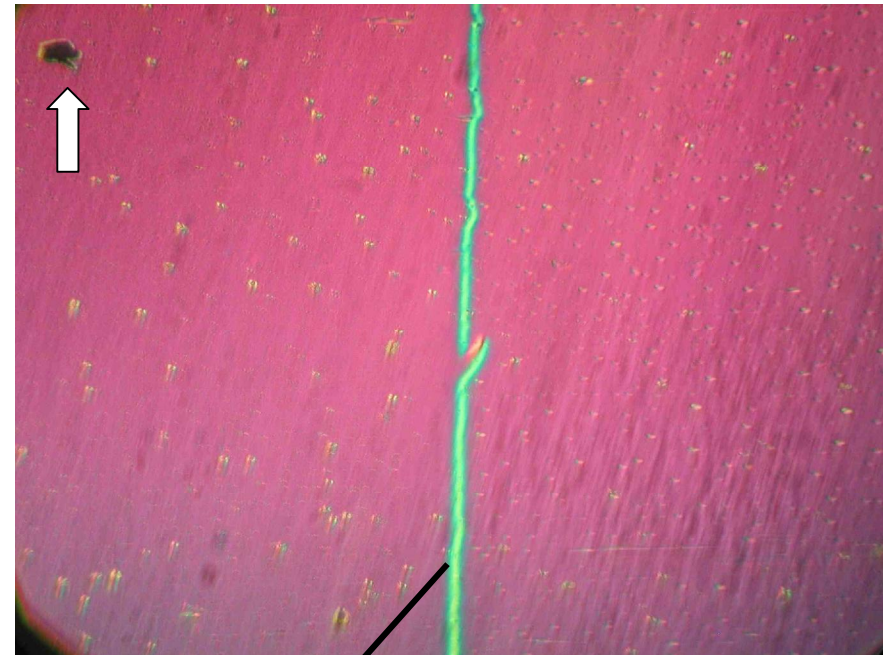
Koherenční délka je zřetelně větší než u zeleného filtru. Žlutý filtr má střední vlnovou délku 580nm a spektrální šířku 50nm.



Zviditelnění reliéfu malým rozštěpením



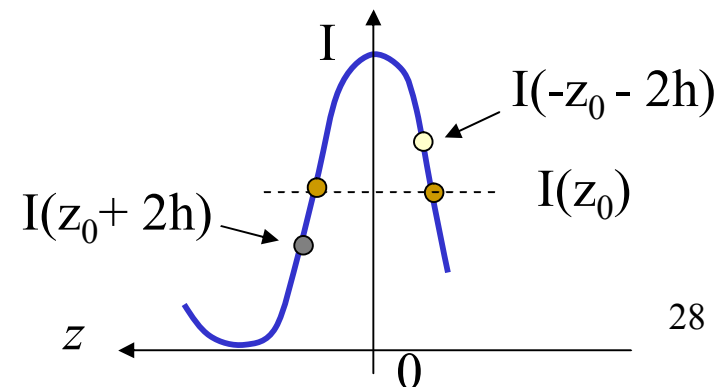
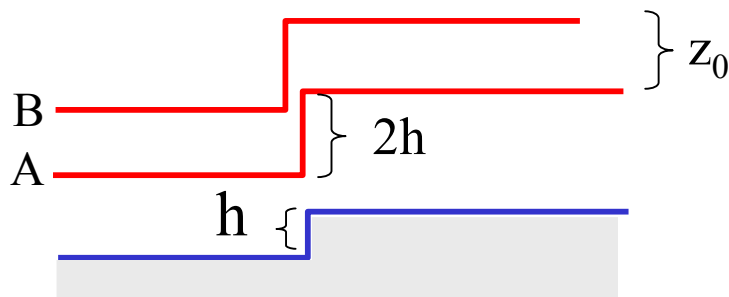
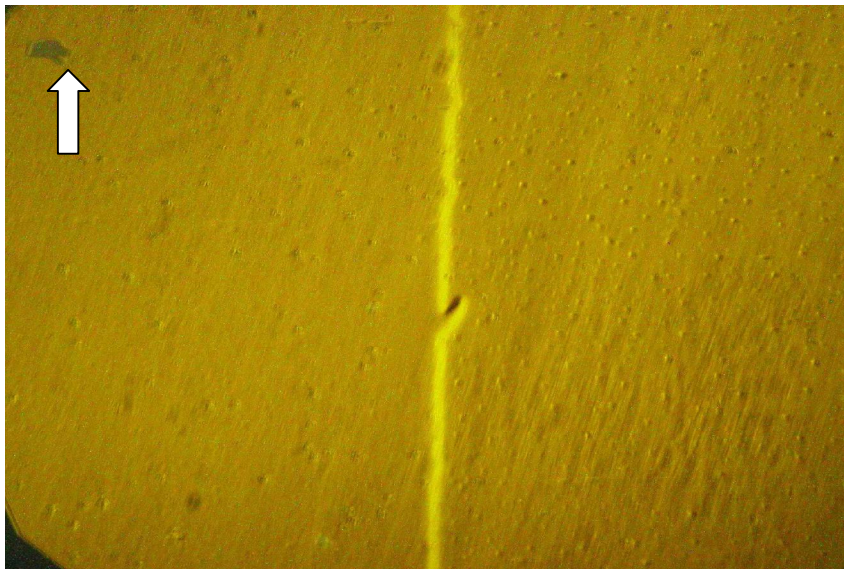
Velké rozštěpení r , paprsky neinterferují, protože nejsou prostorově koherentní.
Reliéf povrchu (hrana) není vidět.



Hrana tenké vrstvy Al na povrchu.
Rozštěpení je malé, oba paprsky interferují, vlnoplochy jsou téměř rovnoběžné. **Kromě hrany je zviditelněn i jemný reliéf povrchu.**

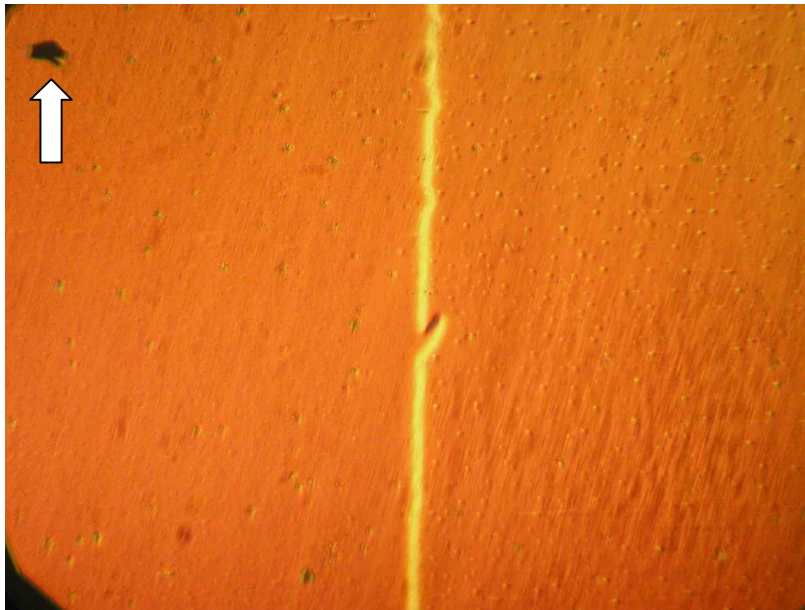
Různé zobrazení hrany tenké vrstvy

Malé rozštěpení, dráhový rozdíl z_0 je asi čtvrtina lambda. Podobně zobrazí hranu **Nomarského kontrast**, u něhož je rozštěpení konstantní.

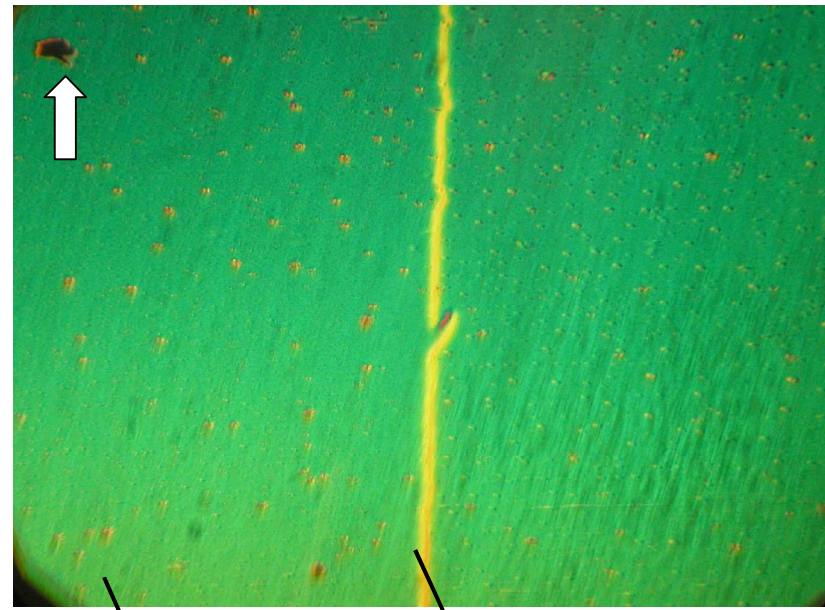


Jiné zviditelnění reliéfu povrchu

Stejné oblasti povrchů preparátu, malé rozštěpení, zviditelněný reliéf povrchu



Různý dráhový rozdíl z_0 odpovídá za barvu pozadí



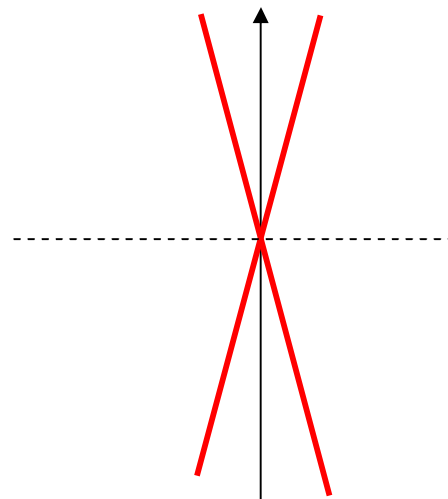
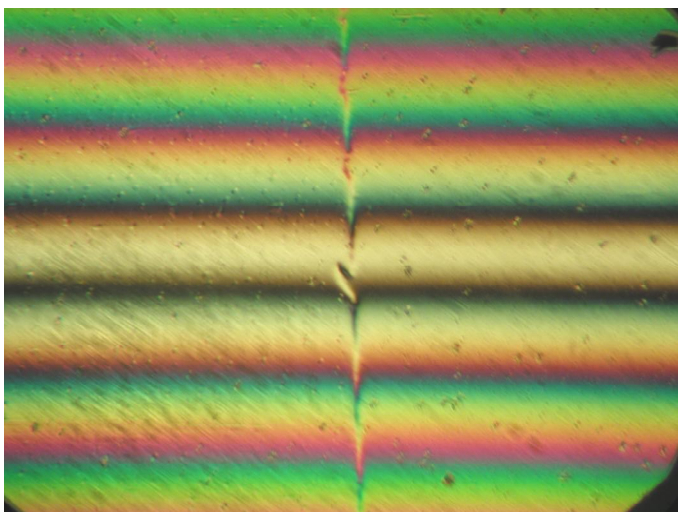
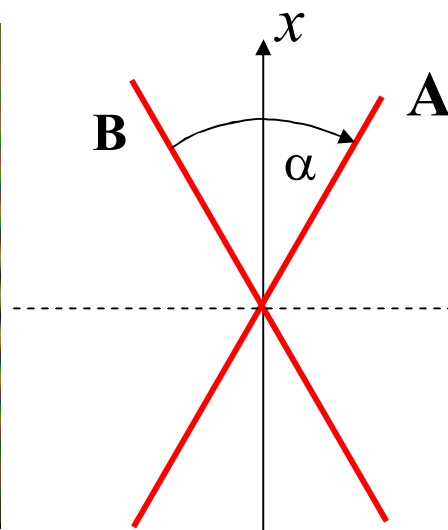
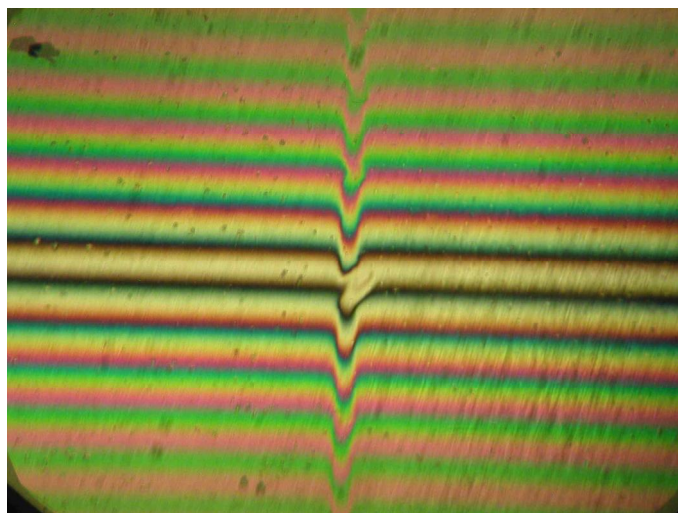
Malé jamky mají jinou barvu.

Hrana povrchového reliéfu překrytá vrstvou Al

Jak rozlišíme jamky od kopečků?

29

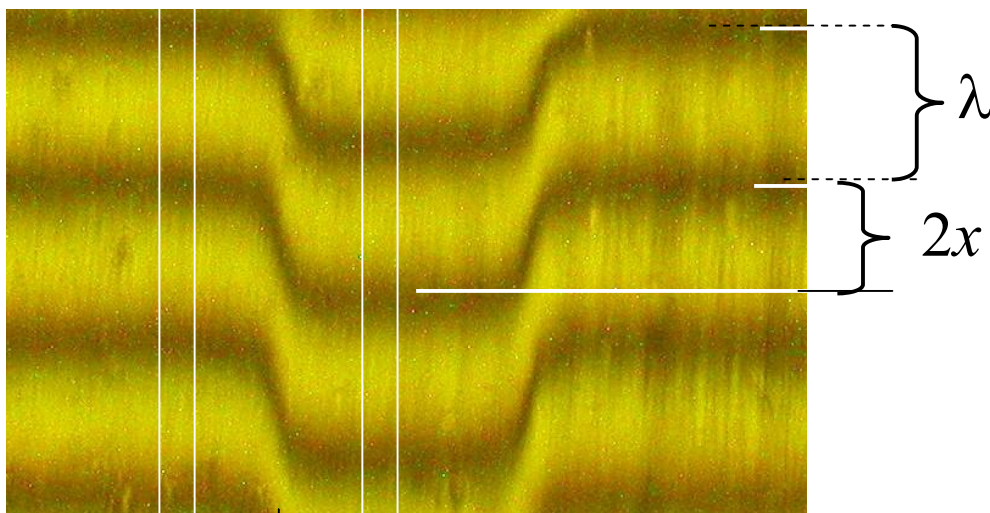
Vliv různého úhlu vlnoploch α



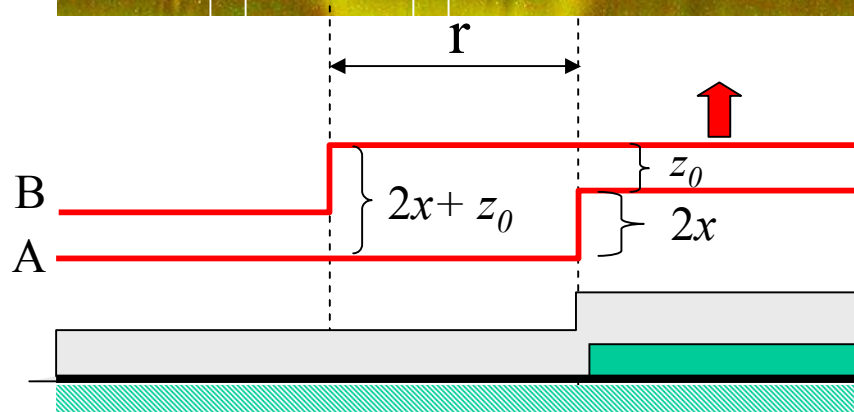
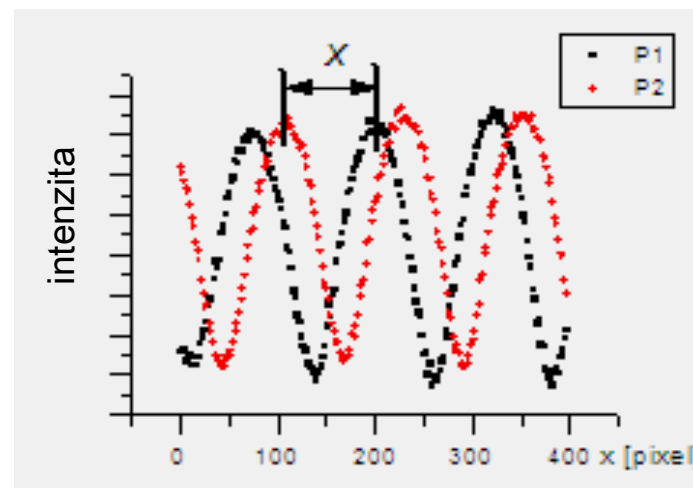
Obraz hrany tenké vrstvy při malém rozštěpení. Když rozštěpení zvětšíme, lze pak změřit neznámou tloušťku tenké vrstvy. Viz následující obr.

Měření tloušťky x tenké vrstvy

P1 ← P2 ← Pásky obrazu pro numerickou analýzu intenzity



Výsledek numerické analýzy



- Vlnoplocha B, rozštěpení o r
- Vlnoplocha A má po odrazu schodek $2x$ (otisk reliéfu povrchu)
- Krycí vrstva, často hliníková, aby změna fáze po odrazu byla stejná
- Tenká vrstva tloušťky x
- Podložka

$x = ?$