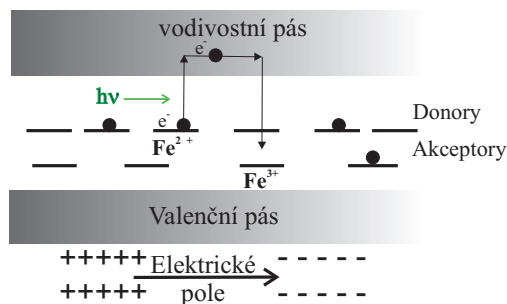


Úloha č.6 – Dvouvlnové směšování ve fotorefraktivním materiálu a fázová konjugace

1 Teoretický úvod

Dvouvlnové směšování neboli dvouvlnová interference ve fotorefraktivním (FRV) materiálu je proces, který spadá do nelineární optiky. Je však vhodné úvodem poznamenat, že oproti ostatním jevům nelineární optiky (generace druhé harmonické, Kerrův jev) je fotorefraktivní jev mechanismus jevu poněkud komplexnější a k jeho pozorování stačí o mnoho řádů nižší intenzita. FRV materiály by bylo možné využít ke konstrukci různých optických součástek a zařízení, jako jsou optické děliče, logické obvody nebo holografické paměti. K masivnímu použití v praxi však často brání pomalá nelineární odezva FRV materiálů. Z těchto materiálů jsou nejznámější ferroelektrické krystaly, zejména $LiNbO_3$, SBN a $BaTiO_3$.

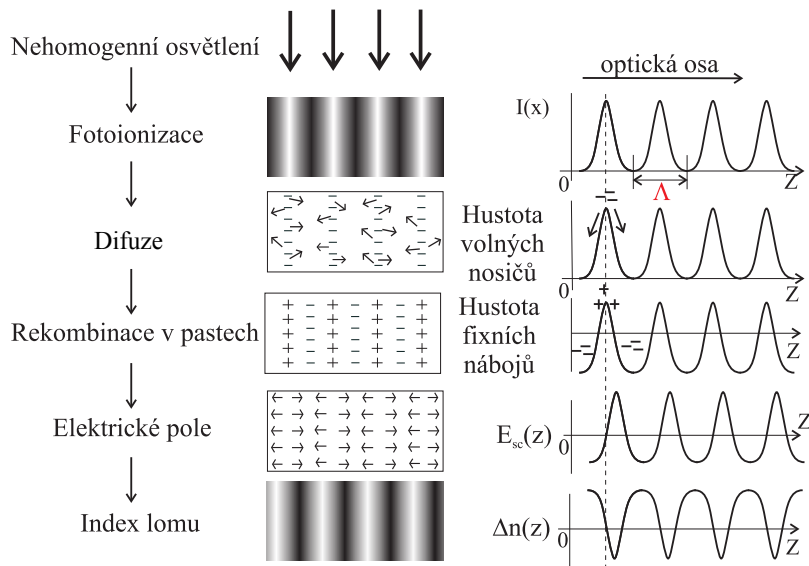
Jak název napovídá, fotorefraktivní materiál mění po dopadu záření index lomu. Popíšeme si nyní mechanismus, kterým k modulaci indexu lomu dochází. Dopadající záření se při průchodu materiálem částečně absorbuje v příměsích (na obr.1) jde o ionty Fe^{2+} a Fe^{3+}). Ionty v zakázaném pásu mohou být po dopadu optického záření zdrojem elektronů. Ionty se tedy chovají jako donory a akceptory elektronů. Pokud krystal ozáříme dostatečnou intenzitou světla (ve FRV materiálech stačí jednotky $\mu W/cm^2$!), dojde k excitaci elektronu z iontu Fe^{2+} do vodivostního pásu. Ve vodivostním pásu pak dochází k přemístění elektronů do míst v krystalu, které jsou ozářeny nižší intenzitou. Přenos elektronů je uskutečněn pomocí difuze, driftu a fotovoltaického proudu. Tyto tři efekty mají vliv na přesun elektronů a tvoří základní kámen FRV jevu. V konkrétní FRV materiálu však nemusí být zastoupeny všechny tři jevy, nebo se jejich vliv silně liší. Drift je navíc projevem vnějšího elektrického pole přiloženého na krystal. V



Obrázek 1: Pásový model rozložení energetických hladin ve FRV materiálu

neozářených oblastech dochází k opětovnému zachycení elektronů tzv. akceptory (ionty Fe^{3+}). Toto přerozdělení náboje vede ke vzniku vnitřního elektrického pole E_{sc} . Vnitřní elektrické pole je důležité pro elektro-optický jev. Až na tomto místě se tedy uplatní nelineární Pockelsův jev. Přítomností vnitřního elektrického pole dochází tedy ke změně indexu lomu. Celý proces od ozáření krystalu až ke změně indexu lomu je zobrazen na (obr.2). Podrobně je FRV rozebrán v [1, 2, 3].

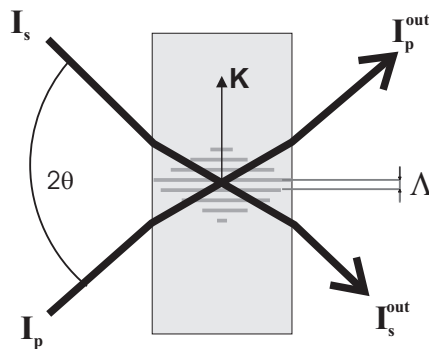
Fotorefraktivní materiály se tedy vyznačují **fotovodivostí** a **elektro-optickými** vlastnostmi a jsou schopné detekovat a uložit prostorové rozložení optické intenzity ve tvaru prostorového rozložení změny indexu lomu, tedy objemové fázové difraktivní struktury (např. mřížky, hologramy apod.).



Obrázek 2: Odezva fotorefraktivního materiálu na dopadající světlo.

Nyní si popíšeme podrobněji proces dvouvlňového směšování. Na (obr.3) je znázorněna interference dvou vln v FRV materiálu - jednu vlnu označme jako signálovou (I_s) a druhou jako čerpací (I_p). Výsledkem interference je interferenční pole, které vytvoří v FRV materiálu objemovou difrakční mřížku s periodou Λ a vlnovým vektorem K .

Signálová a čerpací vlna si při šíření FRV materiálem vyměňují navzájem energii přes difrakci na objemové mřížce. Tento proces se nazývá **směšování dvou vln**. V našem případě bude vlna čerpací zesilovat vlnu signálovou. Proces dvouvlňového směšování je základem dynamické holografie, protože FRV materiál uchovává obraz interferenčního pole ve formě rozložení indexu lomu.



Obrázek 3: Schématické znázornění dvouvlňového směšování

Rozložení optické intenzity podle experimentu z (obr.4) bude mít tvar

$$I(z) = I_0[1 + m \cos(Kz)], \quad (1)$$

kde $I_0 = I_s + I_p$ je celková intenzita, $K = \frac{4\pi n}{\lambda_0} \sin \theta$ je velikost vlnového vektoru mřížky vytvořené interferencí dvou vln pod úhlem 2θ . $m = 2 \frac{\sqrt{I_s I_p}}{I_s + I_p} \cos \theta$ je hloubka modulace mřížky.

index lomu	n_e	2.424
	n_o	2.488
elektro-optické koeficienty	r_{13}	$24 \cdot 10^{-12} \text{ m/V}$
	r_{33}	$80 \cdot 10^{-12} \text{ m/V}$
	r_{42}	$1640 \cdot 10^{-12} \text{ m/V}$

Tabulka 1: Parametry krystalu $BaTiO_3$

Pokud dále použijeme rovnice popisující jednotlivé procesy z (obr.2) (tzv. Kuchtharevovy rovnice) viz.[1, 2, 4], získáme vztah pro modulaci vnitřního elektrického pole E_{sc} .

$$E_{sc} = -\frac{k_B T}{q} K m \frac{\sin(Kz)}{1 + m \cos(Kz)}, \quad (2)$$

kde T je teplota, k_B je Boltzmanova konstanta. Z tohoto vztahu pak pro změnu indexu lomu platí výraz

$$\Delta n = -\frac{1}{2} n_o^3 r_{eff} E_{sc}. \quad (3)$$

Tento vztah v sobě obsahuje všechny informace jak o vlastnostech krystalu, tak o intenzitě a modulaci světla dopadající na krystal. Pokud je hloubka modulace m malá, lze v (2) zanedbat člen s kosinem a pak modulace indexu lomu bude vůči interferenčnímu poli posunuta přesně o $\pi/2$ viz.(obr.2).

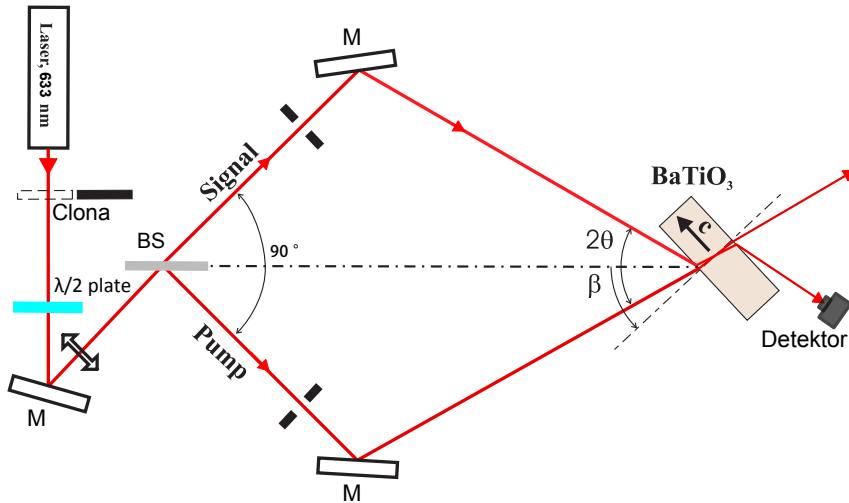
V této úloze budeme používat FRV materiál $BaTiO_3$ s grupovou symetrií $4mm$. Tato krystalografická grupa má elektro-optický tenzor ve tvaru

$$r_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{42} & 0 \\ r_{42} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

Ze znalosti úhlu dopadu optického záření θ , úhlu natočení krystalu vůči úhlu dopadu a konkrétnímu výbrusu krystalu β jsem schopni určit efektivní elektrooptický koeficient r_{eff} . Geometrie experimentu je zobrazena na (obr.4). Pro extraordinární vlnu má r_{eff} tvar

$$r_{eff} = \frac{\cos \beta}{2n_e^4} [n_o^4 r_{13} (\cos 2\theta - \cos 2\beta) + 4n_o^2 n_e^2 r_{42} \sin^2 \beta + n_e^2 r_{33} (\cos 2\beta + \cos 2\theta)]. \quad (5)$$

Parametry n_o , n_e jsou ordinární a extraordinární indexy lomu. Hodnoty jednotlivých indexů lomu a elektro-optických koeficientů jsou v tab.1.



Obrázek 4: Dvouvlnové směšování; interakce dvou vln čerpací (pump) a signálové (signal) v krystalu $BaTiO_3$.

Jak probíhá výměna energie mezi vlnami? Co se děje s čerpací a signálovou vlnou v FRV materiálu? Při řešení šíření optických vln obdržíme za předpokladu pomalu proměnných amplitud z vlnové rovnice soustavu vázaných rovnic pro čerpací a signálovou vlnu. Soustava rovnic při předpokladu komplexních amplitud $A_j = \sqrt{I_j} \exp(i\psi_j)$, kde $j = s, p$, má tvar

$$\frac{dI_s}{dz} = \gamma \frac{I_s I_p}{I_s + I_p} - \alpha I_s \quad (6)$$

$$\frac{dI_p}{dz} = -\gamma \frac{I_s I_p}{I_s + I_p} - \alpha I_p \quad (7)$$

kde α je koeficient ztrát a γ je koeficient vazby nebo-li zisku. Řešení rovnic (6),(7) je

$$I_s(z) = I_s(0) \frac{1 + \frac{I_p(0)}{I_s(0)}}{1 + \frac{I_p(0)}{I_s(0)} \exp(-\gamma z)} \exp(-\alpha z) \quad (8)$$

$$I_p(z) = I_p(0) \frac{1 + \frac{I_s(0)}{I_p(0)}}{1 + \frac{I_s(0)}{I_p(0)} \exp(-\gamma z)} \exp(-\alpha z) \quad (9)$$

Přeliv energie z čerpacího svazku do signálního při zvolených konstantách koeficientu vazby je vidět na obrázku (5a). Pro daný příklad jsme zvolili koeficient útlumu $\alpha = 0.1[1/cm]$ a podíl intenzit signálového a čerpacího svazku $M = 0.001$.

Údajem, který nás bude v průběhu měření zajímat, je zisk dvouvlnové interakce nebo koeficient vazby γ . Ten je značně závislý na úhlu natočení krystalu β , jak je vidět na (obr.5b). Pro experiment si zvolíme jeden konkrétní úhel β . Experimentálně lze přibližně určit koeficient γ z poměru intenzity signálního svazku na výstupu z krystalu (označme $I_s^{OFF}(L)$) k intenzitě signálního svazku se zapnutým čerpacím svazkem ($I_s^{ON}(L)$). Výsledný vztah má tedy tvar

$$\frac{I_s^{ON}(L)}{I_s^{OFF}(L)} = \exp(\gamma L), \quad (10)$$

kde $L = n_e L_k / \cos(\beta)$ je délka optické dráhy v krystalu, L_k je délka krystalu. Pro platnost rov.(10) musíme dodržet některé předpoklady

- optické svazky jsou rovinné, extraordinárně polarizované.
- kontrast interferenční struktury $m \ll 1$, viz.(1)
- $I_s(0) \exp(\gamma L) \ll I_p(0)$ nebo-li $I_s(L) \ll I_p(0)$

Posledním tématem v této úloze je **fázová konjugace**. Fázově konjugovaná vlna je vlna s opačnou fází (fázovou vlnoplochou) postupující v opačném směru vlny původní. Fázová konjugace je obecně degenerovaný čtyřvlnový proces. Vytvořený fázový konjugátor je jakési zrcadlo, které dopadající vlnu odráží zpět do opačného směru beze změny tvaru vlnoploch. K vytvoření fázové konjugace je v FRV materiálu zapotřebí pouze jedné vlny dopadající na krystal pod daným úhlem. Proces se nazývá samofázová konjugace. Uvnitř materiálu dochází k vnitřním odrazům od stěn krystalu a vytvoření fázově konjugované vlny viz.(obr.9). Optimální úhel dopadu a pozici dopadu pro samo-fázovou konjugaci lze vyčíst z obrázků 6 a 7.

2 Zadání úlohy

Cíle

Realizace dvouvlнового směšování ve fotorefraktivním materiálu. Na tomto experimentu ukázat a pochopit vlastnosti fotorefraktivního materiálu. Použít daný krystal jako holografickou paměť a sledovat děj samofázové konjugace.

Pomůcky

laser He-Ne (633 nm) o výkonu 15 mW, $\lambda/2$ destička, dělič svazku, čočka $f = 150$ mm, zdroj intenzivního bílého světla, zrcadla, stolek s goniometrem, fotodetektor (Newport), fotorefraktivní krystal $BaTiO_3$, transparentní maska, neutrální filtr, 2x clona, teleskop.

Postup měření

1. Postavení schématu dvouvlnové interference–viz. (obr.4)
2. Naměření koeficientu zisku pro různé periody mřížky Λ a časovou závislost $\gamma(t)$. Pro měření koeficientu γ použijte vztah (10). Zisk signálového svazku v čase se bude sledovat a měřit pomocí fotodetektoru a ukládat do počítače. Mezi jednotlivými měřeními se bude použitý krystal mazat. Mazáním rozumíme vymazání difrakční struktury z objemu krystalu. K mazání použijeme bílé světlo, kterým osvítíme homogenně celý krystal po dobu cca 3 min. Proces mazání také zaznamenáme měřením signálového svazku.
3. Zápis 2D struktur do krystalu pod různými úhly β a sledování jejich následného vyčítání. Jde o jednoduchou konstrukci holografické paměti. Experimentální uspořádání je uvedeno na (obr.8). V tomto uspořádání lze sestavit i tzv. Novelty Filtr. Jde o metodu, kdy se zapíše do krystalu obraz původního předmětu a pokud se tento předmět bude měnit v čase, na výstupu budeme sledovat pouze změny tohoto obrazce (př. padající sůl v roztoku atd.). Statické části obrazu se neprojeví.

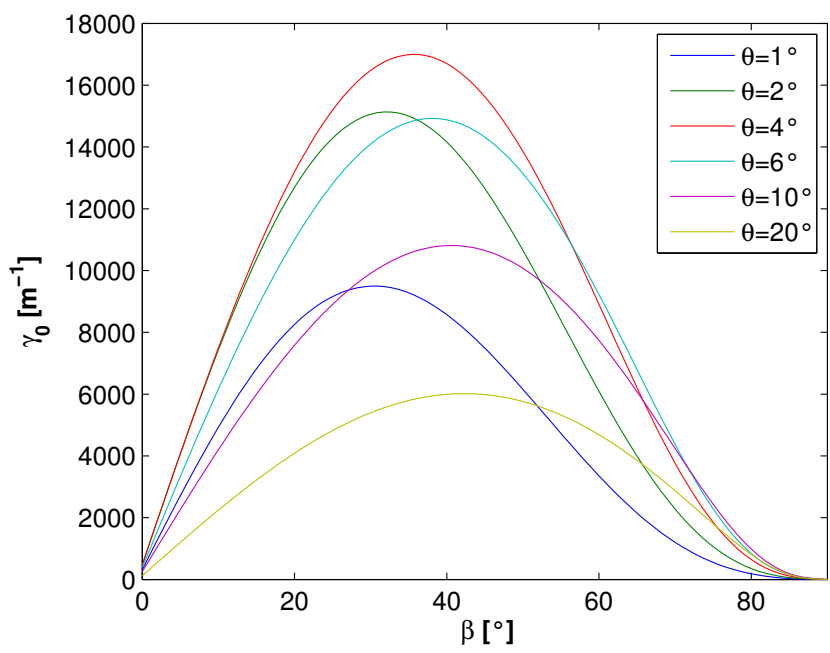
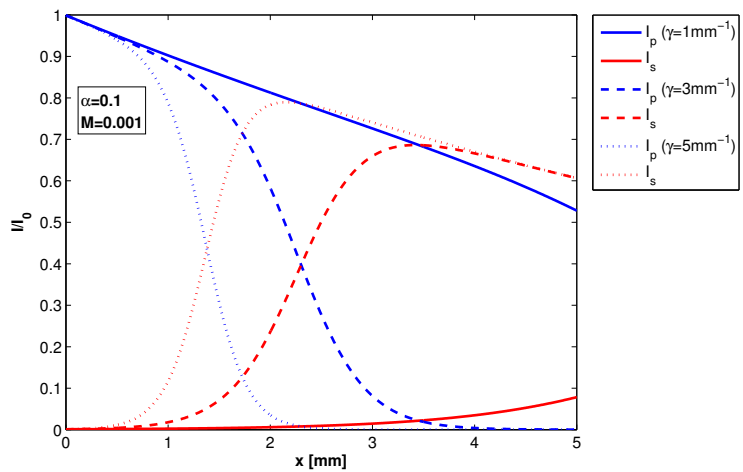
4. Sledování vzniku samofázové konjugace, pokusit se zapsat a vyčíst 2D strukturu pomocí samofázového zrcadla. Navrhnout experimentální uspořádání experimentu.

3 Úkoly

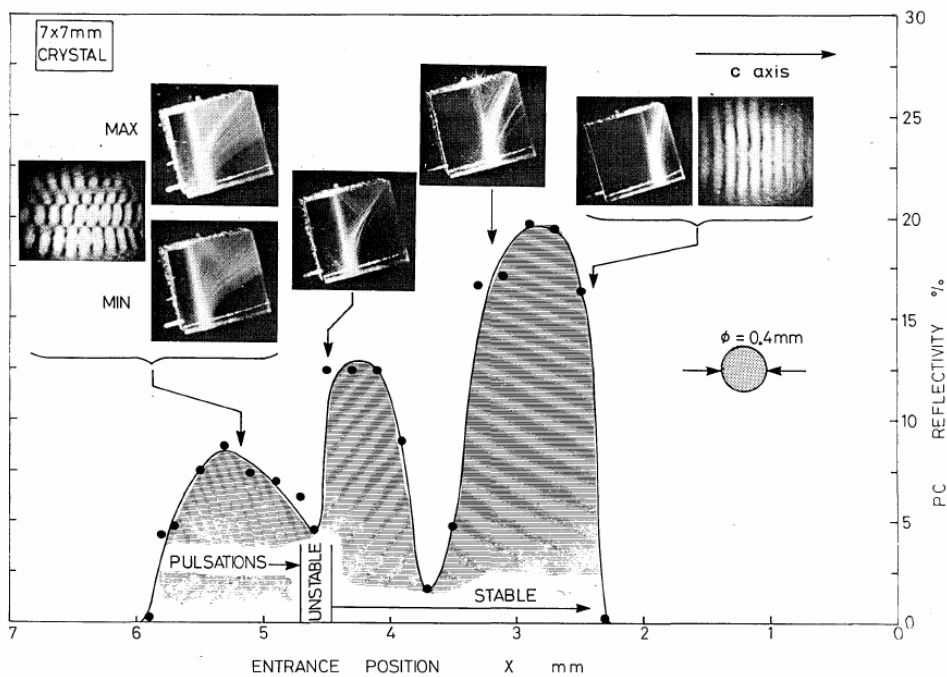
- Nastudovat fotorefraktivní jev a určit periody difrakční mřížky použité v experimentu.
- Zpracovat měření koeficientu vazby. Vynést závislosti koeficientu vazby na periodě mřížky. Zobrazit graf časového průběhu signálového svazku pro různé periody.
- Popsat sledované jevy dvouvlňové směšování a samofázovou konjugaci.
- Pokuste se pořídit fotografie rekonstrukce zaznamenaných hologramů v krystalu.
- Nezapomeňte zaznamenat hodnoty úhlů θ a β všude, kde to má smysl.
- Diskuse naměřených výsledků

Reference

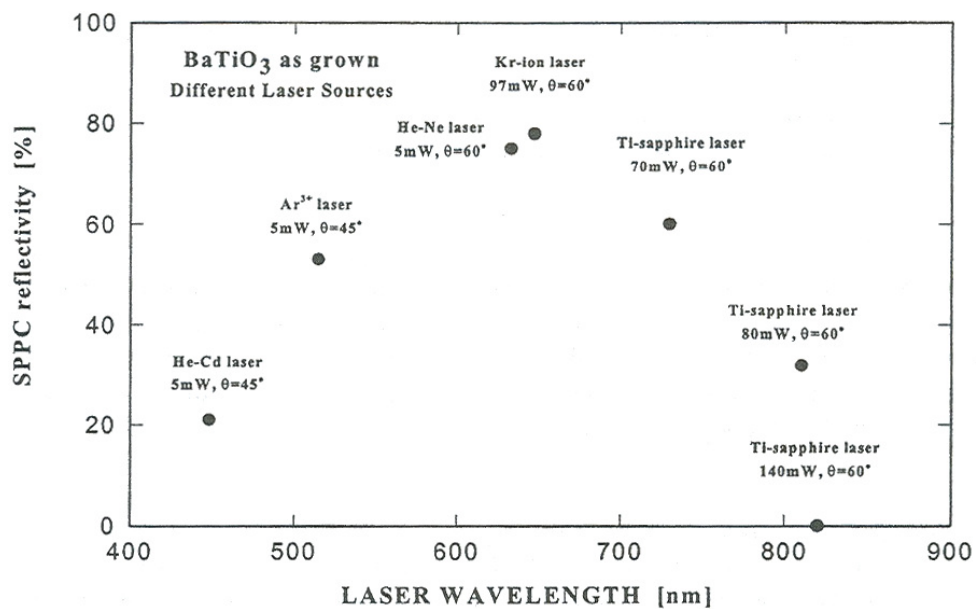
- [1] Bahaa E.A: Saleh and Malvin Carl Teich. *Základy fotoniky svazek 4*. Matfyzpress, Praha, 1994.
- [2] P. Gunter and J.-P. Huignard. *Photorefractive materials and their applications I (Fundamental Phenomena)*. Springer-Verlag, New York, 1988.
- [3] R.W.Boyd. *Nonlinear optics*. Academic Press, New York, USA, 1992.
- [4] P. Gunter and J.-P. Huignard. *Photorefractive materials and their applications II (Survey of Applications)*. Springer-Verlag, New York, 1989.



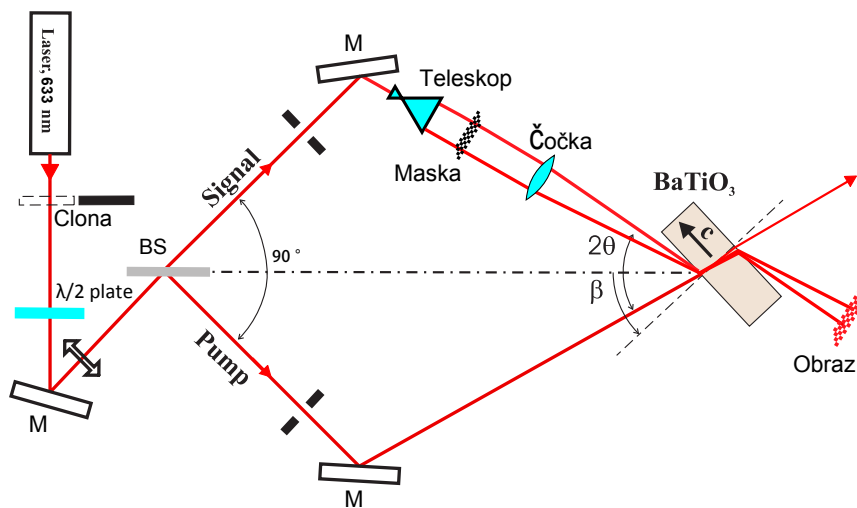
Obrázek 5: a)řešení soustavy vázaných rovnic pro signálovou I_s a čerpací vlnu I_p b)zobrazení koeficientu vazby na uspořádání experimentu (natočení krystalu a úhlu dopadajících paprsků)



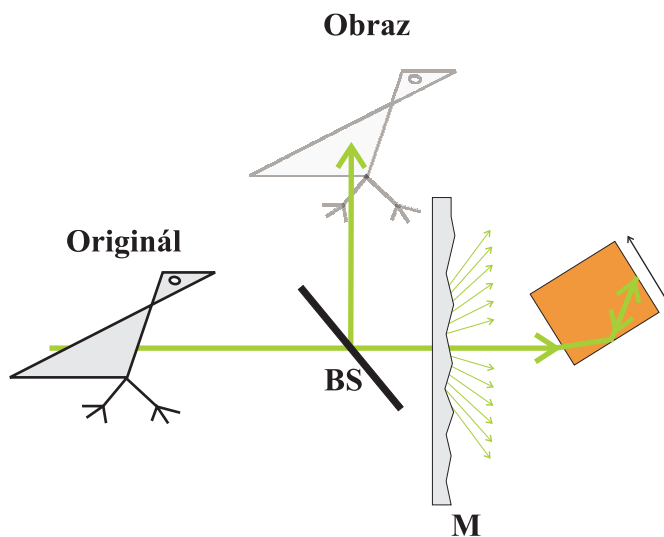
Obrázek 6: Závislost fázově konjugované reflektance na pozici dopadu na krystalu.



Obrázek 7: Závislost fázově konjugované reflektance na vlnové délce při optimálním úhlu dopadu na krystal. Úhel θ na obrázku odpovídá úhlu β v tomto návodu.



Obrázek 8: Zápisk hologramu do $BaTiO_3$



Obrázek 9: Samofázová konjugace a její princip; BS-dělič svazku, M-matnice