



OPTOELEKTRONIKA

MODULÁCIA A DEMODULÁCIA OPTICKEHO ZIARENIA

Dr.h.c. Prof.RNDR.Ing. Ján TURÁN, DrSc.

Department of Electronics and Multimedia Communications
Faculty of Electrical Engineering and Informatics
University of Technology Košice, Letná 9, 042 00 Košice,
Slovakia

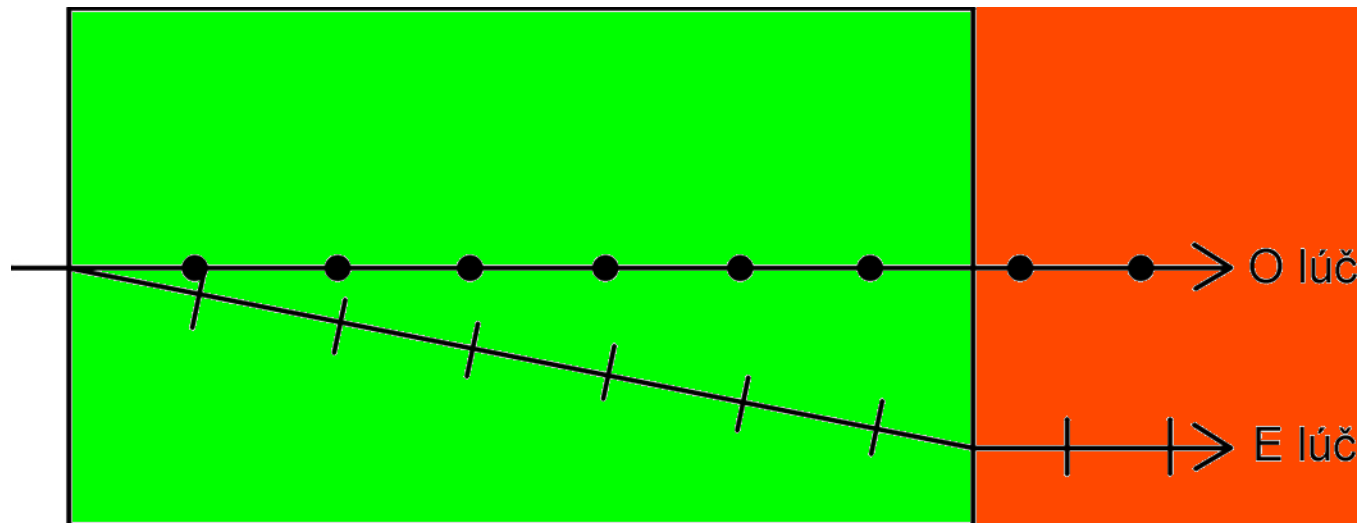
Tel. ++ 421 55 602 29 43, E-mail: jan.turan@tuke.sk

7. MODULÁCIA A DEMODULÁCIA OPTICKÉHO ŽIARENIA

7.1 DVOJLOM

Optický modulátor

- Prerušovače (čoppery - choppers)
- Vnútrorezonátorové a mimorezonátorové
- Modulátory kvality rezonátora
- Vplyv šumu $1/f$



Obr. 7.1 Lom na dvojlomnom kryštále.

7. MODULÁCIA A DEMODULÁCIA OPTICKÉHO ŽIARENIA

7.1 DVOJLOM

Kalcit (CaCO_3), kremeň (SiO_2), KDP (KH_2PO_4) – **anizotropné Polarizácia**

$$\vec{P} = \overset{\leftrightarrow}{\epsilon} \vec{E}$$

$\overset{\leftrightarrow}{\epsilon}$ – **tenzor**

- **Dvojločné látky (kryštály) – dve optické osi**
- **Dva lúče:** Riadny – O (Ordinary)
Mimoriadny – E (Extraordinary)

$n_o \leq n_e$ – **Pozitívne kryštály**

$n_o \geq n_e$ – **Negatívne kryštály**

7. MODULÁCIA A DEMODULÁCIA OPTICKÉHO ŽIARENIA

7.1 DVOJLOM

- **Fresnelov elipsoid**

$$\frac{x^2 + y^2}{n_o^2} + \frac{z^2}{n_e^2} = 1$$

- **Štvrt'vlnová platnička**

$$|n_o d - n_e d| = \lambda / 4$$

Pre kremeň ($n_e=1,55336$ a $n_o=1,54425$) + sodíkové svetlo ($\lambda=589,3$ nm) je $d=0,0164$ mm

- **Polvlnová, resp. celovlnová platnička**

7. MODULÁCIA A DEMODULÁCIA OPTICKÉHO ŽIARENIA

7.2 OPTICKÁ AKTIVITA

Schopnosť otáčať rovinu polarizácie optického žiarenia

- **Pravotočivé (Dextra rotačné)**
- **Ľavotočivé (Laevo rotačné)**

Kremeň existuje v obidvoch formách

Kremeň hrúbky 1mm otočí rovinu polarizácie sodíkového svetla o $21,7^\circ$

Vodné roztoky cukru: Ovocný cukor je ľavotočivý
Hroznový cukor je pravotočivý

- **Meranie koncentrácie cukornatých roztokov**

7. MODULÁCIA A DEMODULÁCIA OPTICKÉHO ŽIARENIA

7.3 ELEKTROOPTICKÝ MODULÁTOR

Prirodzene **dvojločná optická látka (KDP, GaAs)**

Zmena indexu lomu

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right) = rE + pE^2$$

r – lineárny elektrooptický koeficient, p – kvadratický elektrooptický koeficient, člen rE – **Pocklesov jav**, člen pE² – **Kerrov jav**

Fázový rozdiel medzi riadnou a mimoriadnou vlnou

$$\Delta\phi = \frac{\pi}{\lambda} L r n_0^2 E_z = \frac{\pi}{\lambda} r n_0^3 V$$

$$E_z = \frac{V}{L}$$

7. MODULÁCIA A DEMODULÁCIA OPTICKÉHO ŽIARENIA

7.3 ELEKTROOPTICKÝ MODULÁTOR

Intenzita preneseného elektrického poľa

$$E = \frac{E_0}{2} [\cos(\omega t + \Delta\phi) - \cos(\omega t - \Delta\phi)] = -E_0 \sin \Delta\phi \sin \omega t$$

Intenzita preneseného lúča

$$I = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} E^2 dt$$

z čoho

$$I = I_0 \sin^2 \Delta\phi$$

7. MODULÁCIA A DEMODULÁCIA OPTICKÉHO ŽIARENIA

7.3 ELEKTROOPTICKÝ MODULÁTOR

Koeficient prenosu

$$T = \frac{I}{I_0} = \sin^2 \left(\frac{\pi}{\lambda} r n_0^2 V \right) = \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} \frac{V}{V_\pi} \right)$$

kde

$$V_\pi = \frac{\lambda}{2 \pi n_0^2}$$

je **polvlnové napätie**

7. MODULÁCIA A DEMODULÁCIA OPTICKÉHO ŽIARENIA

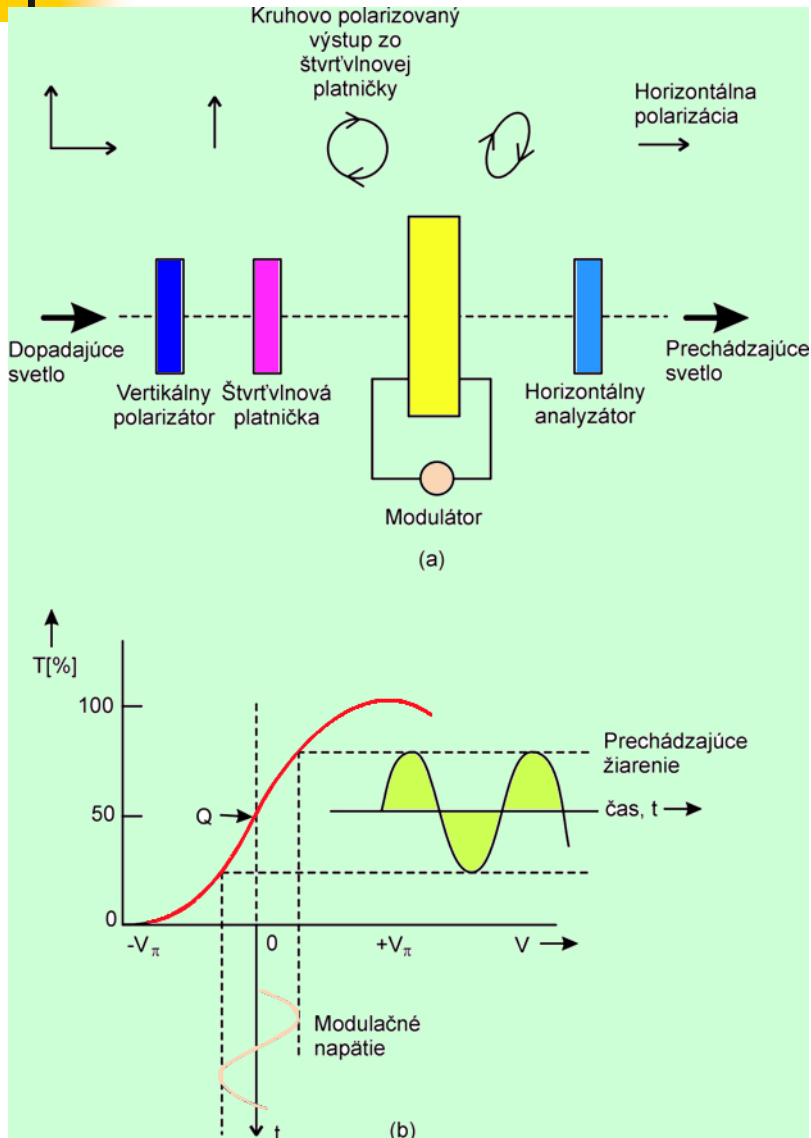
7.3 ELEKTROOPTICKÝ MODULÁTOR

CHARAKTERISTIKY ELEKTROOPTICKÝCH MATERIÁLOV

Materiál	$r[\text{pmV}^{-1}]$	n_o	n_e	\square_r
KH_2PO_4 (KDP)	10,6	1,51	1,47	42
KD_2PO_4 (KD*P)	26,4	1,51	1,47	50
AH_2PO_4 (ADP)	8,5	1,52	1,48	12
CdTe	6,8	2,6		7,3
LiTaO_3	30,3	2,175	2,180	43
LiNbO_3	30,8	2,29	2,20	18
GaAs	1,6	3,6		11,5
ZnS	2,1	2,32		16

7. MODULÁCIA A DEMODULÁCIA OPTICKÉHO ŽIARENIA

7.3 ELEKTROOPTICKÝ MODULÁTOR



Obr. 7.2
Usporiadanie elektrooptického modulátora so štvrt'vlnovou platničkou(a), prenosová charakteristika(b).

7. MODULÁCIA A DEMODULÁCIA OPTICKÉHO ŽIARENIA

7.3 ELEKTROOPTICKÝ MODULÁTOR

Lineárna oblasť

$$T_Q = \frac{I}{I_0} = \sin^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\pi V}{2 V_\pi} \right) = \frac{1}{2} \left(1 + \sin \frac{\pi V}{V_\pi} \right)$$

Pre malé hodnoty V

$$V / V_\pi = m \sin 2\pi f t \ll 1$$

Prenos modulátora

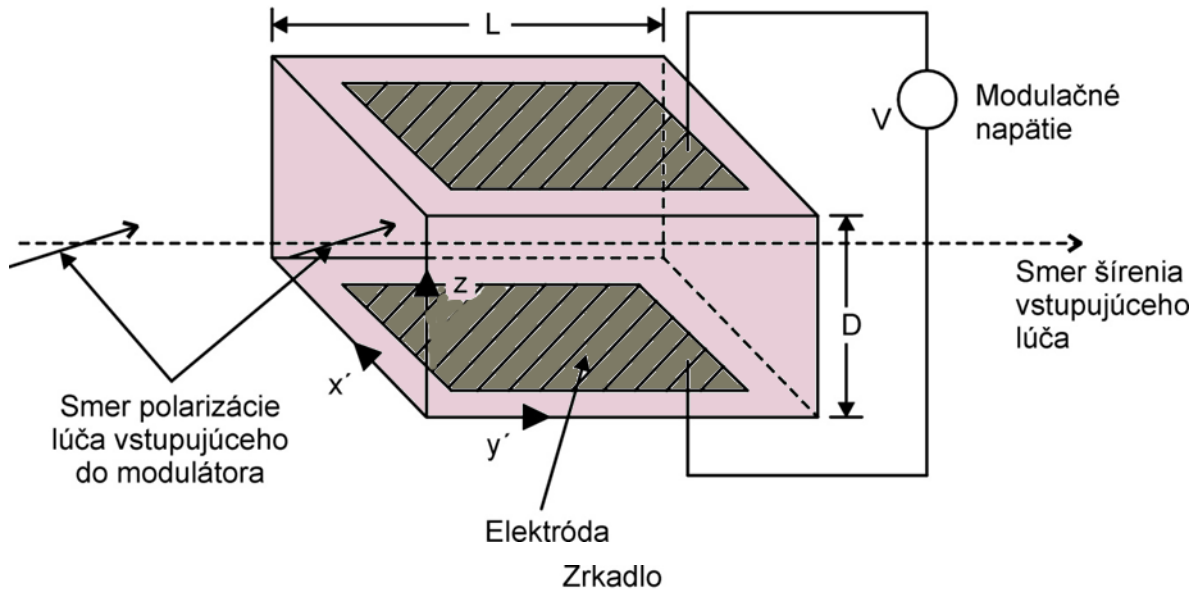
$$T_Q \cong \frac{1}{2} + \frac{\pi m}{2} \sin 2\pi f t$$

■ Priechny elektrooptický jav

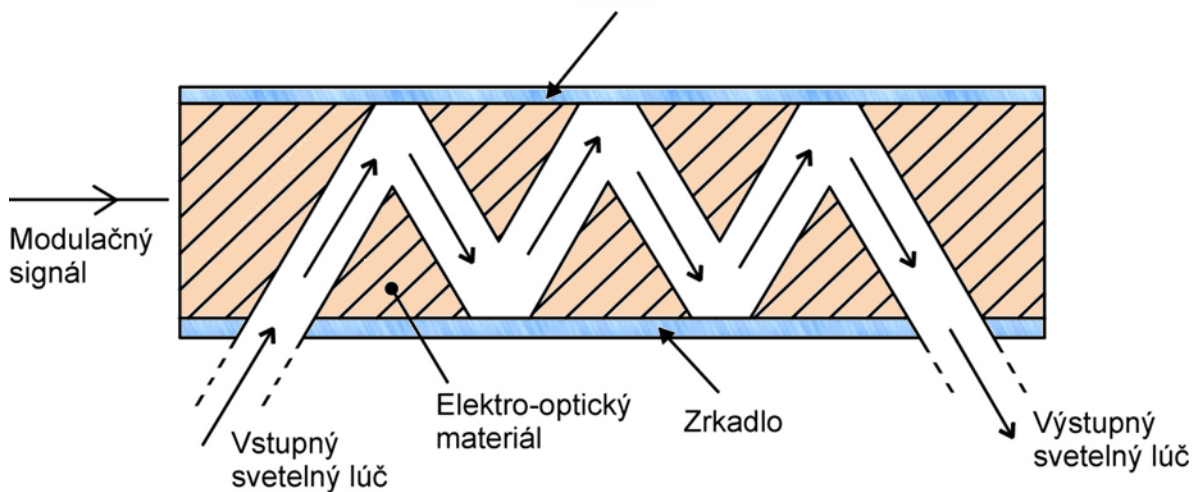
$$\Delta\phi = \frac{2\pi L}{\lambda} (n_0 - n_e) + \frac{\pi}{\lambda} r n_0^3 \frac{VL}{D}$$

7. MODULÁCIA A DEMODULÁCIA OPTICKÉHO ŽIARENIA

7.3 ELEKTROOPTICKÝ MODULÁTOR



Obr. 7.3
Priečný elektrooptický
modulátor.



Obr. 7.4
Modulátor s
postupujúcou vlnou.

7. MODULÁCIA A DEMODULÁCIA OPTICKÉHO ŽIARENIA

7.4 KERROV MODULÁTOR

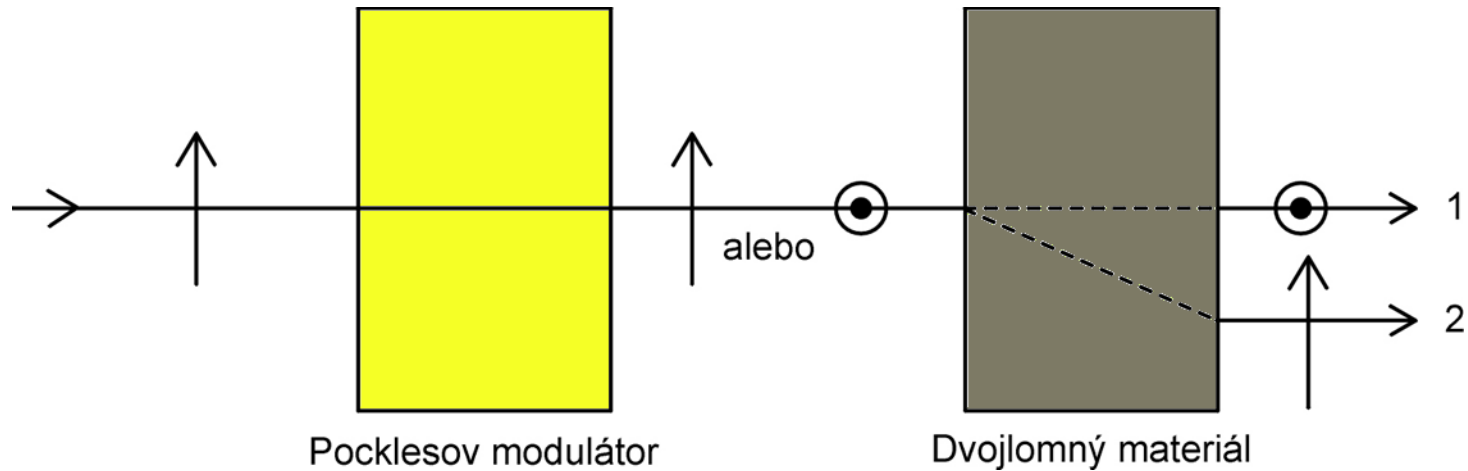
- **Kerrov jav** – zmena indexu lomu $\Delta n = n_p - n_l = K\lambda E^2$
- Nitrobenzén
- Zmes feroelektrických látok
- Tantalniobát draselný (**KTN**)
- Bárium titanát (**BaTiO₃**) – pre 100% moduláciu 50V a polvlnové napätie V_π je okolo 250V

TYPICKÉ HODNOTY KERROVEJ KONŠTANTY [$\lambda=589,2$ nm a $T=20^\circ\text{C}$]

Materiál	$K[\times 10^{-14} \text{ mV}^{-2}]$
Voda	5,2
Niobenzén	244
Nitrobenzén	137
Sklo	0,03-0,17

7. MODULÁCIA A DEMODULÁCIA OPTICKÉHO ŽIARENIA

7.5 PREPÍNANIE A ROZMIETANIE OPTICKÉHO LÚČA



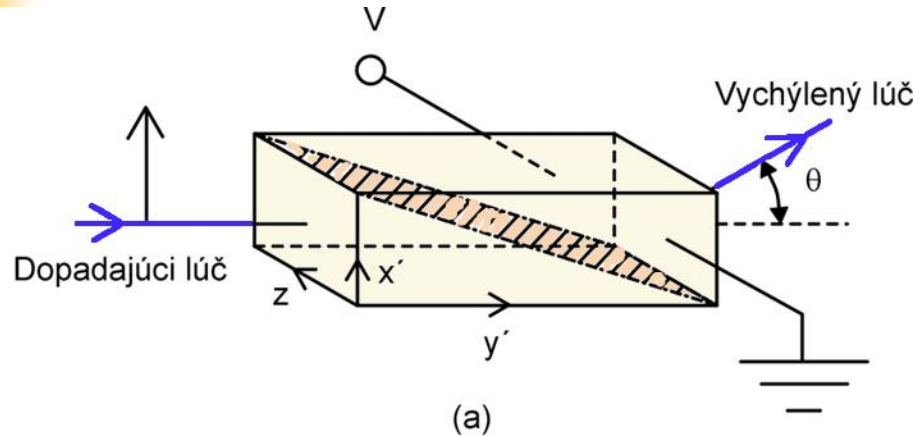
Obr. 7.5 Elektrooptický prepínač.

$$n_2 = n_0 - \frac{n_0^3}{2} r E_Z$$

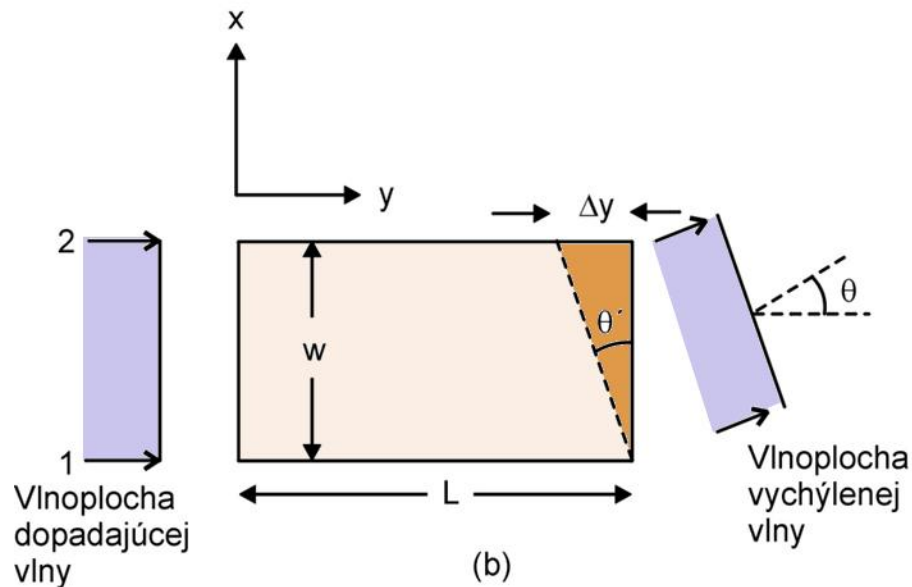
$$n_1 = n_0 + \frac{n_0^3}{2} r E_Z$$

7. MODULÁCIA A DEMODULÁCIA OPTICKÉHO ŽIARENIA

7.5 PREPÍNANIE A ROZMIETANIE OPTICKÉHO LÚČA



Obr. 7.6
Rozmietanie optického lúča:
(a) usporiadanie,
(b) princíp práce.



7. MODULÁCIA A DEMODULÁCIA OPTICKÉHO ŽIARENIA

7.5 PREPÍNANIE A ROZMIETANIE OPTICKÉHO LÚČA

Lúče 1 a 2

$$t_1 = \frac{Ln}{c} \quad \text{a} \quad t_2 = \frac{L(n + \Delta n)}{c}$$

Dráhové oneskorenie lúča 2

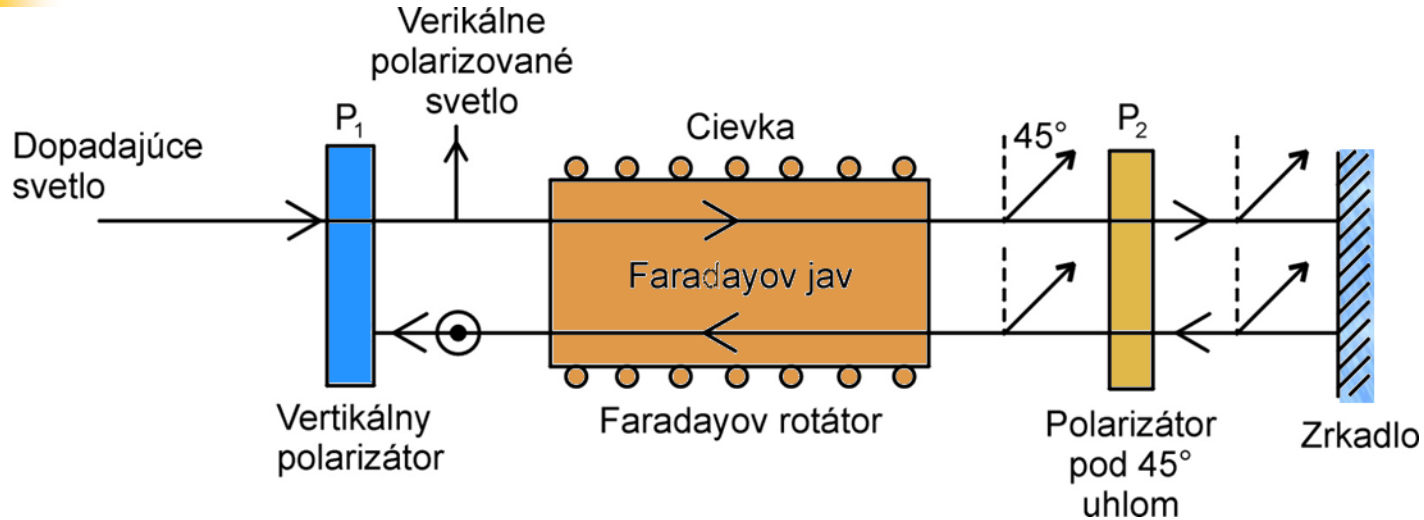
$$\Delta y = L \frac{\Delta n}{m}$$

Vychýlenie

$$\theta = n\theta' = n \frac{\Delta y}{W} = \frac{L\Delta n}{W} = \frac{L}{W} n_0^3 r E_z$$

7. MODULÁCIA A DEMODULÁCIA OPTICKÉHO ŽIARENIA

7.6 MAGNETOOPTICKÝ MODULÁTOR



Obr. 7.7 Optický izolátor s využitím Faradayovho javu.

HODNOTY VERDETOVEJ KONŠTANTY PRE $\lambda=589,3$ nm

- Faradayov jav**

$$\theta = VBL$$

pre flintové sklo je

$$\Theta \cong 1,6^\circ \text{mm}^{-1} \text{T}^{-1}$$

$$\theta = \frac{2\pi}{\lambda} (n_r - n_l) L$$

- Optický izolátor**

Materiál	V[rad m ⁻¹ T ⁻¹]
Kremeň (SiO ₂)	4,0
ZnS	82
Korunové sklo	6,4
Flintové sklo	23
NaCl	9,6

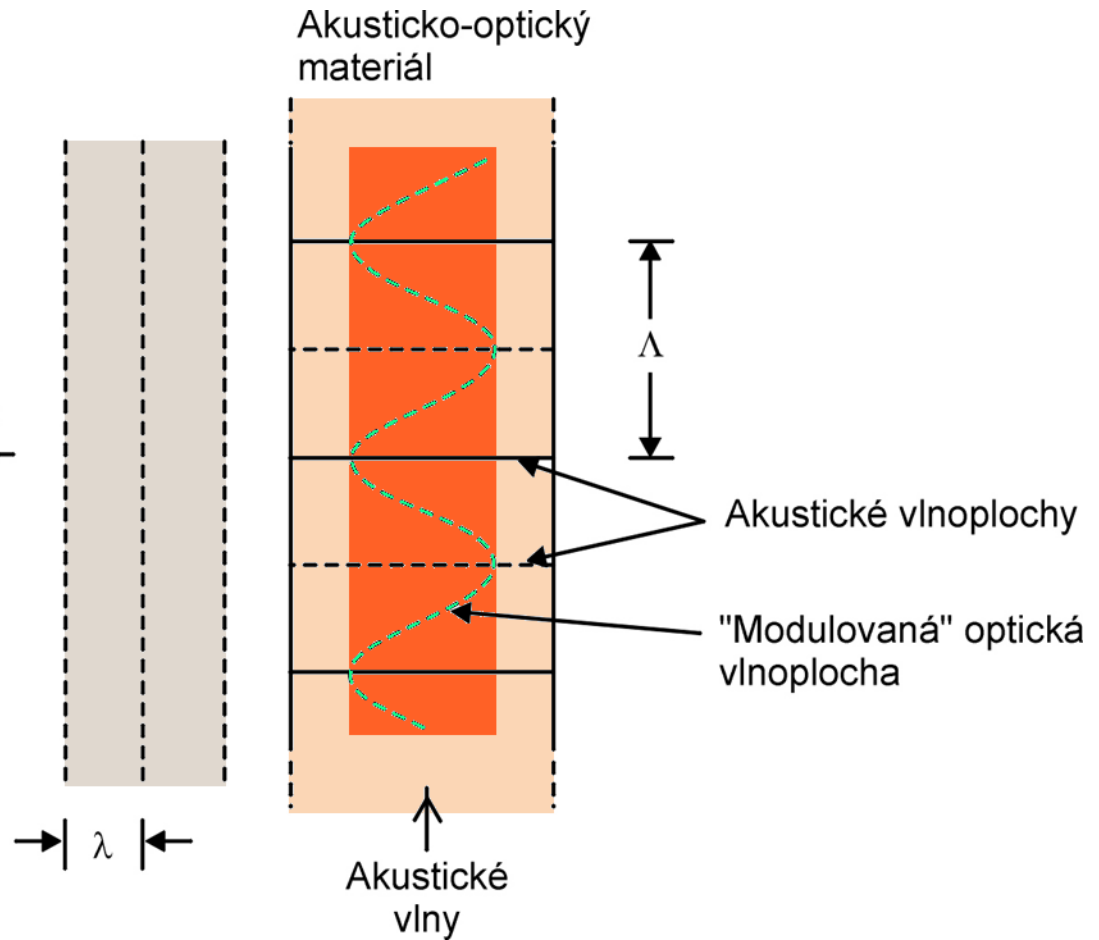
7. MODULÁCIA A DEMODULÁCIA OPTICKÉHO ŽIARENIA

7.7 AKUSTICKOOPTICKÝ MODULÁTOR

**Zmena indexu
lomu**

$$\Delta n \sim \sqrt{P_A}$$

Dopadajúce
optické
vlnoplochy →



Obr. 7.8 Ilustrácia akustickooptickej modulácie.

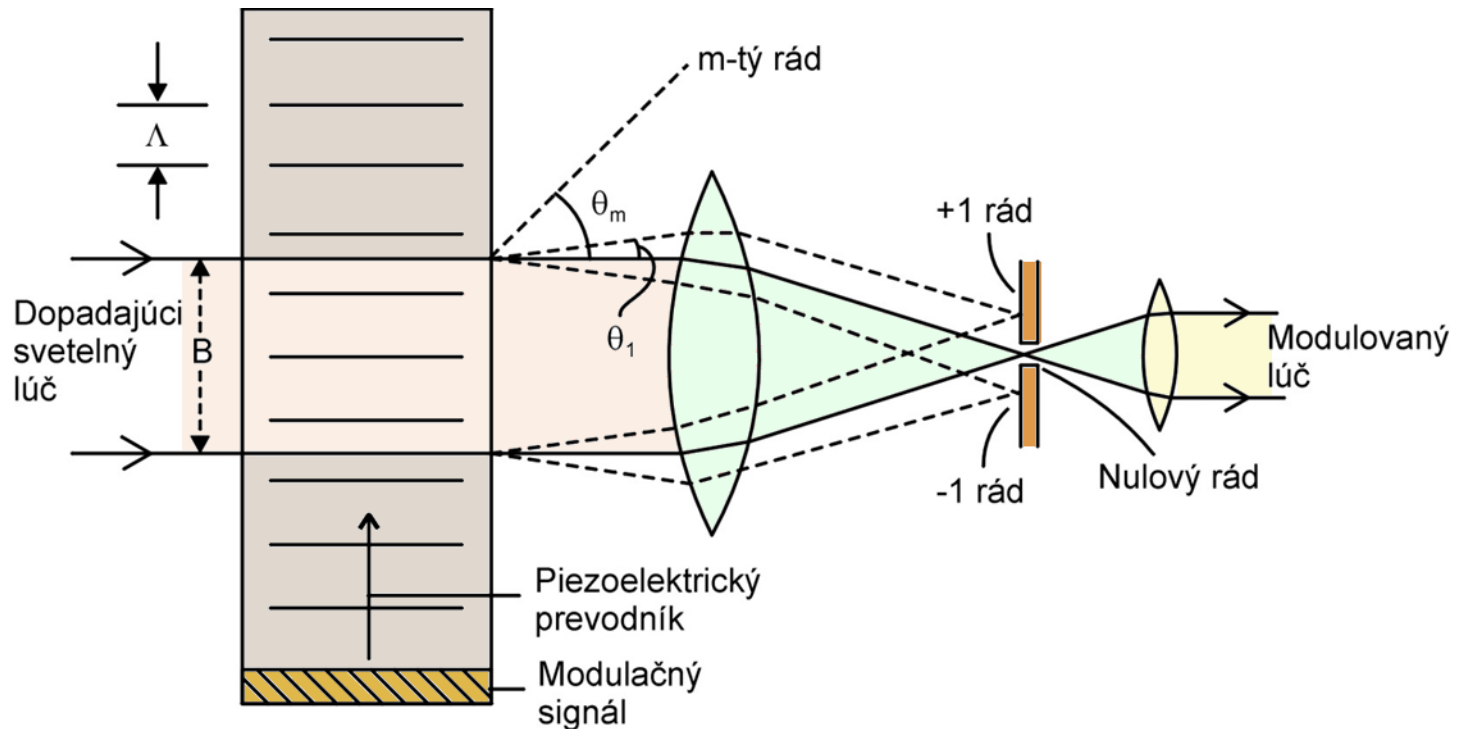
7. MODULÁCIA A DEMODULÁCIA OPTICKÉHO ŽIARENIA

7.7 AKUSTICKOOPTICKÝ MODULÁTOR

1. Ramanov-Nathov režim

$$m\lambda_0 = \Lambda \sin \theta_m$$

kde $m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ je rád a θ_m zodpovedajúci uhol difrakcie



Obr. 7.9 Ramanov-Nathov režim práce akustooptického modulátora.

7. MODULÁCIA A DEMODULÁCIA OPTICKÉHO ŽIARENIA

7.7 AKUSTICKOOPTICKÝ MODULÁTOR

2. Braggov režim

Prvá podmienka:

$$\theta_d = \theta_i$$

$m=0,1,2, \dots$ je rád difrakcie

Druhá podmienka:

$$\sin \theta_i + \sin \theta_d = \frac{m\lambda}{\Lambda}$$

Obe podmienky:

$$\sin \theta_B = \frac{\lambda}{2\Lambda}$$

Θ_B – Braggov uhol

Difrakčná účinnosť

$$\eta = \sin^2 \frac{\pi \Delta n L}{\lambda \cos \theta_B}$$

Dopplerov jav

$$\nu' = \nu_0 \left(1 \pm 2V_A \left(\frac{c}{n} \right) \right)$$

Frekvenčný posun

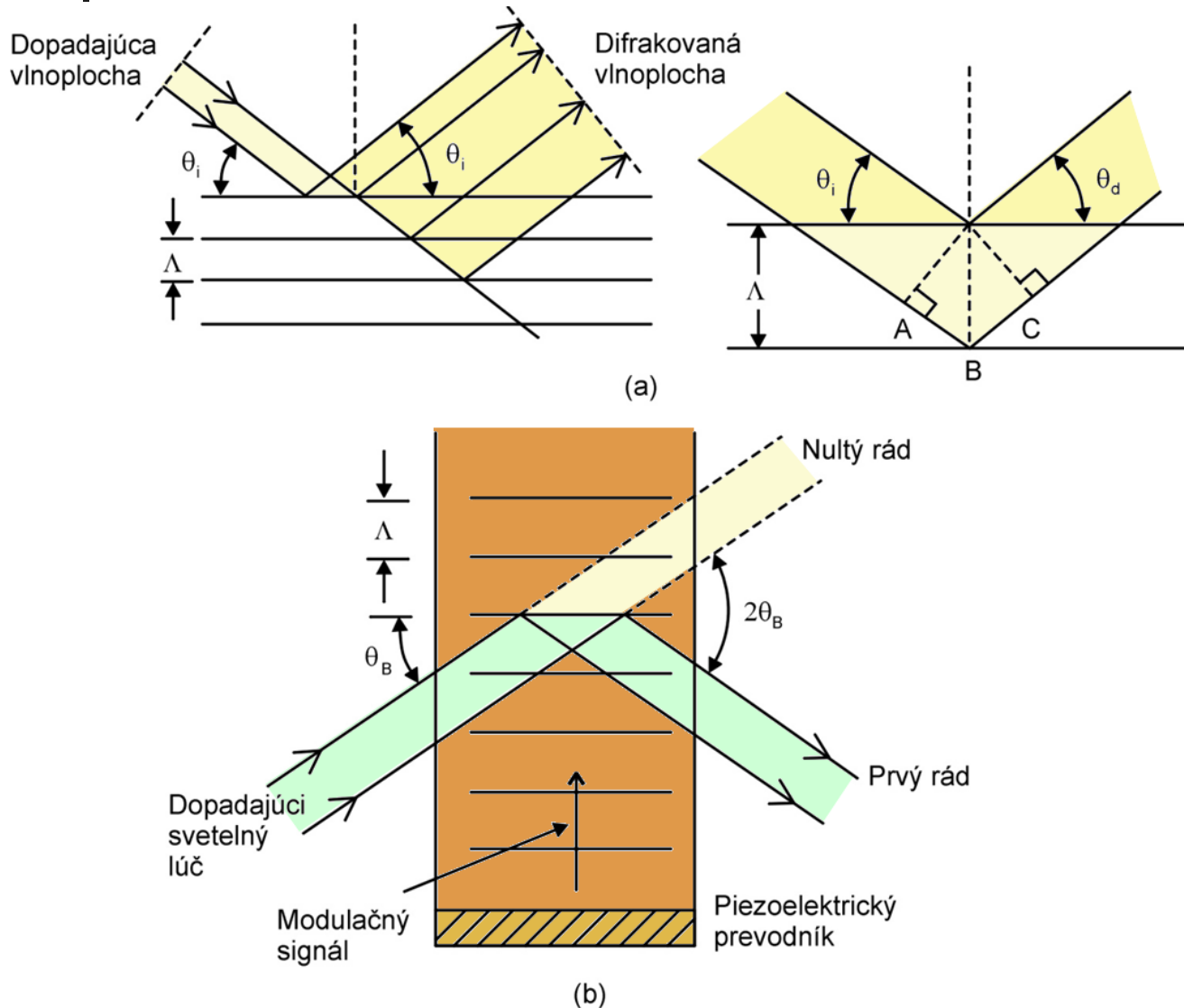
$$\Delta \nu = \pm \frac{2\nu_0 V_A \sin \theta_d n}{c}$$

$$\Delta \nu = \pm \frac{V_A}{\Lambda} = \pm f_0$$

- materiály na báze LiNbO_3 a PbMoO_3

7. MODULÁCIA A DEMODULÁCIA OPTICKÉHO ŽIARENIA

7.7 AKUSTICKOOPTICKÝ MODULÁTOR



Obr. 7.10
Braggov
akustickooptický
modulátor:
(a) geometria
difrakcie,
(b) usporiadanie
modulátora.

7. MODULÁCIA A DEMODULÁCIA OPTICKÉHO ŽIARENIA

7.8 Nelineárna optika

Elektrická polarizácia

$$P = \varepsilon_0 (\chi E + \chi_2 E^2 + \chi_3 E^3 + \dots)$$

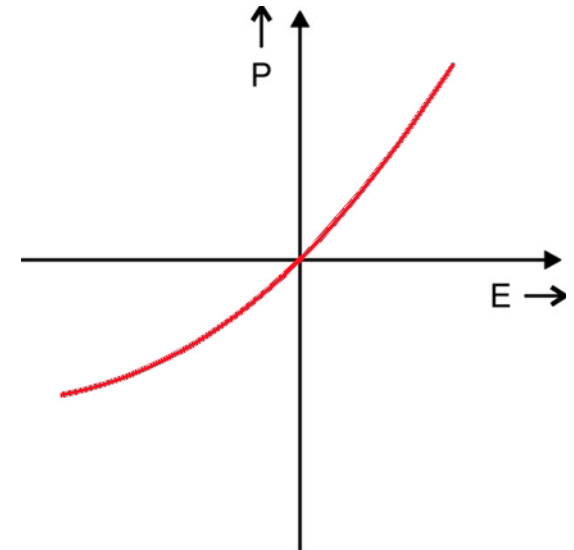
χ – lineárna susceptibilita, χ_2, χ_3, \dots
nelineárne optické koeficienty

Aplikované pole so sínusovým harmonickým tvarom

$$E = E_0 \sin \omega t$$

Vznikajú vyššie harmonické

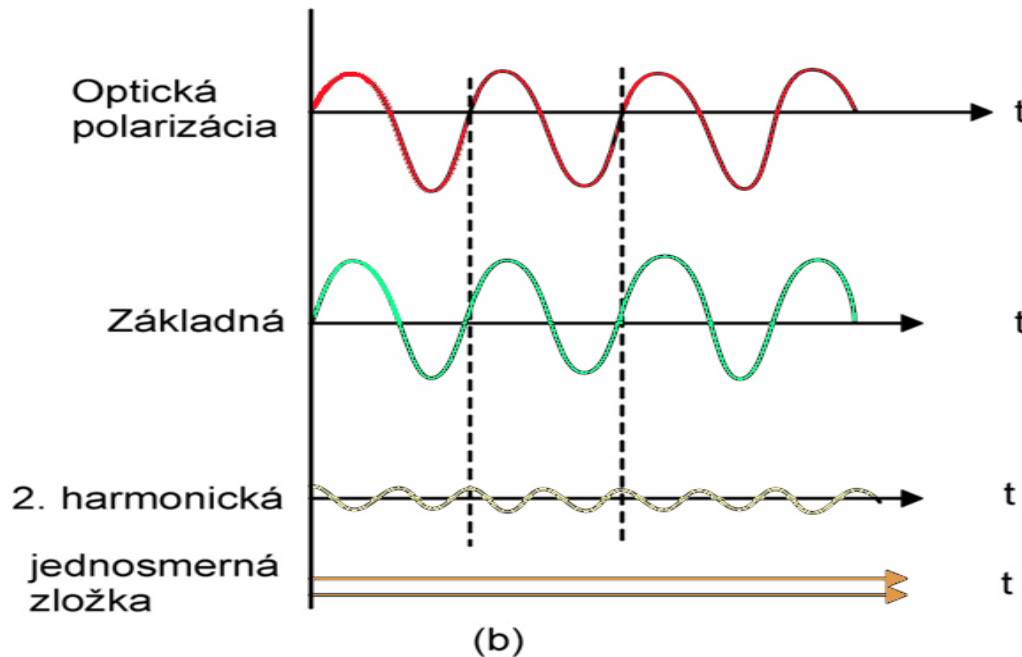
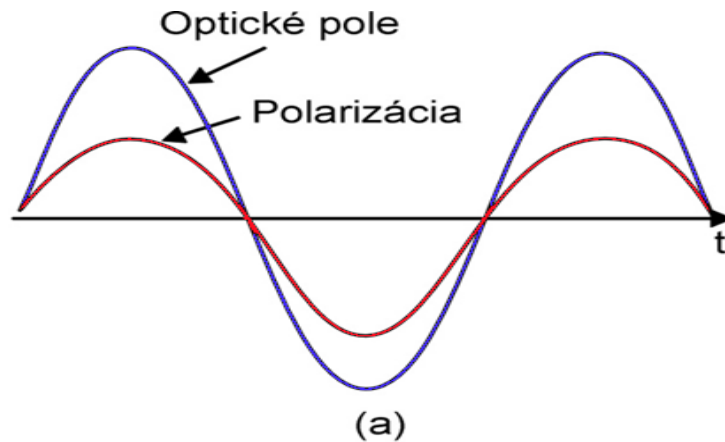
$$\begin{aligned} P &= \varepsilon_0 (\chi E_0 \sin \omega t + \chi_2 E_0^2 \sin^2 \omega t + \chi_3 E_0^3 \sin^3 \omega t + \dots) = \\ &= \varepsilon_0 \left(\chi E_0 \sin \omega t + \frac{1}{2} \chi_2 E_0^2 (1 - \cos 2\omega t) + \dots \right) \end{aligned}$$



Obr. 7.11
Nelineárna závislosť polarizácie P od intenzity elektrického poľa E.

7. MODULÁCIA A DEMODULÁCIA OPTICKÉHO ŽIARENIA

7.8 Nelineárna optika



Obr. 7.12
Aplikované elektrické
(optické) pole a
výsledná polarizácia
(a),
generácia vyšších
harmonických (b).

7. MODULÁCIA A DEMODULÁCIA OPTICKÉHO ŽIARENIA

7.8 NELINEÁRNA OPTIKA

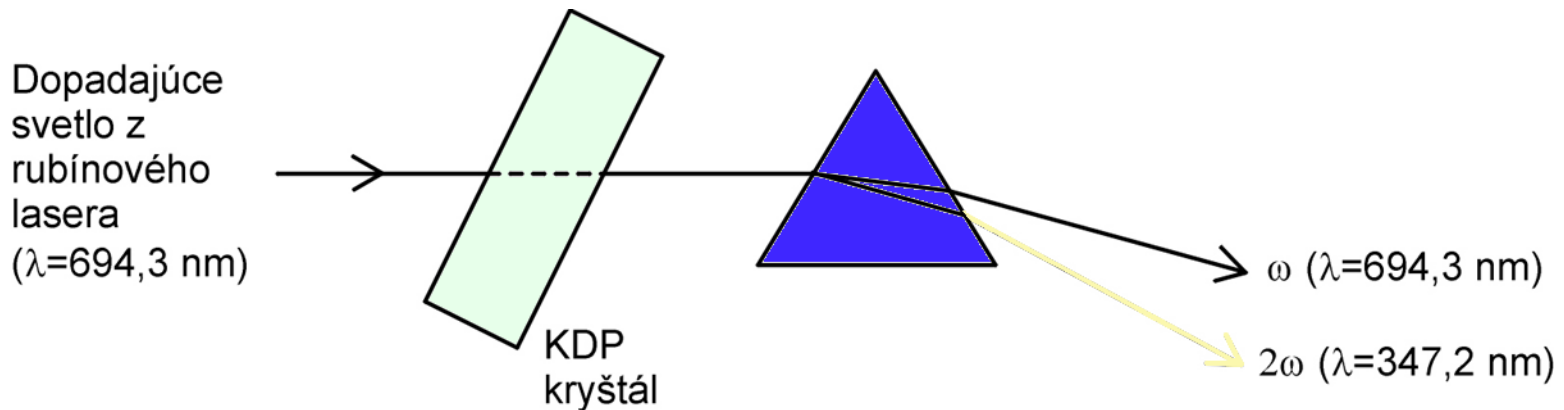
- Intenzita vonkajšieho elektrického poľa 10^6 Vm^{-1} (hustota výkonu okolo 10^9 Wm^{-2}) – porovnateľná s intenzitou vnútorného elektrického poľa v atómoch (rádove 10^{11} Vm^{-1})
- Hustota výkonu slnečného svetla rádove 100 Vm^{-1} a 20 Wm^{-2}
- Generácia harmonických zložiek : kremeň, **ADP** a **KDP** – Frank v roku 1961
- Experiment – rubínový laserový lúč s $\lambda=694,3 \text{ nm}$, nelineárny krištál (**KDP**)
- Účinnosť konverzie veľmi malá $10^{-6} \%$ až $10^{-4} \%$

Koherenčná dĺžka

$$l_c = \frac{\pi}{2k_1 - k_2}$$

7. MODULÁCIA A DEMODULÁCIA OPTICKÉHO ŽIARENIA

7.8 NELINEÁRNA OPTIKA



Obr. 7.13 Zdvojenie frekvencie laserového žiarenia na nelineárnom kryštály KDP.

- **Prispôsobenie indexu lomu alebo fázy**

$$n_0^\omega = n_e^{2\omega}$$

- **Anihinačný** proces dvoch fotónov s frekvenciou ω a súčasný **Kreačný** proces fotónu s frekvenciou 2ω

7. MODULÁCIA A DEMODULÁCIA OPTICKÉHO ŽIARENIA

7.8 NELINEÁRNA OPTIKA

- **Zákon zachovania energie**

$$\hbar\omega + \hbar\omega = \hbar(2\omega)$$

- **Zákon zachovania momentu hybnosti**

$$\hbar k^\omega + \hbar k^\omega = \hbar k^{2\omega}$$

z čoho

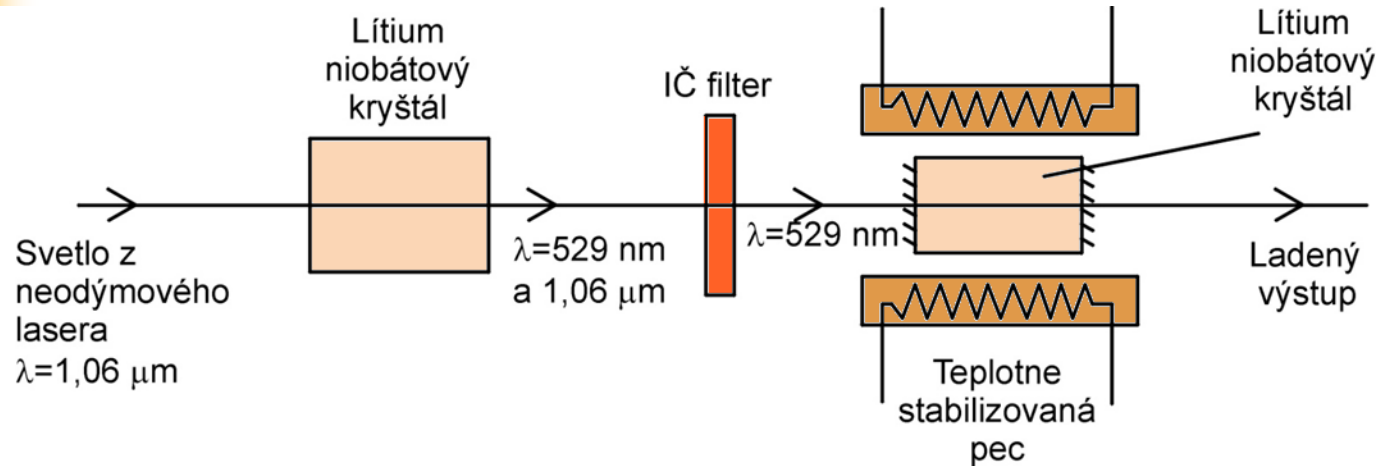
$$2k^\omega = k^{2\omega}$$

Parametrické zosilňovače a oscilátory

$$\omega_3 \leftrightarrow \omega_1 + \omega_2$$

7. MODULÁCIA A DEMODULÁCIA OPTICKÉHO ŽIARENIA

7.8 NELINEÁRNA OPTIKA



Obr. 7.14 Parametrický oscilátor - Giordmaine a Miller.

- **Zákon zachovania momentu hybnosti**

$$\hbar k_1 + \hbar k_2 = \hbar k_3$$

- Zmena teploty o 11°C vyvolá zmenu výstupnej frekvencie ν od $3,1 \cdot 10^{14}$ do $2,6 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$

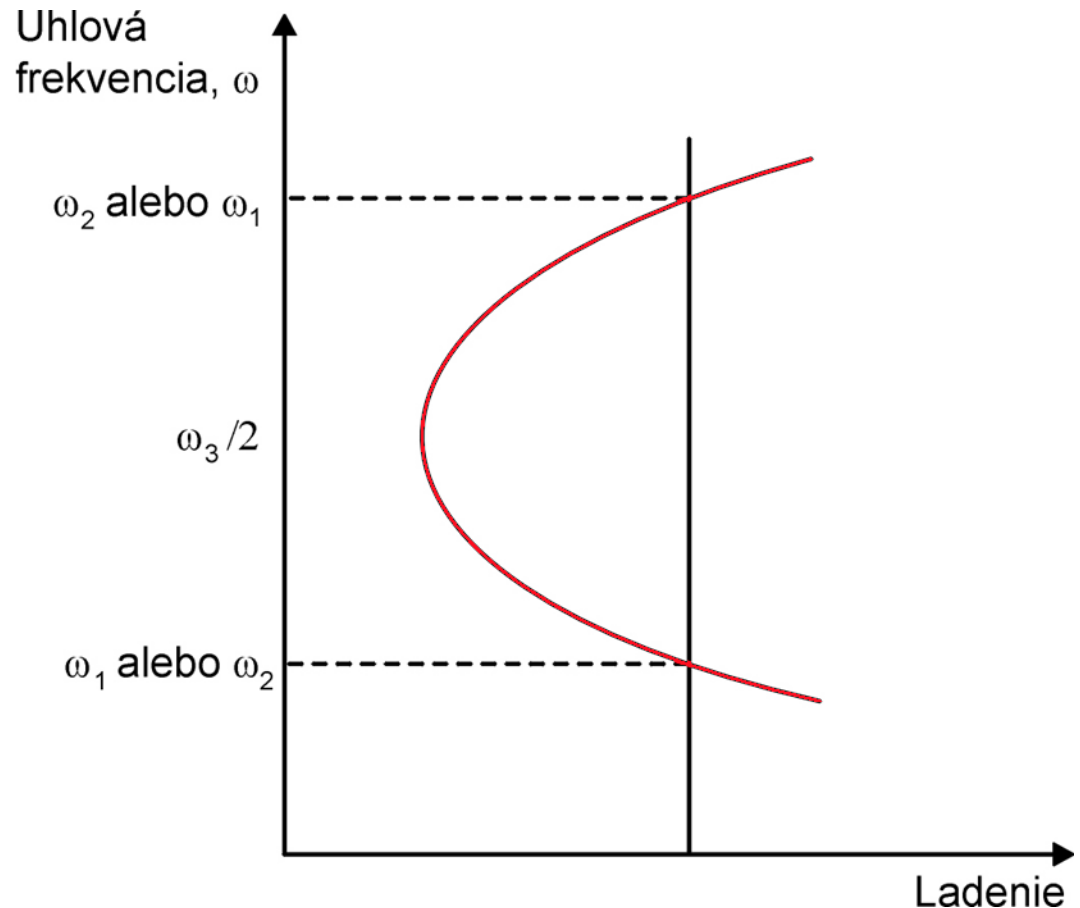
7. MODULÁCIA A DEMODULÁCIA OPTICKÉHO ŽIARENIA

7.8 Nelineárna optika

- Pôvodne bola účinnosť konverzie okolo 1%, dnes sa dosahuje okolo 50%

Aplikácie :

- V optických radaroch
- Lidaroch
- Separácii izotopov



Obr. 7.15 Ladiaca krivka parametrickeho oscilatora.

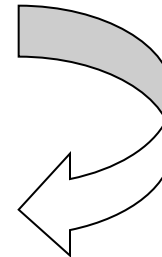
7. MODULÁCIA A DEMODULÁCIA OPTICKÉHO ŽIARENIA

7.9 DEMODULÁCIA INTENZITNEJ MODULÁCIE

- $\lambda=0,85\mu\text{m}$, **PIN** dióda
- **SNR** > 80 dB
- Rozlíšenie 1 časť z 10^7

7.10 DEMODULÁCIA FÁZOVEJ MODULÁCIE

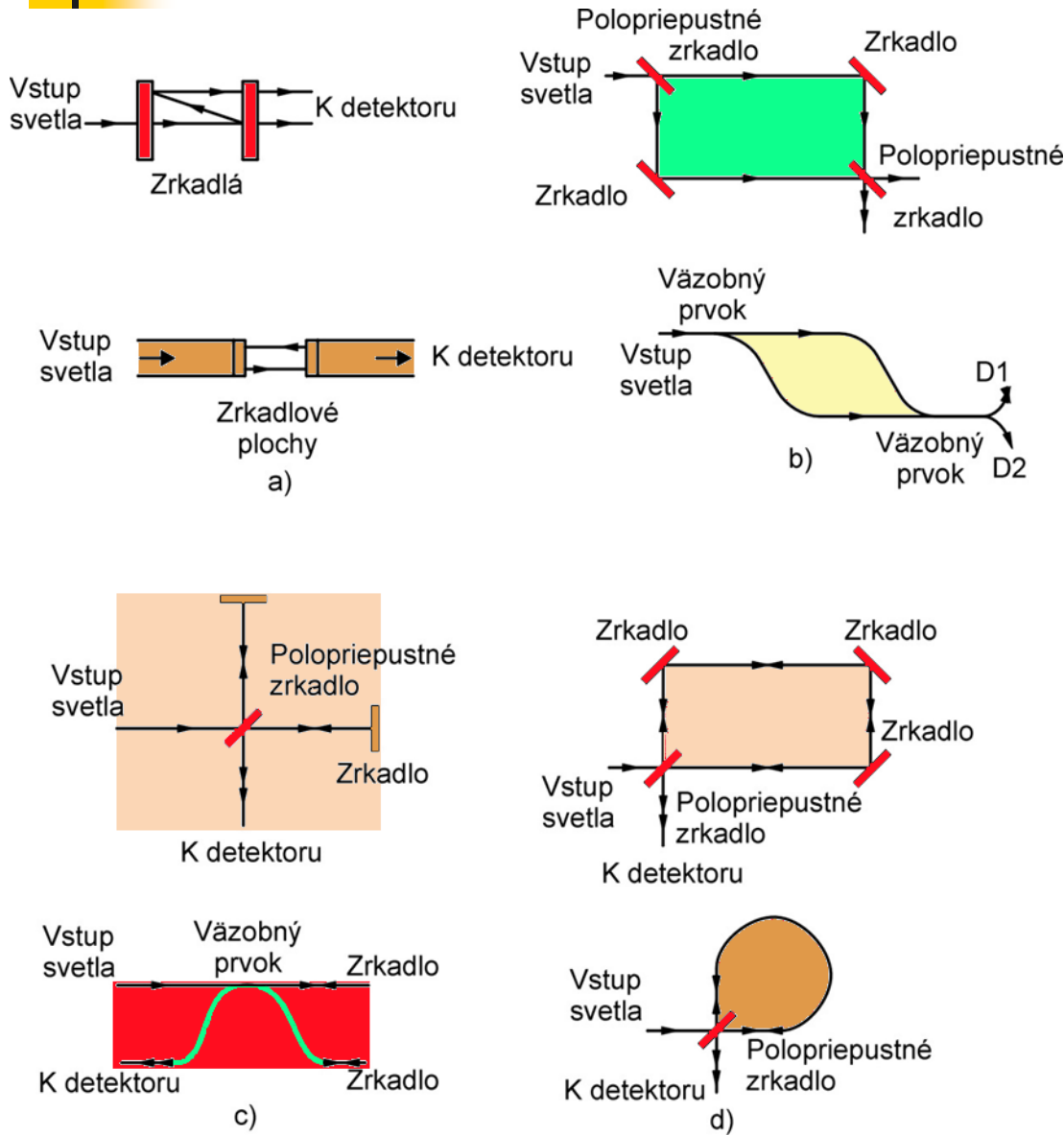
- **Fabryho – Perotov interferometer**
- **Machov – Zehnderov interferometer**
- **Michelsonov interferometer**
- **Sagnacov interferometer**



$$E_i = E_1 \sin \omega_L t + E_2 \sin(\omega_L t + \phi(t))$$

7. MODULÁCIA A DEMODULÁCIA OPTICKÉHO ŽIARENIA

7.10 DEMODULÁCIA FÁZOVEJ MODULÁCIE



Obr. 7.16
Optické schémy najčastejšie používaných interferometrov, realizované využitím klasickej optiky a optických vlákien:

- a) Fabryho-Perotov,**
- b) Machov-Zehnderov,**
- c) Michelsonov,**
- d) Sagnacov.**

7. MODULÁCIA A DEMODULÁCIA OPTICKÉHO ŽIARENIA

7.10 DEMODULÁCIA FÁZOVEJ MODULÁCIE

Fotoprúd

$$i(t) \approx [1 + \cos \phi(t)]$$

$$\sin \phi = 1$$

- **Kvadraturný pracovný bod**

SNR okolo 80 až 90 dB – detekcia zmeny fázy rádovo 10^{-4} rad

7. MODULÁCIA A DEMODULÁCIA OPTICKÉHO ŽIARENIA

7.11 DEMODULÁCIA POLARIZAČNEJ MODULÁCIE

Detekcia lineárnej polarizácie

Amplitúda zložky svetla

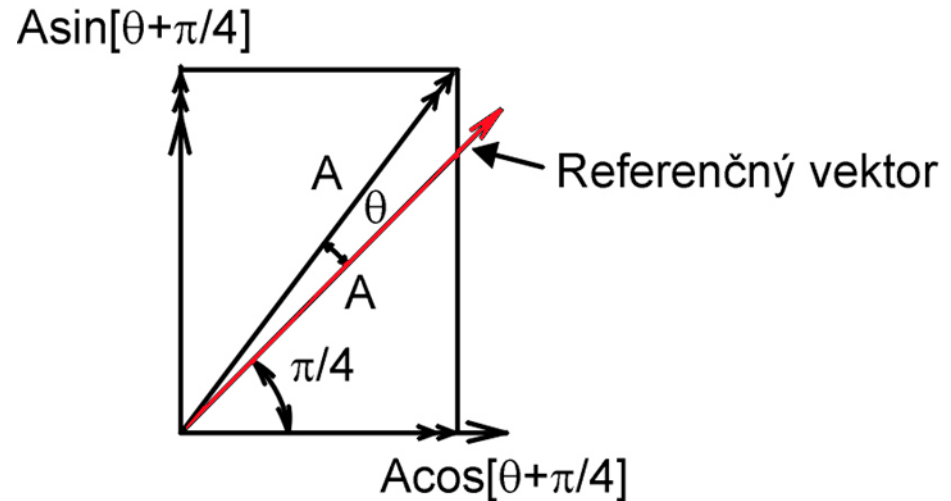
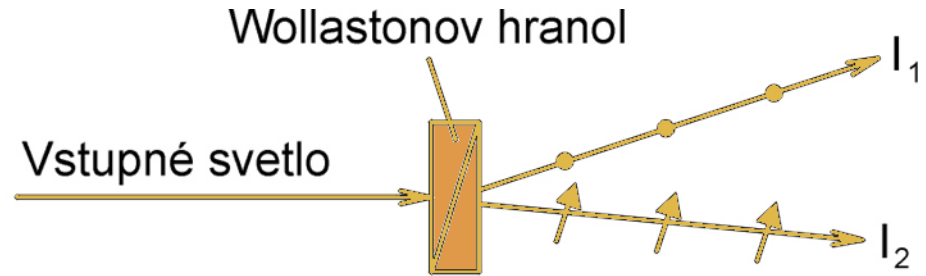
- **v horizontálnom smere**

$$A_H = A \sin(\pi/4 + \theta)$$

- **vo vertikálnom smere**

$$A_V = A \cos(\pi/4 + \theta)$$

$$\sin 2\theta = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2}$$



Obr. 7.17
Wollastonov hranol ako polarimeter
lineárne polarizovaného svetla.

7. MODULÁCIA A DEMODULÁCIA OPTICKÉHO ŽIARENIA

7.11 DEMODULÁCIA POLARIZAČNEJ MODULÁCIE

- Rozlíšenie 1 časť z 10^8 častí (rádovo 10^{-6} stupňov)
- V praxi 10^{-2} stupňov
- Problém detekcie všeobecnejších stavov polarizácie svetla – meranie

Stokesových parametrov

$$S_0 = 2I_0$$

$$S_1 = 2I_1 - 2I_0$$

$$S_2 = 2I_2 - 2I_0$$

$$S_3 = 2I_3 - 2I_0$$

7. MODULÁCIA A DEMODULÁCIA OPTICKÉHO ŽIARENIA

7.12 DEMODULÁCIA FREKVENČNEJ MODULÁCIE

Dopplerov posun

$$v_D = v_S \left(1 + \frac{v}{c} \right)$$

Pri vlnovej dĺžke $0,633 \mu\text{m}$ je Dopplerov posun $1,6 \cdot 10^6 \text{ Hz/ (ms}^{-1}\text{)}$

7.13 DEMODULÁCIA SPEKTRÁLNEJ MODULÁCIE

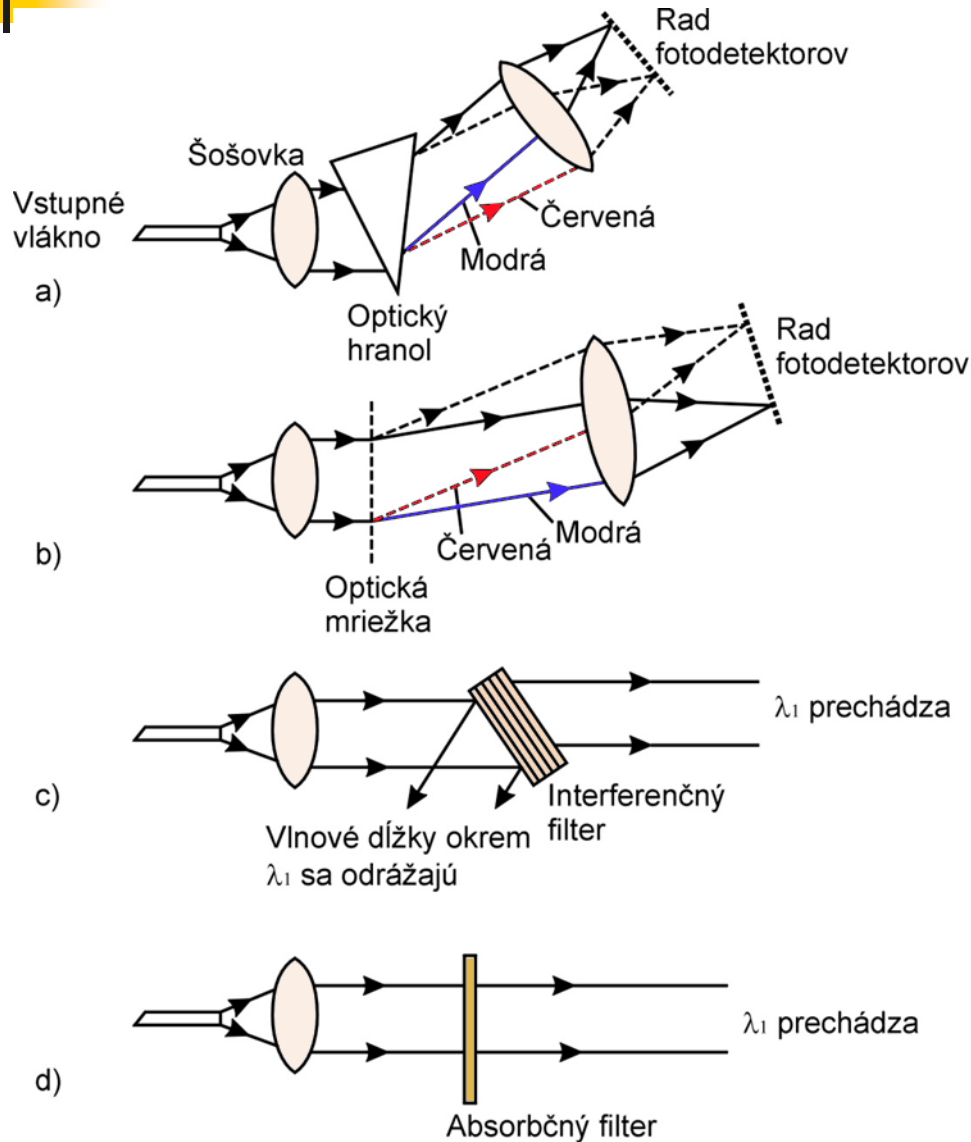
Meranie vstupného $f_{\text{vst}}(\lambda)$ a výstupného $f_{\text{výst}}(\lambda)$ optického spektra

Dva stupne:

- **Vhodná separácia vlnových dĺžok**
- **Meranie optického výkonu pre separované optické dĺžky**

7. MODULÁCIA A DEMODULÁCIA OPTICKÉHO ŽIARENIA

7.13 DEMODULÁCIA SPEKTRÁLNEJ MODULÁCIE



Obr. 7.18
Rôzne metódy detekcie farebnej modulácie.